

Cuire la terre pour cultiver depuis le Néolithique

Approches géoarchéologiques pour la reconnaissance
de témoins primaires de feux agro-pastoraux (France)

Clément Menbrivès

Thèse de doctorat d'Archéologie soutenue le 6 décembre 2023

École doctorale d'archéologie ED 112 – Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Membres du jury :

M. Christophe PETIT Professeur	Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne UMR 7041 ARSCAN	Directeur
Mme Michelle ELLIOTT Maîtresse de conférences	Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne UMR 7041 ARSCAN	Co-encadrante
M. Jean-Paul MÉTAILIÉ Directeur de Recherche émérite CNRS	Université de Toulouse Jean Jaurès UMR GEODE	Rapporteur
M. Jean-François BERGER Directeur de Recherche CNRS	Université Lumière Lyon 2 UMR 56000 EVS	Rapporteur
M. Jérôme POULENARD Professeur	Université de Savoie Mont Blanc UMR 5204 EDYTEM	Président du jury
M. Cristiano NICOSIA Professeur	Université de Padoue	Examineur
M. Anthony DENAIRE Maître de conférences	Université de Bourgogne UMR 6298 ARTEHIS	Examineur

Sauf mention contraire, nous avons réalisé toutes les figures de ce manuscrit. Les sources des illustrations sont explicitement mentionnées dans les légendes des figures par la mention « crédits » ou par la référence à la publication. Toute erreur ne serait que fortuite.

Remerciements

Ce projet a bénéficié d'un financement doctoral de trois ans au sein de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. J'ai réalisé la majeure partie de mes travaux dans les laboratoires de la Maison archéologie & ethnologie René-Ginouvès, devenue Maison des Sciences de l'Homme Mondes. Rattaché à l'équipe Archéologies Environnementales au sein de l'UMR 7041 Archéologies et Sciences de l'Antiquité, je remercie la direction de l'UMR et les responsables de l'équipe de m'avoir accueilli.

J'adresse mes sincères remerciements à Christophe Petit d'avoir accepté de me suivre et de m'encadrer dans ce projet difficile. Vous m'avez permis d'aiguiser mon esprit critique et de faire en sorte que ce travail soit bien plus qu'un patchwork d'idées, de réflexions et d'analyses, mais une vraie thèse d'archéologie. Merci à Michelle Elliott de m'avoir accueilli au laboratoire d'archéobotanique et d'avoir continué de me suivre bien que je me sois progressivement éloigné du domaine de l'anthracologie.

Merci beaucoup aux chercheurs m'ayant fait l'honneur de consacrer leur temps et leur expertise pour juger scientifiquement ce travail de recherche : Jean-Paul Métailié, Jean-François Berger, Jérôme Poulenard, Cristiano Nicosia et Anthony Denaire.

Je tiens à remercier chaleureusement Arthur Guiblais-Starck, qui a accepté de partager pleinement les résultats de la fouille du site de Vaudes Les Trappes, et de me confier du matériel pour que je puisse mener à bien cette étude. Je remercie également fortement Gérard Vernet et Didier Miallier qui ont accepté de collaborer et de me fournir du matériel à étudier pour les sites du Puy-de-Dôme. Merci aussi à Rémi Martineau, ainsi qu'à Marie Imbeaux et Anthony Dumontet pour leur collaboration et l'intégration de mes travaux dans les opérations archéologiques programmées menées sur le site de Saint-Gond.

Je suis particulièrement reconnaissant à Jessica Legendre pour son aide indispensable, et sa bonne humeur, à la réalisation des analyses au MEB et à la microscopie corrélative. Je suis également reconnaissant à Laurence Le Callonnec et à Laurent Emmanuel pour leur accueil amical au laboratoire de l'ISTEP, et pour m'avoir permis de m'initier à la cristallographie. J'adresse aussi mes remerciements à Fabrice Sauvagnargues pour sa disponibilité et pour l'organisation de l'accès à la machine XRF. Merci à Alexandra Legrand-Pineau pour son accueil et son soutien technique à la plateforme de Microscopie de la MSHM. Sylvain Laporte m'a dépanné de nombreuses fois sur le plan matériel au cours de mon long séjour à la MSHM, et cela toujours avec bonne humeur et bienveillance, et je l'en remercie sincèrement. Merci également aux vigiles de la MSHM et du bâtiment Max Weber de m'avoir de nombreuses fois rendu service.

Je dois beaucoup à Alain Giosa, et je lui suis particulièrement reconnaissant pour m'avoir mis le pied à l'étrier de l'archéopédologie et de m'avoir soutenu et conseillé avec bienveillance et amitié depuis ma licence 3 et durant les premières années de ma thèse. J'exprime également mes remerciements à Lydie Dussol, qui m'a apporté une aide précieuse dans l'analyse des charbons de bois. Je remercie Thomas Delbey qui m'a renseigné et m'a fourni des pistes de recherches très intéressantes en archéométrie.

Ce travail ne serait pas non plus ce qu'il est sans la participation de très nombreuses personnes ayant accepté de réaliser des analyses ponctuelles pour ce projet, ayant pris le temps de rechercher de la documentation ancienne ou de partager avec moi leurs travaux et découvertes, ou autrement m'ayant conseillé, critiqué ou orienté sur des questions analytiques ou sur des problématiques de recherche. Merci notamment à Laure Fontana, Hervé Richard, Vincent Bichet, Jacques Élie Brochier, Kai Fechner, Bruno Desachy, Annelise Binois, Jérôme Spiesser, Céline Tomczyk, Gabriel Teurquety, Ségolène Vandevelde, Quentin Borderie, Wassel Eddargach, Sylvain Boisselier, Baptiste Pradier, Kévin Costa, Antoine Dorison, Nicolas Bermeo, Thomas Lagane, Anthony Bourdelle, Philippe Fajon, Thierry Lepert, Caroline Schaal, Aline Garnier, Salomé Granai, Christian Camerlynck, Damien Ertlen, Clarissa Cagnato, Christophe Laurelut, Thierry Gé, Marie-Agnès Courty, Jérôme Brenot, Laurent Deschodt, Michel Magny, Alexandre Michel. Merci à mes collègues de bureau, de laboratoire et de terrain, qui m'ont enrichi de souvenirs et d'expériences et à ceux que j'oublie de nommer ici. Merci enfin à Hélène Criaud pour sa réactivité et son soutien à la fin de ma thèse.

Merci à tous mes proches qui m'ont apporté leur soutien personnel et sont encore là pour moi. J'adresse un remerciement particulier à vous qui avez pris un temps précieux à relire et corriger ce travail rébarbatif : Marine Durocher, Benoît Menbrivès.

Ma Lucie, merci à toi, de me porter et de me soutenir ainsi.

Sommaire

Remerciements	iii
Introduction.....	1
Partie 1 : Les débuts de l'agriculture en Europe centrale : Néolithique, modèles d'agriculture et témoins archéologiques	5
1. La néolithisation en Europe centrale : prise de vue générale.....	6
2. Le Néolithique : entre <i>techniques de cultures</i> et <i>économie agraire</i>	8
3. Agricultures néolithiques en domaine tempéré : modèles et données	13
4. Des traces archéologiques « primaires » de l'agriculture	20
5. Le feu : un agent primordial pour l'enregistrement des activités agropastorales préhistoriques ?	23
6. Problématique et démarche générale.....	32
Partie 2 : Les arts du feu en agriculture : vers une reconnaissance géoarchéologique.....	33
1. Systèmes agraires et techniques de culture : concepts, définitions et classifications.....	34
2. Les feux de végétation naturels.....	45
3. Les feux anthropiques : du façonnage des paysages à la préparation des champs	56
Partie 3 : Démarche et méthodes d'étude	105
1. Un premier inventaire issu de l'analyse de la littérature grise	106
2. Les sites d'étude.....	107
3. Méthodes d'analyses	110
Partie 4 : Vaudes « Les Trappes » (Aube) : un « brûlis » médiéval ?	119
1. Préambule	120
2. Contexte environnemental général.....	121
3. Résultats de l'opération archéologique de Vaudes	124
4. Caractéristiques générales et morphologie des traces rubéfiées.....	129
5. Résultats des caractérisations physico-chimiques	135
6. Résultats des analyses paléo-environnementales	152
7. Chronologie et périodicité du phénomène	156
8. Discussion	158
Partie 5 : Des « anomalies » pédo-sédimentaires médiévales et néolithiques en bordure du lac de Chalain (Jura).....	165
1. Préambule	166
2. Contexte général : le lac de Chalain.....	167
3. Démarche générale et contexte du secteur d'étude	174
4. Les séquences pédo-sédimentaires : description générale et caractéristiques morphologiques	177

5. Résultats des caractérisations physico-chimiques	187
6. Discussion	256
Partie 6 : Cendres et terres brûlées néolithiques aux marges des Marais de Saint-Gond (Marne)	267
1. Préambule	268
2. Contexte général	269
3. Le site d'étude de Courjeonnet « Les Grands Prés »	275
4. Résultats de terrain et observations préliminaires	278
5. Discussion	291
Partie 7 : Des niveaux rouges énigmatiques dans la plaine de Limagne (Puy-de-Dôme)	297
1. Préambule	298
2. Contexte général et historique de découverte	300
3. Synthèse des observations générales et contexte archéologique et paléo-environnemental des Niveaux Rouges	302
4. Résultats	316
5. Discussion	340
Partie 8 : Un niveau rubéfié au sommet du Puy de Dôme (Puy-de-Dôme).....	349
1. Préambule	350
2. Contexte géomorphologique et caractères macroscopiques	350
3. Résultats	353
4. Discussion	358
Partie 9 : L'écobuage : identification géoarchéologique, première synthèse et nouvelles questions	361
1. Identifier les vestiges de fourneaux agricoles	362
2. Premiers résultats du dépouillement des archives archéologiques	365
3. De nouvelles questions sur les agricultures préhistoriques	375
Conclusion	380
Bibliographie	386
Références antérieures à 1900	386
Références postérieures à 1900	387
Table des illustrations et des tableaux	457
Table des matières	464
Résumé	470

Introduction

« "Dans les friches, un jour, une parcelle est découpée. On la nettoie, souvent par écobuage, c'est-à-dire par le feu..." Cette phrase de Marc Bloch illustre bien la façon dont on emploie le terme d'écobuage dans la majeure partie de la littérature française moderne. C'est-à-dire sans en préciser vraiment le sens.

Que signifie, en effet, ce nettoyage par le feu ? Faut-il y voir, comme beaucoup l'on fait, un défrichage par le feu ? Mais alors, de quoi s'agit-il ? Plaçons-nous au milieu d'une forêt, d'une lande, d'une friche, et proposons-nous (par la pensée bien sûr, comme disent les physiciens) de défricher le terrain "par le feu". Comment allons-nous nous y prendre ?

Nous sommes bien obligés d'avouer que nous n'en savons rien. »

François Sigaut (1975), Avant-propos

L'acquisition de la maîtrise du feu par les hominidés a joué un rôle déterminant dans leur évolution biologique et culturelle (Perlès, 1977 ; Roebroeks et al., 2021 ; Roebroeks et Villa, 2011 ; Scott et al., 2014a). Il est généralement considéré que le feu est le premier « outil » ayant permis à *Homo sapiens* de modifier radicalement et largement son environnement naturel. Cependant, la question de l'ancienneté de son utilisation intentionnelle en dehors de la sphère domestique reste inconnue. Les modèles archéologiques pour l'Europe tempérée ont longtemps prôné que les populations néolithiques utilisaient régulièrement le feu à des fins agricoles. Ils se réfèrent à un système agraire très largement documenté par l'ethnographie, chez des sociétés évoluant en contexte de forêt tropicale, appelé agriculture itinérante sur brûlis ou abattis-brûlis. Brièvement, il consiste à abattre les arbres d'une parcelle boisée, à les laisser sécher puis les brûler avant d'ensemencer la terre (Sigaut, 1975 ; Mazoyer et Roudart, 1997). Ensuite, le terrain est abandonné. Le postulat de son existence au Néolithique repose principalement sur des données paléo-environnementales hors-sites¹, des données archéologiques intra-sites et des présupposés technologiques (p. ex : une technique agricole « simple » qui nécessite des outils « rudimentaires »). Ce modèle est aujourd'hui réfuté par une large partie de la communauté néolithique, principalement sur la base des résultats d'études intra-sites, en particulier archéobotaniques, qui suggèrent que les champs étaient cultivés de manière intensive, continue et enrichis en fumier animal (Bogaard, 2004a). Une des difficultés majeures mises en avant dans ce débat serait l'absence, ou plus justement l'extrême difficulté à mettre en évidence des marqueurs archéologiques primaires, *in situ*, qui témoigneraient de l'usage du feu dans une visée agro-pastorale. En effet, le caractère ubiquiste des produits du feu dans les archives pédo-sédimentaires hors-sites, est un frein essentiel pour distinguer les événements anthropiques d'incendies naturels (Robin, Talon et Nelle, 2015 ; Scherjon et al., 2015).

¹ Nous entendons par là hors des sites d'occupation archéologique du type habitats, artisanaux ou cultuels.

Parallèlement, nous trouvons dans la littérature des mentions de résidus ou d'aires de combustion, associées à des horizons de sols anciens ou des comblements de dépressions naturelles (chablis), qui sont expliqués par les archéologues comme le fait de feux affectant les souches des arbres. Dans certains cas, ils témoigneraient d'entreprises de déforestation pour une mise en culture. Ces découvertes, surtout réalisées lors d'opérations préventives, n'ont jusqu'à ce jour fait l'objet que de peu d'attention. Constat qui peut étonner, compte tenu de la rareté des traces archéologiques éclairant de manière directe les pratiques agricoles anciennes, et d'autant plus vis-à-vis des éléments mentionnés précédemment.

D'autre part, la documentation historique sur les agricultures traditionnelles européennes, démontre que l'emploi du feu ne se cantonne pas à la technique de l'abattis-brûlis. Il en est un autre, qui possédait une certaine importance, au moins à l'époque moderne, qui n'est tout simplement jamais envisagée pour interpréter des « anomalies » des séquences pédo-sédimentaires hors-sites. Il s'agit de l'écobuage entendu au sens historique : technique de défrichement, ou plus précisément de préparation du champ, qui procède par une extraction en mottes ou en plaques de la couche superficielle du sol, qui sont ensuite brûlées selon un dispositif à feu couvert (Portères, 1972 ; Sigaut, 1975).

Nous chercherons dans ce mémoire, à mettre en lien ces différentes constatations, émises au sein de champs disciplinaires propres. La question générale qui nous anime dans ce travail est la suivante : ***peut-on mettre en évidence, à travers les marqueurs de feu préservés dans les archives pédologiques et sédimentaires, l'existence de pratiques agricoles ou pastorales ?***

La thèse que nous soutenons n'a pas été développée en suivant un cadre chrono-culturel fixe. Notre intérêt pour les problématiques relatives aux agricultures préhistoriques est manifeste, et c'est avec le souhait de pouvoir y apporter une contribution que nous avons avancé. Néanmoins, en débutant cette recherche, nous avons rapidement réalisé à quel point la compréhension de l'agriculture du seul point de vue des données et des modèles archéologiques préhistoriques nous restreignait. C'est dans la littérature traitant plus avant des techniques agricoles, donc principalement portée sur les périodes historiques récentes, que nous avons trouvé matière à raisonner. En particulier, la lecture de la thèse de François Sigaut portant sur « *L'agriculture et le feu. Rôle et place du feu dans les techniques de préparation du champ de l'ancienne agriculture européenne* » (1975) a été pour nous décisive, puisque c'est elle qui a inspiré notre recherche doctorale. Nous y avons découvert des pratiques d'agricultures singulières, du moins perçues telles que, car nous en ignorions alors tout. Nous n'avons donc pas la prétention d'avoir réalisé une analyse technologique totalement originale, puisque ce travail avait déjà été largement entamé. Nous en proposerons une synthèse, enrichie de travaux plus récents. Néanmoins, nous chercherons à en faire ressortir les implications que ces techniques agricoles peuvent avoir dans le champ de la géoarchéologie.

Dans le domaine géoarchéologique, la question de la distinction entre phénomènes naturels et anthropiques est souvent complexe. L'entremêlement de ces deux types de phénomènes dans la formation des séquences pédo-sédimentaires hors-sites est, à partir de la seconde moitié de l'Holocène, amplement établi (Petit, 2006 ; Poulenard, 2011 ; Gebhardt, Occhietti et Fechner, 2014 ; Castanet, 2022). Pour ce qui concerne les anciens sols cultivés, faire une telle distinction est une gageure (Boissinot, 2000). Les *paléosols cultivés* sont par définition même, des objets archéologiques à la

conjonction du naturel et de l'anthropique. D'autre part, il est aussi bien démontré que des processus naturels ou humains peuvent engendrer indépendamment la formation de faciès très similaires, dits « *convergents* », selon les angles et les échelles de caractérisation mises en œuvre (Rué, 2021). Dans le même ordre d'idée, nous avons déjà évoqué le caractère ubiquiste des produits du feu. Cependant, dans le cadre de la recherche et de l'analyse de pratiques agricoles liées au feu, tenter de faire cette distinction devient une problématique primordiale. Nous regarderons donc également les effets et les produits que peuvent engendrer les incendies de végétations naturels. Pour cela, nous pouvons nous appuyer sur une abondante bibliographie, documentant des feux de végétation actuels.

Dans une **première partie**, nous procéderons à une synthèse très générale sur la question des pratiques agro-pastorales qui caractérisent le Néolithique dans le domaine du Centre-Ouest de l'Europe. Nous aborderons rapidement les concepts sous-jacents à l'agriculture *sensu lato*, et son invention (techniques versus système économique). Les principaux modèles archéologiques d'agriculture et les données et arguments qui les soutiennent seront présentés. Puis, nous porterons notre attention sur quelques exemples de paléosols cultivés au Néolithique. Pour clôturer cette première partie, nous ferons un état des lieux très succinct sur les marqueurs de feu dans les séquences pédo-sédimentaires hors-sites et sur la question des *foyers d'essartages* et des *chablis brûlés*.

Dans une **deuxième partie**, nous définirons les principales notions relatives au champ et aux systèmes de culture. Quelques classifications et définitions des agricultures préindustrielles seront présentées, à travers lesquelles nous pourrions aborder des éléments constitutifs essentiels de leur mise en œuvre (culture permanente et temporaire, jachère, friche) pour aboutir à la question précise des emplois du feu, et de leurs chaînes opératoires. Nous présenterons leurs effets et leurs produits théoriques. Nous ferons de même pour les incendies de végétation naturels. Cela nous permettra d'échafauder les premières pistes de réflexion sur le potentiel de visibilité archéologique de ces pratiques, en particulier de l'abattis-brûlis et de l'écobuage.

La **troisième partie** sera consacrée aux méthodes d'analyses employées.

Puis, nous présenterons dans les **parties 4, 5, 6, 7 et 8**, des cas d'études de traces de feu, dont nous avons fait l'hypothèse qu'elles pourraient correspondre à des feux anthropiques liés à des pratiques agro-sylvo-pastorales. Ces démonstrations concernent des traces attribuées aux périodes du Moyen-Âge et du Néolithique. En regard de notre problématique, la chronologie des phénomènes étudiés, n'a pas été un critère de restriction dans notre choix de sites d'études. Nous avons préféré profiter des opportunités d'étude et des collaborations qui s'offraient à nous. S'il est probable que du point de vue anthropologique, l'interprétation de ces découvertes n'aura pas les mêmes implications pour des périodes chronologiques si éloignées, il n'en est pas de même vis-à-vis des archivages pédo-sédimentaires, de leur lecture, de leur analyse et de leur interprétation. Nous gageons que les unes éclaireront réciproquement les autres.

Enfin, dans une **neuvième partie**, nous présenterons un premier bilan du dépouillement de la littérature grise archéologique sur le sujet des *foyers d'essartage*. Quelques pistes de réflexion et perspectives vis-à-vis de nos découvertes seront proposées.

Partie 1 :

Les débuts de l'agriculture en Europe centrale :

Néolithique, modèles d'agriculture et témoins archéologiques

« L'agriculture prend naissance lorsque, au lieu de récolter les fruits, graines, racines, tubercules des plantes sauvages pour son alimentation, l'homme plante intentionnellement graine ou bouture et attend plusieurs mois avant de récolter. »

(Haudricourt, 1963)

« Seule, la vie sédentaire, directement ou indirectement, donne consistance à l'occupation du sol. Or l'agriculture est le seul régime qui ait à l'origine permis de cohabiter sur un point fixe et d'y concentrer le nécessaire pour l'existence. Toutefois n'est pas agriculteur celui qui, après avoir brûlé l'herbe, jette quelques poignées de grains et s'éloigne ; mais celui qui amasse et fait des réserves. »

(Vidal de La Blache, 1922)

1. La néolithisation en Europe centrale : prise de vue générale

L'apparition des **agricultures** (étym. : Fin XIII^e, du latin *agricultura* : « culture de la terre » ; TLFi) est considérée comme un bouleversement majeur à l'échelle de l'évolution des sociétés (Demoule, Garcia et Schnapp, 2018 ; Guilaine, 1991). En archéologie, cette invention a une valeur chronologique, puisqu'elle marque le passage entre la période du Mésolithique et celle du Néolithique. Elle correspond schématiquement à la transition entre des sociétés dont l'économie repose sur des activités d'exploitation des ressources naturelles (chasse, cueillette, collecte, pêche)² et possédant généralement un mode de vie nomade, à d'autres dont l'économie repose sur la production de ressources domestiquées (élevage, agriculture) et dont le mode de vie est sédentaire. C'est le modèle de la « *révolution néolithique* » (Childe, 1936).

En Europe occidentale, ce phénomène débute avec l'arrivée de nouvelles populations qui introduisent alors leurs propres animaux et végétaux domestiqués (Manen, 2018). Ces populations ont progressé depuis le Proche-Orient et se sont scindées en deux principaux courants de colonisation (Figure 1). Ces groupes se développent sur l'espace géographique de la France à partir de 5800-5600 cal. BC en méditerranée et dans le midi (groupes de la culture dite *Cardiale*), et, entre 5500-5200 cal. BC dans le Bassin parisien et ses marges (Illett, 2010 ; Sénépart, 2010 ; Manen, 2018 ; Manen et Guilaine, 2021 ; Bostyn, 2019). Les groupes humains de ce second courant de migration, dénommé *danubien* (groupes de la culture dite *Rubannée* ou LBK pour *Linearbandkeramik*), arrivent de la région des Balkans (vers 6000 cal. BC), en ayant progressé à travers un environnement initialement largement forestier (Birks, 2005 ; Mitchell, 2005 ; Samojlik et Kuijper, 2013).

Les territoires où ils s'installent sont alors déjà occupés par des groupes de chasseurs-cueilleurs-collecteurs, qui vont progressivement disparaître ou s'intégrer à ces groupes de nouveaux occupants. La nature des interactions entre ces sociétés porteuses de cultures matérielles et idéelles bien différentes est néanmoins encore très mal connue. D'autre part, l'expansion de ces populations néolithiques ne procéda ni de manière homogène, ni à un rythme régulier (Bostyn, 2019 ; Guilaine, 2001). Certains auteurs ont pour cette raison proposé que ces interactions aient pu s'exprimer à travers des conflits ou tout du moins des formes de résistance culturelle (Vigne et al., 2005 ; Mauvilly et Denaire, 2015 ; Perrin, 2018). Ceci n'excluant pas que des transferts techniques entre groupes néolithiques et mésolithiques aient eu lieu (Cauwe, 2001 ; Marchand, 2010 ; Ghesquière et Marchand, 2010, p. 89-95). Pour certains archéologues, les interactions entre les chasseurs-cueilleurs et les éleveurs-agriculteurs sont largement régies par la compétition, du fait de l'incompatibilité inhérente entre leurs modes de vie (compétition territoriale, dans les ressources alimentaires et matériaux, incompatibilité du calendrier d'activités, etc. ; en particulier : Zvelebil et Rowley-Conwy, 1984).

² Souvent dénommées improprement comme une *économie de prédation* (Testart, 2012, p. 339-340).

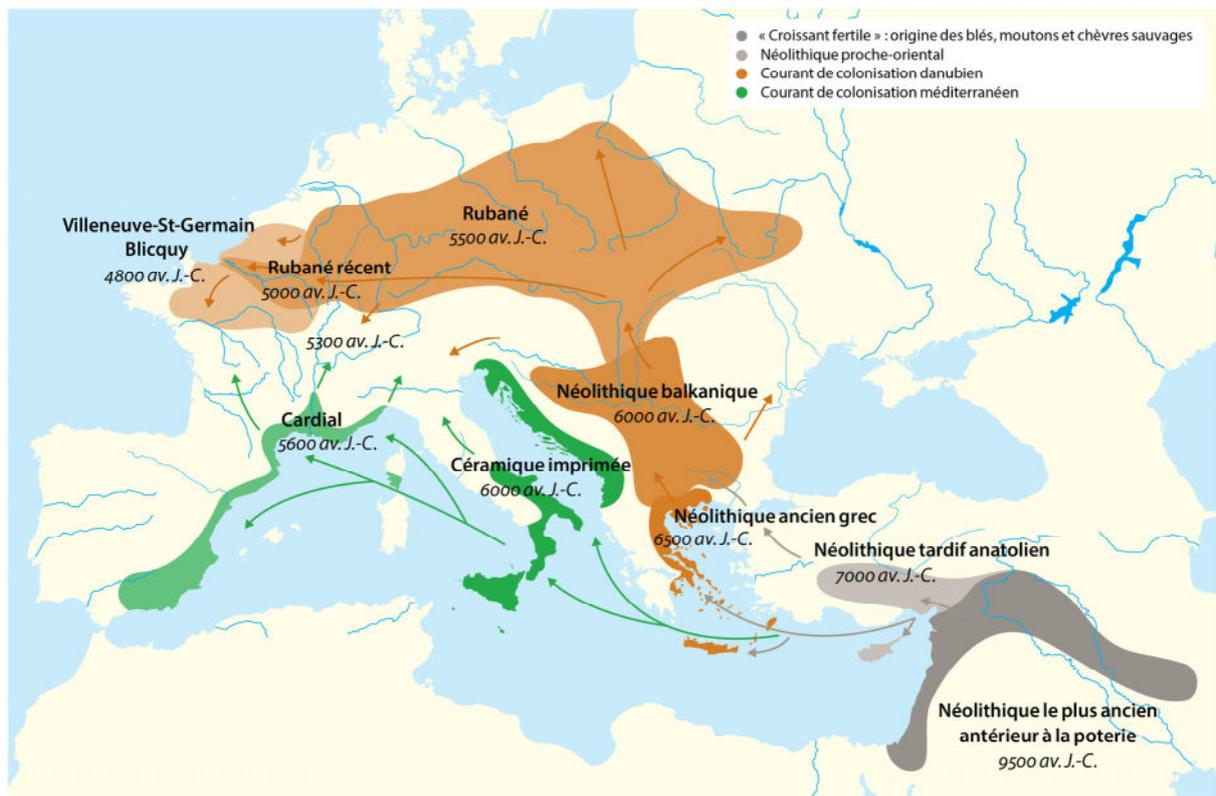


Figure 1 : Cartographie synthétique de la colonisation néolithique en Europe (modifié d'après Bostyn, 2007).

Avec l'agriculture et l'élevage, il est souvent considéré que les sociétés humaines auraient franchi un « seuil » en termes d'interactions avec leurs environnements, en laissant une empreinte de plus en plus forte sur ces derniers. Mais aussi, dans un autre registre, à travers une césure idéale dans la hiérarchisation des êtres vivants, où *Homo sapiens* se perçoit à partir de ce moment dans une position de supériorité au monde qui l'entoure, pensée qui aurait été indispensable à la domestication animale généralisée (Cauvin, 2000 ; Vigne, 2011). Les bouleversements du néolithique sont tels que certains auteurs veulent y voir les prémices de l'Anthropocène (Ruddiman, 2017). Toutefois, cette description extrêmement brève que nous proposons est évidemment très simplificatrice. Sans ôter de sa pertinence dans un cadre d'analyse des sociétés humaines *sur le temps long* – puisque cette révolution s'étale sur plusieurs millénaires – elle masque des réalités plus complexes. En effet, si l'on affine l'échelle d'analyse, il apparaît d'un côté que les premières occupations néolithiques ne sont pas toujours corrélées à des modifications environnementales remarquables, ou qu'elles sont limitées à la périphérie des sites d'occupation (pour ce qui en est perceptible via les proxy archéo-environnementaux ; p. ex. Salavert, 2008 ; Kreuz et al., 2005 ; Leroyer, 2006), et de l'autre, que des indices d'emprises agro-pastorales fugaces, ou plus prudemment des *indices polliniques d'anthropisation* (IPA) sont mis en évidence plusieurs siècles avant les débuts de la néolithisation (Richard, 2004). La Figure 2 présente une chronologie de la transition du Mésolithique au Néolithique en Europe centrale, proposée par Christian Jeunesse (2003), qui intègre ces précédents résultats.

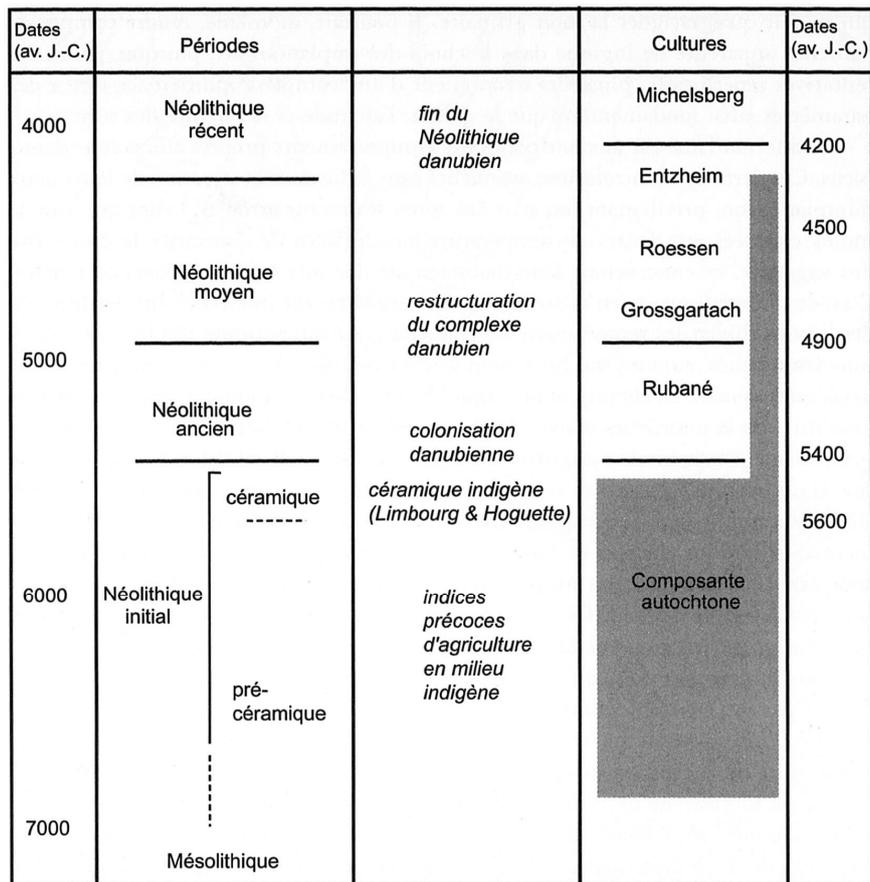


Figure 2 : Chronologie de la néolithisation en Europe centrale d'après C. Jeunesse (2003).

2. Le Néolithique : entre *techniques de cultures* et *économie agraire*

Le modèle de la « *révolution néolithique* », bien qu'il soit aujourd'hui plus ou moins nuancé – c'est pourquoi on lit plus souvent le terme *néolithisation*, qui met l'accent sur l'aspect processuel, transitoire – reste malgré tout très fortement ancré dans la conceptualisation de cette période (Demoule, 2007). Ceci nous paraît questionnable vis-à-vis des données de l'archéologie, du fait qu'il s'agit, comme son auteur l'a explicitement présenté, d'un modèle économique, et non d'un modèle technique (Childe, 1936). Cette révolution, c'est l'introduction et la prédominance d'une économie basée sur la production des denrées alimentaires (« *a food-producing economy* »). Or, la pratique de l'agriculture n'implique pas systématiquement l'existence d'un système d'économie agricole. Les exemples ethnographiques de peuples chasseurs-cueilleurs qui sont dits « petits cultivateurs » l'illustrent bien (Testart, 1982 ; Arcand, 1988 ; Rossi, 1999). De plus, du point de vue technologique, il est assez clair que les techniques de base de l'agriculture (semencier, planter, creuser, etc.) « *ne sont pas en dehors des connaissances ordinaires des chasseurs-cueilleurs* » (Testart, 2012, p. 330 ; voir aussi : Smith, 2001 ; Denham, 2020). Si cela semble évident pour certains, il est important d'en discuter, car nous observons un amalgame récurrent et

surtout souvent implicite de ces deux éléments. Alain Testart (2012, p. 329 et Tableau 1) a résumé intelligiblement cette question³ :

« La notion de « culture » (agri-, horti-, arbori-, riziculture) ne pose, en principe, pas de problème si ce n'est celui de la définition de la domestication, mais il est clair que c'est une technique (ou un ensemble de techniques), technique d'acquisition en rapport avec des plantes domestiquées. La première tâche d'une approche sociologique est de distinguer entre technique et économie, et tout le monde s'entend sur ce qu'il convient d'appeler une « économie agricole » : c'est une économie pour laquelle l'agriculture satisfait à l'essentiel des besoins et, comme le besoin alimentaire est le plus important des besoins dans les sociétés préindustrielles, une économie agricole se trouve être – tant pour l'ethnologie classique que pour la préhistoire – une économie où l'agriculture fournit l'essentiel de la nourriture. On en juge ordinairement en estimant la part (en pourcentage) des produits agricoles par rapport à ceux de la chasse, de la cueillette, de la pêche, etc., dans l'alimentation d'une société. »

Tableau 1 : Concordance et discordance entre les critères biologiques et les états économiques relatifs à « l'agriculture » d'après Testart (2012).

Agriculture (sens économique)	–	+
Domestication (sens biologique)	–	+
–	Chasse-cueillette	Agriculture prédomestique (agriculteurs sans transformation des espèces cultivées)
+	Domestication préagricole (chasseurs-cueilleurs purs ou petits cultivateurs)	Agriculture pleinement développée

³ Le problème de la notion de domestication dont fait mention A. Testart, est que d'un point de vue anthropologique, elle ne peut être résumée selon des critères biologiques seuls, c'est-à-dire d'une espèce animale ou végétale dont le profil génétique et la morphologie ont été modifiés depuis un ancêtre sauvage par l'action humaine (Stépanoff et Vigne, 2018 ; Vigne, 2015 ; Testart, 2012). Prenons quelques exemples qui nous semblent pertinent par rapport à nos problématiques. Le premier est celui de la mise en évidence d'une exploitation architecturale et alimentaire exceptionnelle de céréales sauvages en Syrie vers 9500-9000 cal. BC, soit près d'un millénaire avant leur domestication (Willcox et Stordeur, 2012). Au vu de leur récurrence et de leurs proportions, ces auteurs ont proposé que ces plantes sauvages auraient été cultivées (« pre-domestic cultivation » ; voir le Tableau 1). Le second, plus proche de notre territoire d'étude, est la découverte dans plusieurs sites du Rubané en Allemagne (et ailleurs ?), de fosses comblées parfois presque exclusivement d'une plante sauvage comestible à caractère adventice, *Chenopodium album* L., qui suggère qu'elles ne sont pas seulement le fait d'une récolte intentionnelle, mais bien d'un traitement propre, et de façon plausible, de semences spécifiques (Stokes et Rowley-Conwy, 2002 ; Bogaard, 2002a ; Kreuz, 2007 ; Bogaard, Ater et Hodgson, 2018). On pourrait aussi mentionner le cas du navet (*Brassica rapa*) ou de la navette (*B. rapa* var. *rapa*), tubercules qui peuvent être cultivés aussi pour leurs feuilles ou l'huile de leurs graines, ces dernières sont attestées dans plusieurs sites lacustres alpins du Néolithique récent (Zohary, Hopf et Weiss, 2018), mais aussi sous la forme de grains d'amidons préservés sur des meules de la culture BVSG (Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain) ce qui confirme que *B. rapa* était une plante indigène (adventice ?) et aurait donc pu être cultivée à partir de variétés sauvage, bien avant que d'autres d'Asie Centrale se diffusent (Cagnato et al., 2023). Ceci questionne le fait que les agricultures pré-domestiques soient limitées aux régions « berceaux » de l'agriculture.

On voit rapidement le problème que pose l'application de ce « simple » pourcentage à l'archéologie. Évidemment, on peut évaluer la part relative de certaines catégories, par exemple celle de la chasse face à l'élevage, en confrontant le nombre d'individus minimums animaux des deux catégories (ce qui présuppose que l'enregistrement archéologique est relativement indépendant des chaînes opératoires propres à chaque catégorie, présupposé qui est déjà largement discutable). Mais cela ne dit pas leur importance par rapport à celle de l'agriculture, et encore moins vis-à-vis de l'ensemble des produits végétaux ayant pu être exploités (mais dont seule une partie est préservée jusqu'à nous). De plus, il faut considérer les biais propres à chaque discipline, qui influencent de façon différente les restitutions archéo-environnementales. Les biais de préservation différentielle entre différents artefacts et écofacts, de distinction entre espèces domestiques et sauvages, ou encore relatifs aux seules chaînes opératoires propres à chaque catégorie de vestiges, doivent amener à une grande prudence, d'autant plus pour les périodes anciennes (voir p. ex. : Tresset et al., 2009 ; Bouby, 2000 ; Horard-Herbin, Lefèvre et Vigne, 2005). D'autre part, il faut bien dire que les nouvelles méthodes d'analyses géochimiques appliquées aux matériaux archéo-biologiques, qui permettent d'approcher au plus près la diète d'un individu – aussi indispensables soient-elles – ne résolvent pas aisément ces difficultés (ou du moins pas encore ? voir p. ex. Gaveriaux et al., 2022).

Par conséquent, pour des sites néolithiques où les analyses multidisciplinaires mettent en évidence une pluralité de milieux et de ressources exploitées, ou pour d'autres dont les matériaux botaniques et zoologiques ne sont pas conservés, quels éléments nous permettent d'assurer que l'on se trouve face à des groupes dont l'économie était majoritairement agricole ? Ces questions ont déjà été soulevées par des chercheurs de différents horizons, pourtant, elles ne semblent pas tellement prises en compte dans les modèles des archéologues « culturalistes » (Testart, 2003, 2012 ; Rossi, 1999 ; Beeching et al., 2000 ; Borrello, 2015 ; Perrin, 2018). Nous n'avons pas la prétention d'apporter une réponse à une question aussi complexe, quoique essentielle, dans le présent travail. Par contre, nous prendrons ces constatations comme une invitation à nous recentrer sur l'étude de l'agriculture du point de vue technique. Et ceci nous conduit (entre autres) à nous poser cette question : si l'on sait que les groupes néolithiques ayant colonisé l'Europe ont importé leurs semences et leurs animaux domestiques, qu'en est-il des techniques agricoles ? Si l'on considère qu'elles sont, sinon dépendantes, largement contraintes par les spécificités des milieux naturels où on les applique (type de sol, de végétation potentielle, d'humidité, etc.), il est pertinent de se questionner pour ces périodes anciennes, où les environnements étaient en bien des aspects nettement différents de ceux que l'on connaît aujourd'hui, et non moins fluctuants (au regard de la résolution chronologique générale des archives paléoenvironnementales et géoarchéologiques).

Une autre question encore fait jour, plus générale, celle de définir les limites de ces sociétés « *pleinement agricoles* », et tout particulièrement de les distinguer des sociétés de *chasseurs-cueilleurs sédentaires* décrites comme celles de « *petits cultivateurs* ». Dans *Avant l'histoire*, Alain Testart ne se risque pas vraiment sur ce terrain, puisqu'il fait la démonstration que le développement du stockage est un facteur de l'évolution sociale nettement plus important et discriminant que la pratique de l'agriculture. Il mentionne les cas des chasseurs-cueilleurs « *petits cultivateurs* » nomades, qui selon lui, n'obtiendraient pas plus de 20 % de leur subsistance via l'agriculture.

Nous avons repris les données de l'*Ethnographic Atlas* de George Peter Murdock, qui recense notamment les estimations qualitatives de l'économie alimentaire de près de 1300 sociétés différentes réparties sur tout le globe (Murdock et al., 1999 ; Kirby et al., 2016). Elles montrent que l'on trouve des sociétés nomades ou semi-nomades avec une alimentation agricole qui peut être élevée (Tableau 2 et Figure 3). Pour les sociétés sédentaires, la distribution de l'apport de l'agriculture à la subsistance est majoritairement comprise entre 40 et 80 %, avec comme valeur dominante 60 %. Cela pourrait-il être un seuil qualitatif pertinent pour définir une économie comme agricole ? Ces valeurs laissent toutefois une marge non négligeable d'approvisionnement dans d'autres ressources. De plus, les données montrent que pour les groupes sédentaires, les stratégies de subsistance complémentaires à l'agriculture ne sont pas à chercher seulement ni systématiquement, du côté de l'élevage (voir la part à 6-15 % ou plus, de chasse, pêche et collecte⁴ chez les sédentaires).

Tableau 2 : Part de l'origine de la subsistance alimentaire chez les sociétés nomades et semi-nomades (n = 381) et sédentaires (n = 806), d'après les données de l'Ethnographic Atlas (Murdock et al., 1999 ; Kirby et al., 2016).

Les couleurs des cases correspondent aux fréquences de distribution pour chaque catégorie de mobilité (> 0,2 en gris sombre et > 0,05 en gris clair)

	Chasse		Pêche		Collecte		Agriculture		Élevage	
	Nom.	Séd.	Nom.	Séd.	Nom.	Séd.	Nom.	Séd.	Nom.	Séd.
0-5%	40	319	122	296	86	552	228	26	274	138
6-15%	62	349	63	239	71	186	42	4	16	287
16-25%	51	107	59	134	67	44	23	7	7	198
26-35%	111	25	41	59	49	13	25	11	8	126
36-45%	60	5	38	35	36	10	20	64	12	40
46-55%	26	1	35	25	33		22	170	18	15
56-65%	12		15	11	30	1	13	265	9	1
66-75%	6		4	3	6		5	177	11	
76-85%	10		4	3	3		2	64	14	1
86-100%	3			1			1	18	12	

Mais surtout, il ne faudrait pas non plus négliger a priori les exemples d'économies de subsistance qui seraient moins représentés (pour de quelconques raisons géo-historiques ou simplement liées au recrutement même de cette base de données). Nous pensons en particulier aux groupes caractérisés par une exploitation des ressources « à large spectre » (ou autrement dit, diversifiée), agriculture incluse (Smith, 2001 ; Jeunesse, 2003 ; Ghesquière et Marchand, 2010 ; Testart, 2012 ; Kubiak-Martens et al., 2022). Plusieurs travaux archéologiques récents mettent d'ailleurs en évidence tout un pan de l'économie de subsistance végétale jusque-là négligé : consommation de racines et tubercules ou encore de plantes aquatiques, qui pourraient confirmer l'importance de telles économies, dès le Mésolithique (Kubiak-Martens, 2002 ; Bishop, Kubiak-Martens, et al., 2022 ; Cagnato et al., 2023).

⁴ On notera que la collecte inclut celle des plantes sauvages, mais aussi de la petite faune terrestre.

D'autre part, la forte variabilité potentielle des modes de subsistance ne plaide clairement pas en faveur du modèle soutenant une opposition *intrinsèque* entre les modes de vie chasseurs-cueilleurs et éleveurs-agriculteurs. Il conviendrait évidemment de vérifier au cas par cas les exemples recensés dans cette base de données, ce qui dépasse largement le cadre de notre recherche. En tous cas, il nous paraît tout à fait justifié de rester prudent face à cette séduisante, mais « *trop restrictive dichotomie* » (Perrin, 2018) tant vis-à-vis de la diversité des modèles socio-économique illustrée par les exemples ethno-historiques, mais aussi par les exemples archéologiques eux-mêmes (Testart, 2003, 2012 ; Sigaut, 2010 ; Beeching et al., 2000 ; Jeunesse, 2003). Il nous semble donc qu'il reste encore un travail de définition précis à faire (du moins à notre connaissance) autour de la notion (d'ailleurs trop souvent implicite) de *sociétés pleinement agricoles*. Car si les sociétés *paysannes* historiques en sont l'essence même (telles que définies par Mendras, 1976 : autrement dit des sociétés où une part essentielle de la production agricole est réalisée pour un marché englobant), il nous paraît loin d'être évident que les sociétés des *premiers cultivateurs néolithiques* (et sans aucun doute d'autres sociétés plus récentes encore), puissent être véritablement considérées comme telles. De plus, il conviendrait aussi de porter un peu plus d'attention aux projections que nous faisons de nos propres sociétés, pour celles-là si lointaines, projections tellement intégrées qu'elles ne sont presque plus discutées : celles de confondre totalement l'agriculture avec l'alimentation (c'est une fois de plus amalgamer agriculture au sens technique et au sens économique), et tout particulièrement, avec la céréaliculture (Sigaut, 2010).

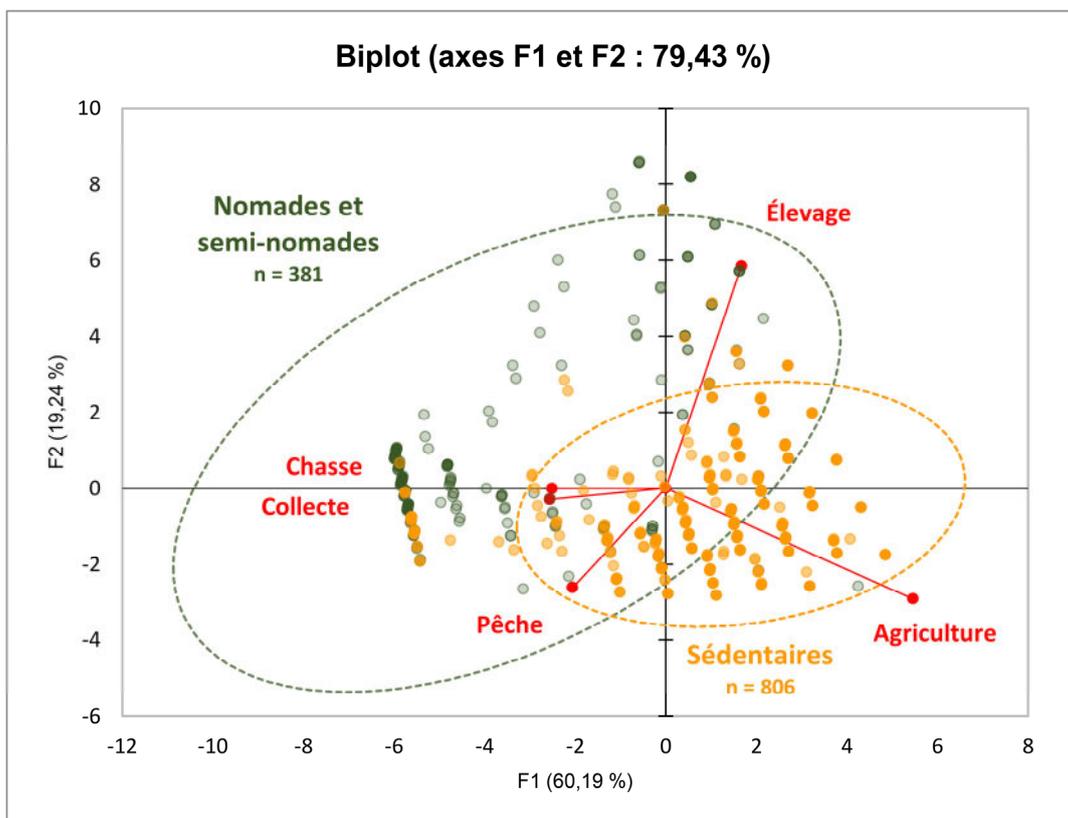


Figure 3 : Analyse multivariée sur les proportions relatives des sources de subsistance alimentaire de sociétés sédentaires et nomades/semi-nomades (données de l’Ethnographic Atlas ; Murdock et al., 1999 ; Kirby et al., 2016). Analyse en Composantes Principales (ACP) avec matrice de covariance (échelles des variables identiques). Avec ellipses statistiques aux intervalles de confiance à la probabilité 2σ (95,4 %). L’opacité des points traduit relativement la superposition d’un nombre croissant d’individus.

Le Néolithique européen, plutôt que comme une révolution, pourrait être défini comme la période de transition entre l'apparition des premières cultures de végétaux domestiqués et le développement de sociétés dont l'économie repose majoritairement sur l'agriculture et l'élevage. Définition qui constituerait une base de réflexion plus prudente, en considération des différents questionnements et incertitudes que nous venons d'évoquer. Regardons maintenant plus précisément ce que l'on sait de l'agriculture pour cette période ancienne.

3. Agricultures néolithiques en domaine tempéré : modèles et données

3.1. Les principaux modèles archéologiques

Comment donc, dans le domaine climatique tempéré de l'Europe centrale et occidentale, auraient été cultivés les champs au Néolithique ? Plusieurs modèles ont été discutés, mais depuis au moins une vingtaine d'années, le débat s'est progressivement focalisé sur deux d'entre eux, qui sont de plus presque systématiquement opposés (p. ex. : Jacomet et al., 2016 ; Rösch et al., 2017). Le premier, vraisemblablement séculaire⁵, est celui d'une agriculture dite itinérante, c'est-à-dire que les champs sont cultivés de manière temporaire, quelques années, avant d'être laissés à l'abandon. L'ouverture du terrain étant généralement réalisée en milieu forestier, par l'intermédiaire du feu (Childe, 1929 ; Iversen, 1941 ; Montelius, 1953 ; Steensberg, 1957 ; Conklin, 1961). Ce modèle correspond peu ou prou à la définition effective du système agricole de l'*abattis-brûlis* ou *essartage à feu courant* dont nous reparlerons, et que nous emploierons comme synonymes (Sigaut, 1975, 1979 ; Mazoyer et Roudart, 1997). Dans la littérature anglophone, il est dénommé « *shifting cultivation* » ou « *slash-and-burn* ».

Le second modèle, qui se serait développé dans les années 1970 en contradiction avec le premier (d'après Whittle, 1996 ; voir la littérature allemande mentionnée par Bogaard, 2004a, p. 22), propose l'existence d'une agriculture plus « intensive » ou « permanente ». Dans celui-ci, des champs de petite surface, à proximité des habitats, sont cultivés de façon permanente, avec un investissement laborieux pour leur entretien, en particulier par le travail du sol, le désherbage et la fertilisation avec fumier animal⁶. Les auteurs anglophones font référence à ce système sous diverses expressions comme « *permanently cultivated plots* » ou « *intensive garden cultivation* », « *fixed-plot horticulture* » (Milisauskas, 2001 ; Bogaard, 2002b ; Baum et al., 2016 ; Jacomet et al., 2016). Ainsi, dans la littérature française, il est parfois fait référence à ce modèle sous les termes de *jardinage* ou *horticulture* (Manen, 2018). Ces dénominations nous paraissent toutefois peu appropriées, car elles entretiennent quelques confusions qui méritent d'être évoquées. En effet, selon les modèles agronomiques « classiques », l'*hortus*, qui renvoie aux jardins, vignes et vergers, est un lieu tout à fait distinct de l'*ager*, c'est-à-dire les champs dédiés à la culture des céréales (Mazoyer et Roudart, 1997 ; Michon, 2000 ; Naudin, 1860).

⁵ L'idée apparaîtrait au milieu du XVIII^{ème} siècle dans les écrits d'un chimiste agricole finlandais (P. A. Gadd) d'après Axel Steensberg (1957).

⁶ « *Intensive garden cultivation is characterized by high inputs of human labour per unit area through practices such as dibbling or row-sowing, hand-weeding or hoeing of crops, manuring and watering, and involves close integration of crop and animal husbandry* » (Bogaard, 2004a, p. 41)

Différentes définitions de l'horticulture peuvent être données selon le point de vue adopté (économique, botanique, technique, etc.), mais pour l'essentiel, elle correspond à la culture de plusieurs (et souvent nombreuses) espèces au sein d'une même parcelle⁷, à vocation alimentaire, mais aussi culinaire, médicale ou d'agrément, et avec *un traitement individualisé des plants* (Sigaut, 1982a). Pour Amy Bogaard, qui rejette d'ailleurs vigoureusement l'hypothèse de l'abattis-brûlis (2004a, p. 154), l'emploi du terme *jardin* (« *garden* ») vise à refléter l'intensité en main-d'œuvre de cette forme de culture, avec une attention presque individuelle aux plantes cultivées⁸. Mais c'est pourtant bien à l'agriculture céréalière (blé, orge, amidonnier, engrain) que l'auteure se réfère, dont le propre est justement d'être caractérisée par un traitement « en masse », et non individualisé, des plants. Considérant que ces cultures constituent la part largement majoritaire de la diète, A. Bogaard estime à environ 1 ha la surface cultivée pour un groupe de 5 personnes, ce qui est déjà largement supérieur aux surfaces de jardin indiqué dans les textes modernes (< 0,5 ha). Pourquoi alors ne pas simplement parler de champs ? D'autre part, et cela devient plus problématique, c'est que le terme horticulture est aussi employé en référence à une pratique des régions intertropicales en milieu forestier, où des essences très diverses sont cultivées ensemble, et l'ouverture de la parcelle est en général opérée... par un brûlis (Marecek, 1976 ; Gely, 1984 ; Grenand, 1996 ; Dounias et al., 2000 ; Arroyo-Kalin, 2012). Il s'agit en fait d'une des variantes de l'abattis-brûlis qui est notamment bien documentée en Guyane (Figure 4). Si l'on ajoute à cela le fait que le modèle des abattis-brûlis néolithiques européens a été en partie justifié par la documentation de ce dernier système, chez des groupes de chasseurs-cueilleurs subactuels, on ne peut pas dire que le choix de parler de jardinage pour la culture céréalière néolithique soit très judicieux. À notre avis, il ne fait que prolonger la confusion autour de l'abattis-brûlis, constat qui a pourtant déjà été maintes fois souligné (Barrau, 1972, 1996 ; Portères, 1972 ; Sigaut, 1975 ; Ribet, 2009). Fermons cette parenthèse terminologique.

Un troisième modèle d'agriculture néolithique doit être mentionné : celui relatif aux plaines alluviales et aux bordures lacustres, où les terrains les plus humides, marécageux, autant que les basses terrasses, considérés comme très fertiles, auraient pu être cultivés sous forme de petites parcelles, sans nécessiter d'importants investissements en force et temps de travail (Sherratt, 1980 ; Kruk, Howell et Starling, 1980). Ce modèle a été initialement proposé pour expliquer la localisation récurrente des habitats néolithiques de certaines régions, dans ou à faible proximité de ces vallées (Kruk, Howell et Starling, 1980 ; Kruk, 1973, in Bogaard, 2004, p. 34-37 ; Milisauskas, 2001). Le renouvellement de la fertilité de ces terrains par leur alluvionnement régulier est mis en avant, mais les dynamiques hydro-sédimentaires de ces secteurs, aux périodes concernées, ne sont en réalité pas clairement définies (Milisauskas, 2011). Le terme d'horticulture a d'ailleurs aussi été employé pour désigner ce modèle, mais en expliquant que ces terrains auraient servi à la culture de légumes, racines, etc. Quant aux cultures céréalières, il a été tour à tour proposé qu'elles eussent été sur des terrains plus élevés ou également dans ces zones humides, mais sur de petites parcelles distinctes (ibid.). De plus, les tenants de ce modèle n'excluent pas que l'abattis-brûlis eût été parallèlement employé, hors des secteurs

⁷ Qui diffère de la polyculture, consistant à diversifier les produits cultivés, mais à l'échelle d'une exploitation agricole.

⁸ « *Use of the term 'garden' in conjunction with staple crops such as cereals may be jarring for readers accustomed to Western gardens of flowers, vegetables and fruit (Leach 1997), but the term is intended to convey the intensity of this form of husbandry, with almost individual attention to crop plants and consequently a limited scale of production* » (Bogaard, 2004a, p. 41)

humides, par les mêmes groupes (Kruk, Howell et Starling, 1980, p. 57). Au contraire même, une complémentarité entre les deux types d'agriculture a été proposée. Ce modèle est soutenu par les résultats carpologiques de certains sites où dominent nettement des adventices de printemps, qui correspondrait à la période effective de semis, visant à éviter les inondations hivernales et du début du printemps (Gluza, 1984 ; in Bogaard, 2004a). Néanmoins, les analyses polliniques des séquences sédimentaires à proximité de sites d'occupation ne paraissent pas toujours confirmer cette hypothèse (Bogaard, 2004a ; Godłowska et al., 1987). Pour le Néolithique d'Europe centrale et en France septentrionale, ce modèle ne semble plus vraiment privilégié, au contraire du courant méditerranéen (Guillon et al., 2009 ; Martín et al., 2010).



Figure 4 : Photographie d'un champ en polyculture « ouvert » par brûlis (crédit : Bahuchet et Betsch, 2012). « Champs traditionnels amérindiens wayāpi. L'hétérogénéité culturelle sciemment recherchée (manioc, igname, patate douce, maïs, canne à sucre, palmier), Trois Sauts, abattis de R.Y. » <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.768>

3.2. Des données et des arguments éclectiques

Revenons à nos deux modèles principaux d'agriculture, *abattis-brûlis* et *champs permanents*. Sur quels arguments archéologiques et paléo-environnementaux s'appuient-ils ? Ceux-ci sont multiples et il n'est pas notre objectif d'en faire une recension exhaustive, mais on retiendra qu'une part s'appuie sur des données archéo-environnementales matérielles (qu'il convient évidemment d'interpréter), alors qu'une autre part est plutôt du ressort des spéculations. Les données qui sont les plus abondantes et qui d'ailleurs sont celles qui « cristallisent » les oppositions sont celles de l'étude des restes botaniques provenant des sites d'occupations (Maier, 1999 ; Bogaard, 2002b, 2004a ; Kreuz et al., 2005 ; Kreuz et Schäfer, 2011 ; Antolín, Jacomet et Buxó, 2015 ; Jacomet et al., 2016). Le principal argument apporté en faveur de l'hypothèse des champs permanents est l'absence ou la représentation minoritaire d'espèces adventices pérennes ou typiques des milieux boisés (Maier, 1999 ; Bogaard, 2002a ; Styring

et al., 2016). À ce résultat, il est opposé sur la base de travaux expérimentaux d'abattis-brûlis, que par le brûlage de la surface du sol avant le semis, la croissance des adventices sera très fortement limitée au cours de la première année de culture, voire même que la récolte peut-être quasiment pure (Rösch et al., 2002, 2017 ; Schier et al., 2013 ; Ehrmann et al., 2014 ; Kreuz et al., 2014). Mais cette rareté pourrait aussi être imputée à la seule chaîne opératoire des récoltes avant qu'elles n'arrivent sur le site (battage, vannage, etc. ; Pétrequin et Pétrequin, 2021 ; Rösch et al., 2017 ; Jacomet, 2007). Il est ainsi envisagé que certaines espèces rudérales (qui ne sont pas que des adventices de cultures) des assemblages botaniques pourraient n'avoir aucun rapport direct avec les récoltes (p. ex. apports pour la confection de litières ; Pétrequin et al., 1998 ; Pétrequin, Pétrequin et Schaal, 2016). De plus, les traitements classificatoires relatifs à l'écologie des adventices des assemblages carpologiques indiquent des cultures en majorité semées à l'automne, ce qui réfuterait l'hypothèse des cultures de décrue dans les plaines alluviales (semis au printemps ; Bogaard, 2004a, p. 96-114). D'autre part, des analyses isotopiques de l'azote ($\delta^{15}\text{N}$) réalisées sur des grains d'espèces cultivées montrent pour certains d'entre eux, des valeurs élevées qui sont interprétées comme la conséquence d'une croissance sur des sols très riches, qui seraient donc amendés (Bogaard et al., 2007, 2013 ; Fraser et al., 2011 ; Kanstrup et al., 2011 ; Styring et al., 2016 ; voir aussi en Écosse : Bishop, Gröcke, et al., 2022). Mais des résultats de tendance similaire sont parfois enregistrés sur la végétation se développant après des incendies naturels (Grogan, Bruns et Chapin, 2000 ; Herman et Rundel, 1989 ; Huber, Bell et Adams, 2013 ; et la synthèse de Szpak, 2014). Il n'y a pas encore eu, à notre connaissance, d'analyses faites pour l'abattis-brûlis, mais il est étonnant que ces résultats ne soient pas discutés par les tenants de la thèse des champs permanents amendés, dont la détermination à réfuter les agricultures sur brûlis est quelquefois flagrante.

L'autre source majeure de données employées dans cette discussion est celle des analyses palynologiques et des micro-charbons des séquences sédimentaires « hors-sites ». Succinctement, la convergence de plusieurs éléments permet de proposer l'existence d'emprises agricoles en forêt via l'usage du feu : une réduction des taxons forestiers dominants (parfois abrupte), avec en parallèle une augmentation des herbacés, l'apparition des espèces cultivées et des marqueurs d'anthropisation (dont certains micro-fossiles non polliniques) ainsi qu'un influx accru de particules carbonisées, suivi enfin du développement des taxons ligneux pionniers, héliophiles (Iversen, 1956 ; Galop, Vannière et Lopez-Saez, 2003 ; Galop, 2005). Didier Galop *et al.* (2003) ont présenté un exemple très clair d'épisode d'abattis-brûlis, enregistré dans une séquence tourbeuse dans le piémont pyrénéen (Cuguron) et daté vers 3000 cal. BC. Il est associé à un niveau charbonneux dans les sédiments, qui indique la proximité de l'évènement, et explique qu'il soit aussi nettement perceptible dans la séquence pollinique. Cet évènement pose en miroir la question des modalités de reconnaissance d'évènements comparables, dans d'autres situations⁹, question qui n'est pas indépendante des protocoles mêmes de la palynologie (p. ex. la résolution de l'échantillonnage en regard de leur vitesse d'accumulation ; Richard et Ruffaldi, 2004 ; Dietre et al., 2016 ; Halstead, 2018). L'interprétation des diagrammes est en réalité souvent complexe, et ne permet pas toujours de distinguer des modifications du couvert végétal liées à des évènements

⁹ Par exemple comment percevoir l'ouverture de petites clairières ponctuelles au sein d'un milieu largement forestier ? à quelle distance des zones réceptacles polliniques et à partir de quelle ampleur sont-elles susceptibles de modifier notablement la pluie pollinique ? Quid d'une généralisation des pratiques d'abattis-brûlis à grande échelle spatiale et temporelle ? Etc. (voir les références bibliographiques de ce paragraphe)

naturels, d'autres, anthropiques (Richard, 1999 ; Vannière, 2001 ; Rius, Vannière et Galop, 2009). Au Néolithique, les modifications de l'environnement végétal peuvent ne se manifester que par le développement d'essences forestières secondaires (p. ex. noisetier, bouleau, aulne) au dépend des dryades (p. ex. hêtre, sapin) sans réelle ouverture du milieu (Lechterbeck et Rösch, 2021).

Très schématiquement, nous observons donc d'un côté, des indices polliniques qui semblent refléter des événements (ou du moins d'épisodes relativement courts), de l'autre, des phénomènes d'évolution des environnements à plus long terme (Figure 5). Sur la base de ces différents types d'indices, bon nombre de chercheurs ont proposé, çà et là, l'existence de cultures sur brûlis au Néolithique, et même parfois, plus précocement (outre la littérature précédente : Robinson, 1983 ; Clark, Merkt et Muller, 1989 ; Argant, 2004 ; Miras et al., 2004 ; Richard, 2004 ; Tinner et Lotter, 2006 ; Tinner, Nielsen et Lotter, 2007 ; Rösch et al., 2014, 2017 ; Gilck et Poschlod, 2021 ; Lechterbeck et Rösch, 2021). A contrario, pour certains auteurs, le feu aurait pu être principalement employé dans un objectif pastoral plutôt que pour l'agriculture (Jacomet et al., 2016). En outre, le principal problème vis-à-vis de l'interprétation du développement parfois flagrant de la végétation forestière secondaire est que d'autres pratiques que l'abattis-brûlis pourraient théoriquement en être responsables (Haas, Karg et Rasmussen, 1996 ; Halstead, 1998 ; Rasmussen, 1989, 1990 ; Kalis, Merkt et Wunderlich, 2003).

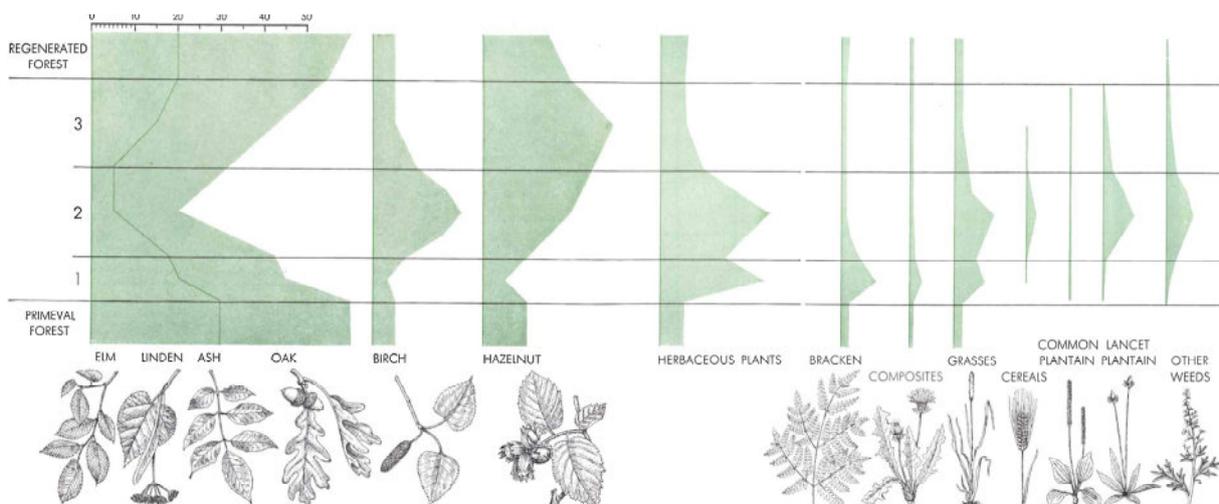


Figure 5 : Diagramme pollinique « modèle » du déboisement par le feu selon Johannes Iversen (1956).

Titre original : “forest clearance on the vegetation of Denmark between about 2500 BC and 2300 BC”.

Pour certains auteurs, la résolution temporelle effective de ces successions polliniques serait en fait incompatible avec celles d'emprises agricoles temporaires, cette séquence traduirait plutôt un établissement permanent d'échelle séculaire (Rowley-Conwy, 1981 ; in Halstead, 2018).

Mais d'autres données archéologiques plus indirectes ont été employées dans ce débat. Parmi les découvertes récentes, une, assez originale, est l'identification d'abondants résidus micro-charbonneux dans des coprolithes de moutons et de chèvres, retrouvés dans des habitats d'ambiance humide, qui sont interprétés comme les preuves de pâturage dans des zones récemment incendiées (Kühn et al., 2013 ;

Jacomet et al., 2016 ; Jakobitsch et al., 2023)¹⁰. Il faut également citer les argumentaires relatifs à la durée d'occupation des sites. Sur les sites des lacs de Chalain et de Clairvaux, situés dans le Jura français, l'hypothèse d'un système d'agriculture itinérante sur brûlis a été mise en parallèle avec les périodes où la durée d'occupation des hameaux néolithiques ne dépasse guère une dizaine d'années (avant 3000 cal. BC), sans rejeter qu'elle eût été pratiquée pour les périodes postérieures, où la durée d'occupation des villages s'accroît (Pétrequin, Pétrequin et Schaal, 2016). L'idée sous-jacente étant qu'au bout de ce laps de temps, il n'y aurait plus de nouvelles parcelles de forêt à mettre en culture à proximité suffisante des hameaux, qui se seraient alors déplacés. Il a aussi été avancé que les bois d'architectures refléteraient les cycles de culture itinérante, selon l'emploi de bois de forêt primaire ou secondaire (Arbogast, Magny et Pétrequin, 1996 ; Pétrequin et Pétrequin, 1997). Au contraire, d'autres auteurs considèrent que les longues durées d'occupation des sites du Rubané d'Europe centrale (plusieurs dizaines d'années) traduisent une sédentarité incompatible avec l'hypothèse d'un système d'abattis-brûlis (Lüning, 1982 ; Whittle, 1996, p. 160 ; Bogaard, 2004a, p. 51). Selon ces points de vue, il y aurait donc une relation presque directe entre la mobilité résidentielle et l'itinérance agricole de l'abattis-brûlis.

Au-delà du domaine des indices matériels, il faut mentionner que beaucoup de choses ont été écrites à propos de la culture sur brûlis, et surtout en sa défaveur. Ce n'est pas un fait nouveau que les usages du feu relatifs aux techniques agricoles et pastorales soient discrédités, puisque ce phénomène est déjà observable dans de nombreux écrits modernes (Sigaut, 1975 ; Dumez, 2010). Mais en dépit de la réhabilitation de ces pratiques par plusieurs technologues, anthropologues, géographes et historiens (Sopher, 1972 ; Sigaut, 1975 ; Ribet, 2009 ; Dumez, 2010 ; Betsch, 2001 ; Bahuchet et Betsch, 2012 ; Portères, 1972 ; Barrau, 1972, 1996 ; Viader, 2014), il persiste encore aujourd'hui des amalgames et une perception négative de ces pratiques. Par exemple, on trouve l'idée que l'abattis-brûlis n'aurait simplement pas été nécessaire compte tenu de la fertilité naturelle de certains sols, comme ceux développés dans les lœss d'Europe centrale, où se sont installées les populations néolithiques (Kreuz et al., 2014, p. 92-93 ; dont la fertilité initiale est par ailleurs réfutée : Langohr, 2001, 2019). Ceci revient de plus à considérer que le feu ne serait qu'un moyen de fertilisation à court terme, alors qu'il s'agit plus globalement d'une méthode pour préparer un terrain ; nous y reviendrons. C'est aussi supposer à tort que la fertilité se résume à des caractères physico-chimiques naturels (Gachon, 2014 ; Morlon, 2012a). Inversement, l'argument de la pauvreté chimique naturelle de certains sols a été donné en faveur de l'emploi de l'abattis-brûlis (Jacomet et al., 2016, p. 1870 ; Ehrmann et al., 2014 ; Rösch et al., 2014). Certains auteurs vont toutefois nettement plus loin dans la critique, considérant que dans les régions d'Europe, au climat tempéré, l'abattis-brûlis serait « *intrinsèquement dysfonctionnel* ». Ce sont les termes péremptaires de Françoise Grenand (1996)¹¹, qui *a contrario* (et aussi étonnant que cela puisse

¹⁰ Dans cette dernière référence, il est précisé qu'au contraire les excréments de bovins en sont dépourvus. Nous n'avons pas trouvé l'explication des auteurs quant à cette différence. Elle pourrait éventuellement être liée à des différences de gestion des animaux, mais il est aussi possible qu'elle s'explique uniquement par le fait que les bovins ne broutent pas aussi à ras que les ovins (Prache et Peyraud, 1997).

¹¹ « *Je pense que la raréfaction des forêts occidentales doit être examinée en tenant compte de tous les facteurs qui entrent en jeu, l'agriculture itinérante sur brûlis, encore une fois, devant être considérée ici dans son dysfonctionnement occidental*

paraître) soutient ardemment les vertus de la culture sur brûlis en domaine tropical. Pour Roger Langohr (2019), le développement ligneux en climat tempéré (par rapport aux tropiques) serait trop lent pour supporter des cycles d'essartage réguliers, car la biomasse ne fournirait pas assez de cendres (pour un retour sur la même parcelle après une vingtaine d'années). C'est à se demander si l'abattis-brûlis fut bien une réalité historique sous nos latitudes¹²... (voir Partie 2-3).

Ce tour d'horizon, forcément non exhaustif compte tenu de la durée temporelle (plusieurs millénaires d'occupations) et géographique considérée, nous paraît tout de même illustrer l'état général de la question. Si certains chercheurs considèrent que le débat est clos (p. ex. : Bogaard, 2004b ; Bogaard, Ater et Hodgson, 2018, p. 106), il nous semble que c'est loin d'être le cas. Comme nous venons de le voir, les données employées sont loin d'être univoques, et posent même quelquefois la question de leur aptitude à discriminer l'un ou l'autre modèle (cas par exemple de l'analyse carpologique pour distinguer des récoltes avec de rares adventices d'autres où cela résulterait des traitements antérieurs au stockage). De plus, les spécificités (échelles spatiales et temporelles) des différentes méthodes d'analyses mises en jeu font qu'il peut être difficile de les appréhender de manière systémique. Considérés dans leur globalité, ces résultats dépeignent des situations contrastées, qui d'ailleurs ne sont pas toujours en accord avec les modèles « classique » simplistes de la néolithisation. Au-delà des arguments archéologiques, il transparait dans certains propos que la réfutation du modèle de l'abattis-brûlis, est en fait surtout un rejet de l'image faussée qu'elle véhicule encore souvent : celle d'une pratique, au mieux, rudimentaire, au pire, irrationnelle. Pratique à laquelle on oppose alors des modèles dans lesquels l'investissement en travail est intensif et soigné (cf. jardinage) ou relève d'une « gestion sophistiquée du territoire avec l'usage du feu » (Jacomet et al., 2016)¹³, où l'emploi de ce dernier serait privilégié pour la chasse, la collecte et le pâturage, mais pas l'agriculture... Mais ces modèles sont-ils vraiment adaptés aux données de l'archéologie ? Et d'autre part, est-il pertinent de les affronter ? Il faudrait déjà au préalable, si cela est effectivement le cas, démontrer que d'un point de vue anthropologique ou socio-économique général, les deux pratiques s'excluent, ce qui à notre connaissance n'est pas le cas (voir Partie 2-1.4, p. 39). Mais avant d'apporter quelques pistes de réflexion sur ce sujet, il nous reste encore un point à évoquer concernant les indices archéologiques des agricultures anciennes. En effet, dans le tableau très large que nous avons brossé, on voit que les principaux arguments employés par les

qui semble avoir été de mise, et non dans son fonctionnement rationnel. Je crois qu'il est temps de conclure ainsi : L'agriculture itinérante sur brûlis ne convenait ni aux conditions socioéconomiques de l'Occident, ni à ses conditions écologiques, et c'est sans doute pour cela qu'elle fut abandonnée » (Grenand, 1996, p. 46).

¹² Voir par exemple les propos de Marijke van der Veen (2005) : « *First, it is important to point out that shifting cultivation or swidden agriculture is an agricultural system adapted to a specific set of ecological circumstances, found primarily in the humid inner tropics, to ensure maintenance of soil fertility. It cannot, therefore, be seen to represent the starting point of all agricultural development. Ecologically, it does not make sense to try and apply such a system to areas like Europe and the Near East, where different soil types and the presence of domestic animals allowed different forms of nutrient restoration (Rowley-Conwy 1981; Sherratt 1981). In this region shifting cultivation is not an appropriate strategy.* »

¹³ Il nous faut tout de même préciser la position plutôt ambiguë de Stefanie Jacomet et al. (2016), qui met en évidence un faisceau d'indices d'emploi(s) du feu dans « le paysage », mais cherche presque systématiquement à rejeter qu'ils puissent relever de l'agriculture, on notera la discordance de positionnement entre le titre de leur article : « *On-site data cast doubts on the hypothesis of shifting cultivation in the late Neolithic (c. 4300–2400 cal. BC): Landscape management as an alternative paradigm* » et une des remarques conclusives : « *However, we cannot exclude that on a freshly cleared piece of land, cultivation was practised for a short time – if fire was used* » et « *For clearing land, they undoubtedly used fire as a landscape management tool, as shown by micro-charcoal in dung and off-site data* » (p. 1870).

archéologues reposent sur des proxys indirects des activités agricoles et pastorales. Quels en sont les témoins directs ?

4. Des traces archéologiques « primaires » de l'agriculture

Quels vestiges ou traces archéologiques permettent donc de documenter les espaces agricoles ? Il existe évidemment les parcellaires agraires (en particulier en élévation), très largement étudiés puisqu'ils sont l'objet central d'un véritable champ disciplinaire, l'archéogéographie (Chouquer, 2003 ; Watteaux, 2011). Néanmoins, si les parcellaires nous renseignent sur les espaces de l'agriculture, ou plus globalement sur la « compartimentation de l'espace rural », ils ne permettent pas d'approcher le fonctionnement des sols agricoles, sans l'aide d'autres disciplines, et en particulier de l'archéopédologie (Giosa, 2012, 2020 ; Fechner, 2021). Mais les délimitations parcellaires sont inexistantes pour le Néolithique¹⁴ et encore plutôt rares pour l'Âge du Bronze (Marcigny et al., 2003 ; Chouquer, 2005 ; Ghesquière, Marcigny et Lefèvre, 2014). Parallèlement, les empreintes relativement nombreuses de labours fossiles (souvent des raies de labours, en particulier d'aires tractés), dont un certain nombre sont attribuées au Néolithique, nous indiquent l'emplacement de terres cultivées, du moins à un moment donné. La majorité de ces traces sont préservées, car elles sont enfouies sous des structures mégalithiques ou des tertres, ce qui permet en outre de leur attribuer un terminus ante quem (p. ex. Thrane, 1989 ; Rowley-Conwy, 1987 ; Kristiansen, 1990 ; voir aussi les références dans : Guilaine, 1991 ; Pétrequin et al., 2006). Si les expérimentations ont confirmé que des outils aratoires pouvaient engendrer des traces similaires, l'interprétation de ces découvertes archéologiques a été débattue, tant pour expliquer le seul fait de leur préservation, que leur fonction véritable¹⁵ (ibid.). Des traces similaires ont été fossilisées en contexte littoral par des phénomènes naturels liés aux variations du niveau marin, comme aux Pays-Bas (Louwe Kooijmans, 2006) ou en Vendée (Large, 2011, 2012 ; Vigneau, 2016). Sur le littoral vendéen, elles seraient associées à un environnement palustre exondé, où des empreintes de sabots d'ovicapridés sont aussi relevées (sont-elles contemporaines ?). Néanmoins, il a été proposé que ces traces littorales soient éventuellement, non pas d'origine agricole, mais liées à une récolte de sablons pour en extraire la saumure (Cassen et al., 2010). La question n'est donc pas tranchée. En tous cas, il semble que l'attention portée à ces traces, qui marquent donc la surface de fond (le « sous-sol naturel ») de l'ancien horizon labouré, se soit longtemps faite au détriment de l'étude de ce dernier (Gebhardt, 1999). Les horizons labourés fossiles constituent pourtant l'objet archéologique le plus direct qui soit de l'agriculture.

Pour le Néolithique, ces découvertes sont encore assez rares. Nous ne nous attarderons pas ici sur les éventuels reliquats de sols cultivés, qui seraient présents en position secondaire dans des comblements, qui peuvent par ailleurs fournir des informations très intéressantes, mais s'éloignent

¹⁴ Les seuls parcellaires attribuées au Néolithique, à notre connaissance, le sont sur des éléments qui nous paraissent assez discutables (voir Pétrequin et al., 2006, p. 108).

¹⁵ Notamment quant à la récurrence des labours : s'agit-il d'accrocs plus profonds lors de labours initiaux ou les preuves d'un faible nombre de mises en cultures ? La possibilité d'une préparation du sol liée à l'occupation rituelle postérieure a aussi été exposée (voir Guilaine, 1991, p. 74-76).

légèrement de notre problématique (p. ex Lauer et al., 2013). Nous pouvons d'abord citer l'exemple bien connu de Thayngen-Weier (Suisse) où une couche extérieure à une occupation néolithique (vers 3800-3600 cal. BC), mais associée à du mobilier céramique contemporain de cette dernière, a été identifiée comme un champ (Troels-Smith, 1984). C'est en particulier la découverte lors de la fouille de pupes de mouches domestiques, dont l'écologie exclut qu'elles puissent s'être développées dans des excréments de ruminants directement déposés en surface d'un champ, ce qui offre une rare preuve directe d'un apport de fumier (Nielsen, 1989).

On peut également citer le site d'Aubechies « Coron Maton » (Constantin et al., 2010 ; Fechner, 2021), où un horizon sombre daté du Néolithique ancien fossilisé sous des colluvions de bas de pente a été mis au jour en contrebas de deux sites d'occupations (l'un attribué au Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain, l'autre au Rubané ; datés aux alentours de 5200-5000 ?). Ce paléosol (voir Figure 6) est notamment fortement enrichi en cendres et en micro-particules charbonneuses, il possède un taux de phosphore élevé, et il est marqué par plusieurs phases de traces aratoires (Fechner, 2021 ; et référence à Mikkelsen et Langohr, 1996). Une « scorie » résultant probablement d'une déjection animale brûlée y a été identifiée. Il est envisagé que ce paléosol ait été successivement pâturé, cultivé et amendé en cendres. L'hypothèse qu'il corresponde à un champ « jardiné » a été évoquée, mais l'origine de l'apport en résidus carbonisés n'est pas définie. Avant cela, il avait été proposé que ces derniers seraient la conséquence de pratiques répétées de brûlis (Constantin et Demarez, 1997 ; Mikkelsen et Langohr, 1996). Ce paléosol évoque par sa morphologie et sa composition, d'autres horizons relictuels enfouis, découverts dans la région rhénane (Eckmeier, 2007 ; Eckmeier et al., 2008 ; Gerlach et al., 2012). Leur distribution spatiale montre qu'ils ne sont pas directement associés à des sites d'occupations – mais plutôt situés en leur périphérie – ni clairement dépendants de la topographie. Ils sont riches en particules organiques brûlées, et leur composition chimique suggère qu'ils aient été fertilisés. Ils résulteraient à la fois de l'accumulation de résidus d'emplois du feu, dont l'abattis-brûlis, de l'érosion subséquente de ces sols, avant qu'ils ne soient remaniés par la pédogenèse ultérieure. Leur formation serait principalement en lien avec une expansion des exploitations agricoles au Néolithique récent et final (vers 4400-2200 cal. BC).

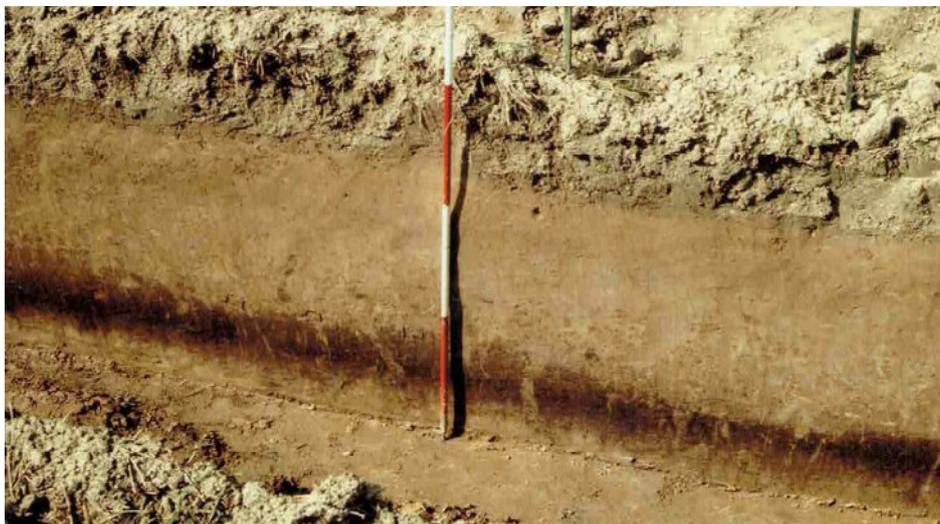


Figure 6 : Prise de vue du paléosol labouré (couche sombre) du Néolithique ancien d'Aubechies (crédits : C. Constantin dans K. Fechner, 2021, inédit)

Un autre exemple intéressant est celui des zones humides de Swifterbant (Pays-Bas), où des couches sombres associées à des sites néolithiques de plusieurs mètres de large bordent les crues d'un paysage fluvial d'eau douce parfois soumis à l'influence marine (Huisman et Raemaekers, 2014). Si certaines sont indiscutablement des couches de rejets d'occupations (Cappers et Raemaekers, 2008), d'autres ont pu être interprétées comme des zones de culture grâce à l'analyse micromorphologique. Cette dernière a permis de caractériser ces couches comme le résultat d'une accumulation liée à plusieurs processus : des dépôts laminés de sédiments fins de crues, des apports de matériaux anthropiques de nature variée (céramiques, silex, coprolithes, ossements), des feux de végétation non ligneuse et des remaniements mécaniques de type labour. Ces traces sont datées autour de 4300-4000 cal. BC. Ces découvertes ont permis d'enrichir considérablement les hypothèses archéologiques, qui jusque-là ne pouvaient s'appuyer que sur des données intra-sites (Cappers et Raemaekers, 2008 ; Out, 2009), en confirmant l'existence d'une agriculture locale. Néanmoins, bien que Huisman et Raemaekers (2014) y voient là les preuves d'une société pleinement agricole (« *a fully agricultural society* »). Ces indices nous paraissent tout à fait compatibles avec les exemples ethnographiques de mises en culture ponctuelle de rives alluviales (agriculture de décrue), mais le rythme et la chronologie de ces dépôts restent difficiles à préciser. Selon nous, la présence de faciès stratifiés va plutôt dans le sens que ces travaux aratoires étaient assez superficiels et intermittents. L'hypothèse de pratiques agricoles temporaires serait en accord avec le modèle régional d'une économie à large spectre (agriculture, chasse, cueillette, pêche) au Néolithique ancien et moyen (jusqu'à 3400-3300 cal. BC ; Out, 2008).

On trouvera d'autres exemples de champs néolithiques fossilisés dans la littérature (Ashbee, Smith et Evans, 1979 ; Boissinot et Brochier, 1997 ; Brochier, 1991a ; Fechner, 2021). Bien que ceux-ci sont encore peu nombreux¹⁶, leur analyse montre qu'ils ne sont clairement pas de simples curiosités. Néanmoins, il semble bien que l'analyse de ces paléosols soit encore largement limitée du seul fait de la grande difficulté à les reconnaître sur le terrain. En effet, de par leur nature même, la lecture morphologique seule peut être insuffisante pour les diagnostiquer, et ils peuvent être aisément confondus avec des paléosols « naturels », sans indices anthropiques flagrants. Les exemples de la vallée du Rhin illustrent cela : les paléosols issus de colluvions cultivées seraient parfois confondus avec des sols reliques de Chernosols (Eckmeier, Gerlach, Gehrt, et al., 2007). À l'inverse, dans le cas du site du Swifterbant, certaines des couches cultivées possèdent une forte similarité avec des dépôts secondaires d'occupations. C'est d'abord la mise au jour de traces aratoires nettement visibles sur le terrain (traces de labour macroscopique) qui a amorcé la recherche d'indices à l'échelle microscopique dans d'autres couches, qui pourraient être confondues avec des couches d'occupations (Huisman et Raemaekers, 2014, p. 574). Nous n'avons présenté ces exemples que sommairement, mais ils illustrent que les champs fossiles peuvent apparaître sous des faciès assez différents, selon leur contexte environnemental et pédologique. De plus, ces faciès sont, selon toute évidence, largement tributaires de la nature des activités agricoles mêmes (usage du feu ou non, durées des cultures, profondeur de labour, types d'outils aratoires, etc.). Ces constatations justifient la pertinence de s'intéresser plus précisément aux procédés techniques culturels.

¹⁶ Une synthèse exhaustive reste à faire.

5. Le feu : un agent primordial pour l'enregistrement des activités agropastorales préhistoriques ?

Il n'est plus à démontrer que le feu, par les modifications physico-chimiques qu'il engendre, est un agent essentiel de la formation des gisements archéologiques. Il est à l'origine d'une certaine variété de produits, dont certains très résistants, qui dans des contextes favorables à leur préservation, comme les sites d'occupations stratifiés, peuvent apporter des renseignements non négligeables, quant aux fonctionnements d'une large gamme d'activités humaines, directement liées au feu ou non (Mentzer, 2014, 2017 ; Goldberg, Miller et Mentzer, 2017 ; Aldeias, 2017). Dans l'hypothèse où le feu aurait fait partie intégrante des systèmes agricoles, on peut supposer qu'il eut laissé quelques traces de son passage. Qu'en est-il donc des produits du feu hors des sites archéologiques *stricto sensu*, hors des lieux d'activités domestiques, artisanales et culturelles, ou autrement dit, dans les milieux exploités ?

5.1. Les paléo-feux dans les archives pédo-sédimentaires « hors-sites » : manifestations et spécificités d'enregistrement

En contexte pédologique « actif », non stratifié, il ne subsiste généralement que des témoins du feu possédant une relativement grande résistance mécanique, comme les charbons de bois. Ces charbons ont théoriquement une valeur diagnostique locale, voire stationnelle (hormis évidemment pour les solums principalement formés de matériaux remaniés, voir ci-après). Ils peuvent être identifiés et datés, ce qui leur donne un statut de marqueur paléoécologique (pédoanthracologie ; Thinon, 1978, 1992 ; Carcaillet et Talon, 1996 ; Talon, Carcaillet et Thinon, 1998 ; Talon et al., 2005 ; Dutoit et al., 2009 ; Henry, Talon et Dutoit, 2010 ; Saulnier, Talon et Edouard, 2015 ; Robin et al., 2018). Mais puisque ce sont des écofacts « isolés », il n'est pas possible de préciser si leur origine est anthropique ou naturelle, sans l'apport d'autres données (Robin et al., 2013 ; Robin, Talon et Nelle, 2015). Dans certaines régions, ce sont néanmoins les seuls témoins de feux anciens (millénaires) qui peuvent être étudiés. L'application conjointe de la pédoanthracologie avec l'analyse de charbons sur des aménagements agraires se montre là tout à fait pertinente pour discuter de l'utilisation de ces espaces (Bal, 2006 ; Bal et al., 2010 ; Harfouche et Poupet, 2013).

Dans les tourbières organiques et surtout les lacs, l'archivage des résidus carbonisés est d'une autre nature. Il s'agit essentiellement de particules de dimensions très fines, ayant été propulsées lors des feux de végétations dans les colonnes de fumée¹⁷ (Scott et al., 2014a). Ces particules peuvent ainsi retomber à une assez longue distance de l'évènement, jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres (Clark, 1988 ; Clark et al., 1998 ; Blackford, 2000 ; Lynch, Clark et Stocks, 2004 ; Tinner et al., 2006 ; Oris et al., 2014). Ces résidus carbonisés microscopiques ne peuvent généralement pas être identifiés d'un point de vue taxonomique, mais leur morphologie peut fournir des précisions quant aux types de végétation incendiés (Umbanhowar et Mcgrath, 1998 ; Jensen et al., 2007 ; Courtney Mustaphi et Pisaric, 2014 ; Crawford et Belcher, 2014 ; Leys, Commerford et McLauchlan, 2017). Ils font l'objet d'un comptage

¹⁷ Quoique dans le cas d'incendies naturels très intenses, des éléments carbonisés de masses plus importantes (brandons) peuvent être projetés et dispersés à l'échelle kilométrique (Bal et Métailié, 2005).

en microscopie sur lame pour calculer un taux d'accumulation (ou influx) charbonneux dans le temps (Scott, 2000 ; Vannière, 2001 ; Whitlock et Larsen, 2001). Cela permet une analyse diachronique, sur le temps long, et à haute résolution temporelle, dont la représentativité spatiale est d'ordre micro-régionale à régionale (Clark, 1988 ; Clark et al., 1998 ; Tinner et al., 2006 ; Oris et al., 2014). L'analyse de ce « signal incendie », employé de concert avec la palynologie, même si leurs modalités de dépôts diffèrent (Edwards et Whittington, 2000), peut permettre de dépasser la seule restitution d'une histoire des feux, pour discuter des pratiques agro-pastorales anciennes (Vannière, 2001 ; Galop, Vannière et Lopez-Saez, 2003 ; Dietre et al., 2016 ; Rius, Vannière et Galop, 2009).

Les secteurs géomorphologiques favorables au stockage de matériaux (plaines alluviales, versants) offrent une restitution événementielle que l'on peut *grosso modo* considérer comme intermédiaire entre les deux situations précédentes. Très schématiquement, on y trouve surtout des produits en position secondaire, dont l'origine est de plus faible distance que ceux exportés par les colonnes de fumée, mais surtout, que l'on peut spatialement définir (bassin versant, plateau ou versant amont ; Meyer et Wells, 1997). Malgré que les enregistrements sédimentaires soient verticalement (temporellement) et spatialement discontinus, leur stratification permet de travailler sur des ensembles de produits plutôt cohérents (par opposition aux horizons pédologiques). Ainsi, les indices de feux se matérialisent souvent en nappes ou en épandages discontinus de matériaux brûlés (Wells, 1987 ; Meyer, Wells et Timothy Jull, 1995 ; Meyer et Wells, 1997 ; Cannon et Gartner, 2005 ; Pierce et al., 2008 ; Scott et al., 2014a). Mais il peut également s'agir de dépôts consécutifs aux feux, en particulier de coulées de débris boueuses (*ibid.*). D'ailleurs, ce dernier type de dépôt peut lui-même permettre la préservation de surfaces brûlées (en place) en aval, grâce à un enfouissement très rapide. Cela étant, ces secteurs n'excluent pas le développement de sols lors de phases de stabilité climatique et environnementale. Ces secteurs géomorphologiques étant potentiellement exploitables par les agriculteurs, ils constituent donc les zones les plus propices à la préservation de traces *in situ* de feux anthropiques (Brochier, 1991a ; Berger et al., 2007 ; Berger, 2009 ; Cremaschi et Nicosia, 2012).

Nous allons maintenant regarder plus en détail quelles sont les traces de feux considérées comme *in situ* qui sont mentionnées dans la littérature archéologique, et les divers problèmes qu'elles posent.

5.2. Les « foyers d'essartage »

Dans les publications archéologiques, on relève des mentions fréquentes de traces liées au feu interprétées en lien avec des activités de déforestation : *foyers de déforestation*, *foyers d'essartages*, *souches brûlés*, *chablis brûlés*, mais aussi des comblements de chablis ou des anomalies, associés à des résidus de combustion, ou encore, mais bien plus rarement, de diverses *zones foyères* causées par des activités de *brûlis*, de *défrichement* ou *d'écobuage* (p. ex. en France, en Suisse et en Italie : Billard et al., 1991 ; Chancerel et Masson, 1991 ; Blouet et al., 1992 ; Coye, Mahieu et Perrin, 1996 ; Bostyn et Durand, 1999 ; Marmet, Aubry et Best, 2002 ; Le Jeune et al., 2005 ; Pousaz et al., 2009 ; Gaudefroy, 2011 ; Laurelut, 2011 ; Cremaschi et Nicosia, 2012 ; Prost, 2013 ; Cubizolle et al., 2014 ; Galland et al., 2014 ; Maroelli, 2014 ; Pesenti, 2016). Ces découvertes sont pour la majorité faites lors d'opérations archéologiques préventives (ou de sauvetages pour celles antérieures à 2001, en France). Outre les

précédentes publications mentionnées, des mentions similaires et plutôt nombreuses apparaissent dans les notices de diagnostics¹⁸, mais elles ne font généralement pas l'objet de prescriptions de fouilles.

Mis à part la mention de produits du feu (charbons, terre brûlée ou rubéfiée) – qui n'est toutefois pas systématique – ni leur composition ni leur structuration ne sont vraiment détaillées. Malgré tout, les diverses dénominations qui qualifient ces « structures » sont bien des interprétations (elles correspondent à des processus, et non à des faits). De prime abord, il n'est donc pas établi qu'il s'agisse de traces de même nature ni de même origine. Il n'est d'ailleurs pas toujours précisé si leur origine serait naturelle ou anthropique, mais pour ce qui est des dits *foyers*, l'origine humaine est implicite. Par contre, ce qui ressort assez clairement des interprétations, c'est que ces traces renvoient à des événements survenant en milieu boisé. Vincent Blouet et ses collaborateurs (1992) résument la situation des « *témoins de déforestation* » à partir des découvertes réalisées en Lorraine, dans le cadre de l'archéologie de sauvetage :

« Ce type de structures, mis en évidence pour la première fois sur le site de Pagny-sur-Moselle (54) (campagne 1985) (Guilaine 1991) est en fait relativement fréquent. Il convient de distinguer les foyers d'essartage qui résultent de la destruction par le feu des souches d'arbres coupés, les chablis brûlés qui proviennent du brûlage des souches d'arbres déracinés et les feux de bûcheronnage qui forment des aires rubéfiées à même le sol beaucoup plus importantes. Seul le deuxième type peut être repéré sur les gisements où les paléosols ne sont pas conservés. Ces vestiges caractérisent le déboisement d'une forêt, mais ne signifient pas nécessairement qu'il y ait eu des cultures sur brûlis. L'utilisation du feu courant pour préparer le sol et l'amender ne laisse en effet que des traces extrêmement ténues, pratiquement impossibles à déceler à la fouille ».

Il n'est malheureusement pas précisé quels critères morphologiques permettent de distinguer ces trois types de phénomènes, si ce n'est que les « feux de bûcheronnage » en question se présentent comme des aires rubéfiées de grandes dimensions. Le rapport de fouille de l'opération de Pagny-sur-Moselle « En Navut » (Blouet et Faye, 1986), situé dans la plaine alluviale de la Moselle, nous apporte quelques indications supplémentaires :

« À 1,5 m de profondeur, sous une épaisse couche de limon sableux, se trouve un horizon très mince (moins de 5 cm de hauteur) et très riche en charbons de bois. Le décapage de ce niveau sur 600 m² a permis de repérer 15 aires de combustion non aménagées. Ces foyers se trouvaient à différents stades de rubéfaction et leur surface variait de 50 cm à 4 m de diamètre. Dans les cas extrêmes, l'épaisseur de la terre rougie ne dépassait pas 1 à 2 cm. Il semble donc qu'il n'y ait eu qu'une seule utilisation et que la durée d'activité ait été relativement courte. Dans plusieurs cas, les traces de combustion formaient des traînées rayonnantes et il est vraisemblable qu'il s'agisse là de traces de racines carbonisées » (voir la Figure 7).

La situation semble se compliquer. S'agit-il de traces de racines brûlées en place – il s'agirait alors a priori plutôt d'un phénomène naturel – ou de surfaces de foyers ?

L'étude palynologique de la couche sédimentaire associée à ces traces met en évidence un milieu nettement ouvert (pollens arboréens $\leq 40\%$) dominé par les graminées (40%) et associés à des plantes rudérales et de milieux pâturés (Richard, 2017). Les céréales (1%) et les taxons messicoles sont peu

¹⁸ Voir la revue Archéologie de la France – Informations (AdIFI) : <https://journals.openedition.org/adlfi/>

représentés. Ces résultats semblent constituer des arguments en faveur que ces traces reflètent des activités de mise en valeur de ce milieu humide, dans un objectif agro-pastoral, et non de feux naturels. Néanmoins, est-ce que le milieu était effectivement plus fortement boisé avant la mise en place de ces traces de feu ? Le trop faible nombre de pollens préservés dans les couches inférieures ne permet pas de l'assurer.



Figure 7 : Photographie en plan d'un « foyer de déforestation » du Bronze final (ou de l'âge du Fer ?) mis au jour à Pagny-sur-Moselle dans le cadre de fouilles de sauvetages (crédits : Blouet et Faye, 1986)

5.3. Les « chablis brûlés »

Par ailleurs, sous le terme de « chablis brûlés » (« *burnt tree-throw* »), on recense dans la littérature anglophone un modèle de structure qui résulterait de la combustion sur place d'une souche d'arbre, et qui dans certains cas, concorderait avec un déboisement dans l'objectif de cultiver le terrain (Goldberg et Macphail, 2006, chap. 9 ; Macphail et Goldberg, 1990 ; voir aussi : Bell, 1981, p. 270 et 274, 1983, p. 132). Il s'agit en fait « simplement » d'un creusement de chablis¹⁹, au sein duquel se seraient déposés les résidus de combustion de la souche ayant brûlé :

« Where treethrow subsoil holes contain charcoal of mainly one tree species, it has been suggested that the fallen tree that formed this feature, was burned in situ – especially when burned soil is also present (Barclay et al., 2003; Macphail and Goldberg, 1990; Mark Robinson, personal

¹⁹ En archéologie, il est d'usage d'employer le terme chablis seul pour se référer aux remplissages des dépressions ouverte par le déracinement, seuls vestiges généralement préservés de ces événements (étym. : 1^{res} attestations 1600, *bois chablis* « bois abattu par le vent »). Le chablis est défini comme : « *Arbre de la forêt renversé sous l'action de différents agents naturels (vent, orage, neige) ou pour des raisons qui lui sont propres (vieillesse, pourriture, mauvais enracinement), sans l'intervention de l'homme* » (TLFi).

communication). Such findings are not unequivocal evidence of purposeful clearance, however, because natural blowdowns occur during storms, and such opening up of the woodland landscape by human groups may only have been opportunistic. The presence of artifacts in treethrow holes is also not conclusive evidence of large-scale forest clearance, because again the use of such hollows could be opportunistic, and artifacts in the soil could also have fallen into the hollow as it became infilled by extant soils (Crombé, 1993; Newell, 1980) » (Goldberg et Macphail, 2006, p. 195).

Les auteurs suggèrent donc que ces chablis pourraient être d'origine naturelle, mais que l'ouverture du terrain (par le feu donc ?) serait anthropique, et alors opportuniste. Entre parenthèses, il est utile de rappeler que l'emploi du terme « *clearance* » n'implique pas nécessairement une activité agricole ou pastorale subséquente (Brown, 1997). Les principaux arguments avancés pour cette interprétation sont que ces chablis sont comblés de charbons, principalement d'une seule espèce, et accompagnés de terre brûlée (rubéfiée ?). Néanmoins, l'analyse anthracologique de ce type de structures n'est pas courante, pour ne pas dire exceptionnelle. Le seul exemple d'étude appliquée dont nous ayons connaissance n'a pas permis de démontrer la présence de bois racinaire (Bell, 1981). Mais il faut considérer que ces critères anatomiques (absence de moelle au centre du bois, faible porosité) sont parfois peu évidents sur des charbons pédologiques (millimétriques ou fortement altérés). L'identification taxonomique devrait par contre permettre de discuter cette hypothèse.

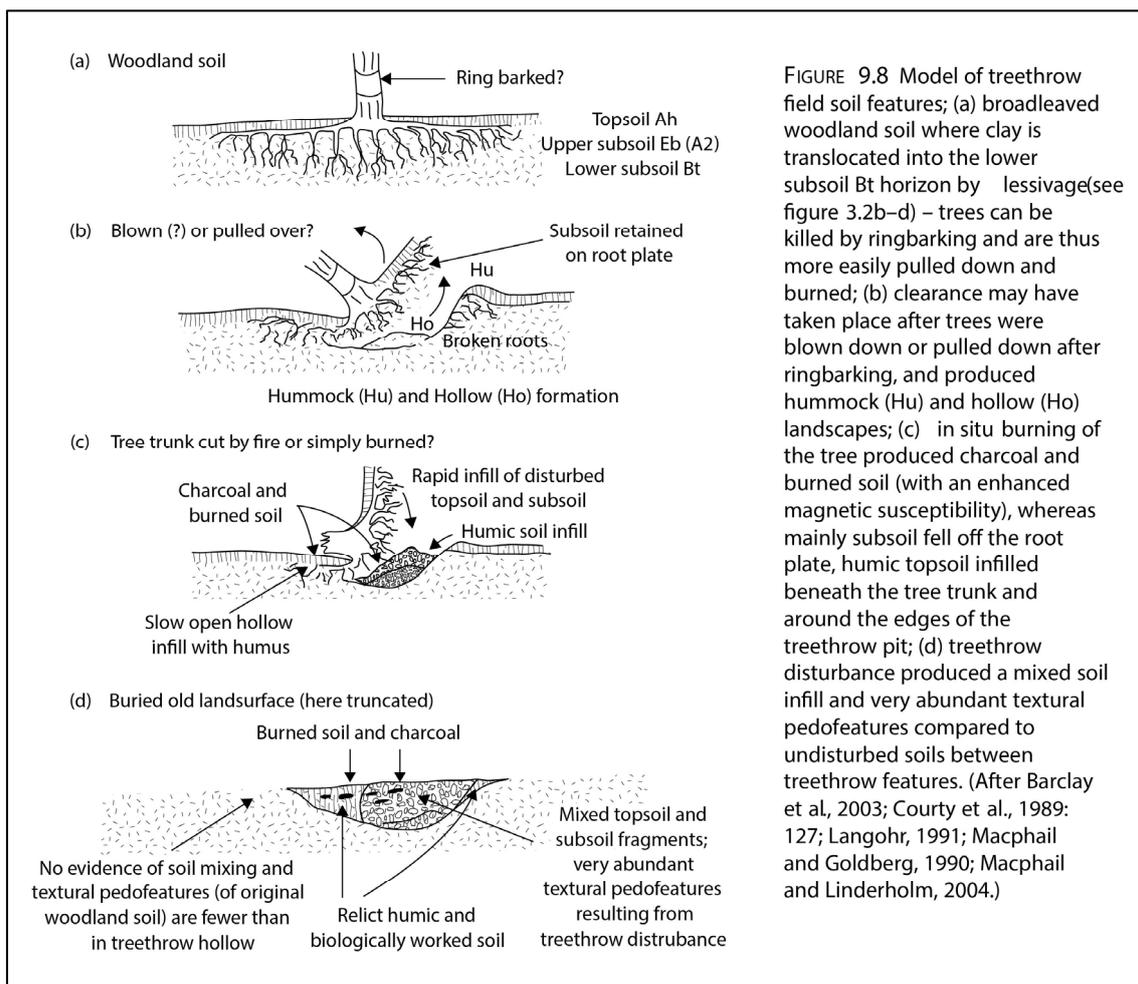


FIGURE 9.8 Model of treethrow field soil features; (a) broadleaved woodland soil where clay is translocated into the lower subsoil Bt horizon by leaching (see figure 3.2b–d) – trees can be killed by ringbarking and are thus more easily pulled down and burned; (b) clearance may have taken place after trees were blown down or pulled down after ringbarking, and produced hummock (Hu) and hollow (Ho) landscapes; (c) in situ burning of the tree produced charcoal and burned soil (with an enhanced magnetic susceptibility), whereas mainly subsoil fell off the root plate, humic topsoil infilled beneath the tree trunk and around the edges of the treethrow pit; (d) treethrow disturbance produced a mixed soil infill and very abundant textural pedofeatures compared to undisturbed soils between treethrow features. (After Barclay et al., 2003; Courty et al., 1989: 127; Langohr, 1991; Macphail and Goldberg, 1990; Macphail and Linderholm, 2004.)

Figure 8 : Le modèle géoarchéologique des « chablis brûlés » d'après Goldberg et Macphail (2006, p. 195).

Ajoutons que c'est principalement dans la littérature micromorphologique que l'on trouve des références à ce modèle des « chablis brûlés ». L'emploi de cette méthode dans l'analyse des comblements de trous de chablis permet la recherche d'autres traits pédo-sédimentaires (revêtements poussiéreux, traces de battance ou aratoires, etc.) qui peuvent orienter vers une interprétation anthropique ou naturelle (Deák et al., 2017). Une des difficultés importantes d'interprétation est le fait que les chablis, outre leur susceptibilité à remanier des matériaux au moment de leur formation, sont aussi très propices au piégeage postérieur de matériaux, et de mobilier erratiques, mais également à l'activité biologique et animale (Crombé, 1993 ; Langohr, 1993 ; Schaetzel et al., 1990). Cela inclut donc potentiellement des résidus de combustion, dont d'incendies naturels, comme le démontrent des observations actuelles (Bobrovsky et Loyko, 2016 ; Bobrovsky, 2019 ; voir en particulier aussi les observations et le modèle d'arbres renversés incendiés de : Schaetzel et Follmer, 1990 ; et Schaetzel, 1986). En l'état, la démonstration de l'origine anthropique de feux associés au chablis reste très compliquée, car différents types d'évènements (naturels ou anthropiques) peuvent produire des résidus chauffés et des charbons, qui de plus peuvent perdurer très longtemps (Deák et al., 2017 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017). Cela est d'autant plus compliqué quand les indicateurs de combustion sont ténus, et surtout uniquement décelés en microscopie.

5.4. Des modèles interprétatifs aux processus de formation : de nombreux questionnements

Les « chablis brûlés » et les « foyers de déforestation » sembleraient donc correspondre à des faits, et a fortiori, à des phénomènes tout à fait différents (voir Figure 7 et Figure 8). Les « chablis brûlés » se présenteraient comme des structures en creux avec un remplissage secondaire incluant des résidus de chauffe. Les « foyers de déforestation » correspondraient à des surfaces de combustion nettement rubéfiées, potentiellement très larges, mais peu épaisses.

Néanmoins, dans la littérature, certains auteurs font clairement référence à des « chablis brûlés » dans le cas de nappes irrégulières de sédiments rubéfiés. Par exemple, lisons Matthew G. Canti et Neil Linford (2000) :

« Patches of uneven or sharply variable reddening may result from tree-throw fires, fires burnt in pits, or other circumstances where the soil is held up in the flame, so avoiding the insulation of ash cover. These types of morphology would normally be obvious on site when viewed in plan. It is where reddened patches are relatively homogeneous and occur as a smooth transition from the background soil colour that the questions posed by surface-built fires come into focus ».

Comment alors interpréter les structures de Pagny-sur-Moselle, dont certaines mesurent près quatre mètres de diamètre ? Certaines mesurent près quatre mètres de diamètre, ce qui paraît beaucoup pour des feux de surfaces. Malgré cela, l'altération thermique ne semble pas très profonde. De plus, sur l'exemple photographié (Figure 7), la coloration apparaît tout de même très homogène, ce qui pose question dans le cas d'une combustion naturelle. Ainsi, et au contraire de ce que nous indiquent Matthew G. Canti et Neil Linford, la morphologie de ces traces, uniquement observée en plan, nous

paraît loin d'être évidente. Morphologiquement, elles ne semblent en tout cas effectivement pas correspondre à celles de foyers à plat que l'on rencontre couramment dans la littérature archéologique (Wattez, 1992 ; Gascó, 2002 ; Fechner et al., 2002 ; Fechner et Broes, 2019).

En outre, ces traces ne ressemblent pas non plus à celles de souches carbonisées en place, même si ces dernières sont tout à fait susceptibles de produire ponctuellement une chauffe et une rubéfaction des sédiments encaissants (voir Figure 9). Les morphologies qui en résultent sont bien différentes, et ne concernent pas des surfaces telles que ce qui est observé à Pagny-sur-Moselle (Wendorf, 1982 ; Leslie et al., 2014 ; Mentzer, 2017). Faut-il croire que ces différences résulteraient de leur contexte pédosédimentaire de formation ? En effet, les traces de feu affectant les systèmes racinaires et formant ces plus ou moins larges vides derrière eux sont assurément liées à des milieux très drainants, soit en raison de leur topographie ou de la nature des sédiments (peu ou pas argileux), soit à cause des conditions climatiques très sèches ou méditerranéennes, permettant une dessiccation marquée et profonde du sol (ibid.). En revanche, en contexte de plaine alluviale humide, comme c'est le cas de l'exemple de Pagny-sur-Moselle, un tel processus est a priori peu probable. Dans les terrains fortement marqués par l'humidité, il est même fréquent que les arbres dépérissent debout ou s'effondrent sans qu'il n'en résulte aucun chablis, à cause des pourritures racinaires. Cela doit-il signifier que ces traces rubéfiées seraient nécessairement anthropiques ? Et alors à quels types d'activités seraient-elles liées ? Ou de manière tout à fait contraire, tradiraient-elles des phénomènes naturels résultant de périodes de sécheresse marquées ?

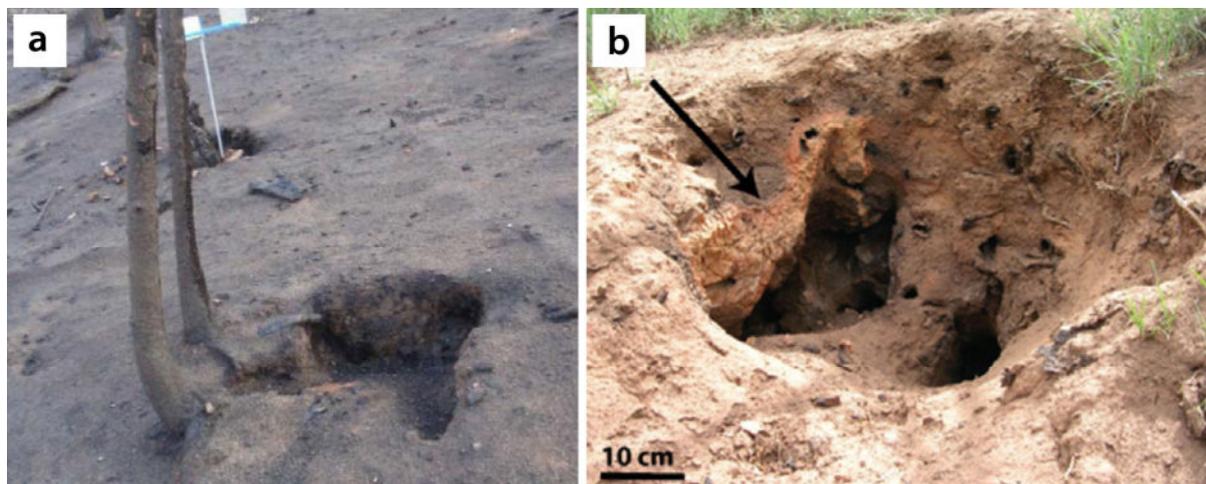


Figure 9 : Traces laissées par la carbonisation de souches d'arbres en place lors de feux naturels (crédits ci-dessous).
(a) Dépression causée par la combustion sous-jacente de racine et rapidement colmatée par les apports des écoulements de surface (incendie de 2010 de Fourmile Canyon, Colorado, USA ; crédits : Moody et al., 2013)
(b) Pin *ponderosa* brûlé en place (incendie de 2002 de Rodeo-Chediski, Arizona, USA). Le sédiment rubéfié correspond à des dépôts alluviaux de l'Holocène ancien-moyen. Noter la circonscription du phénomène, le gradient de coloration interne de la paroi rubéfiée et les larges ouvertures sous-jacentes (photographie tirée de Mentzer, 2017, p. 413 ; crédit C. Roos, 2005).

D'autre part, un point qui ressort très clairement de la lecture de la littérature archéologique et expérimentale, est celui que la pratique de l'abattis-brûlis ne laisse que très peu voire pas de traces physiques de son emploi (Rösch et al., 2002 ; Eckmeier, Gerlach, Skjemstad, et al., 2007 ; Deák et al., 2017 ; Ponomarenko et al., 2019 ; Dussol et al., 2021). Et point beaucoup plus important, les arbres ne sont normalement pas dessouchés (Sigaut, 1975 ; Mazoyer et Roudart, 1997). L'abattis-brûlis est une pratique d'agriculture forestière, c'est-à-dire qu'elle nécessite que le milieu forestier se régénère après que le terrain ait été exploité. Or, l'élimination des souches contraint totalement la régénération ligneuse rapide, puisque celle-ci est normalement assurée par les rejets même de ces souches. Ces foyers d'essartages correspondraient donc à des entreprises de déforestation d'un tout autre genre que l'abattis-brûlis (un déboisement « définitif » ?).

Par quel processus exactement se forment ces « foyers de déforestation » ? S'agit-il de surfaces brûlées en place ou de fonds de structures de combustion ? S'agit-il de feux d'arbres carbonisés en place ou seulement de foyers d'activités périphériques aux zones déboisées (foyers de bûcheronnage ? Deák et al., 2017) ? Certaines des expérimentations actuelles de culture sur abattis-brûlis suggèrent en effet qu'il aurait été nécessaire de maintenir des foyers à proximité de la parcelle à brûler, afin de fournir suffisamment de charbons pour l'allumage (Schulz, Vannina et Hall, 2014 ; Schulz et al., 2020). La densité spatiale du phénomène de Pagny-sur-Moselle paraît toutefois élevée pour concorder avec l'hypothèse de tels foyers, ou d'autres feux liés à des activités temporaires (mais il n'y a pas de mobilier associé). En outre, comment expliquer cette rubéfaction si franche, mais peu épaisse et relativement homogène ? Et le fait même que de telles traces soient préservées s'il s'agissait d'une déforestation pour cultiver ? Mais allons plus loin encore, est-il certain que ces traces rubéfiées soient liées au feu ? En contexte alluvial, du fait de la dynamique d'engorgement par l'eau des sols (accumulation du fer sous forme oxydé ; voir l'exemple de la Figure 10, le développement d'horizons de teintes ocre, rougeâtre à rouille est commun (Baize et Jabiol, 1995 ; Fechner et Broes, 2019). Ces « foyers d'essartages » sont-ils systématiquement associés à des charbons, ou d'autres indices de feux qui permettraient d'en assurer ?

Les phénomènes mis en évidence par les archéologues et les modèles d'interprétation présentés jusqu'à maintenant nous amènent à nous poser de multiples questionnements. En particulier sur la nature des processus menant à la formation des dits foyers de déforestation ou d'essartage. Le peu d'attention porté jusque-là à ces phénomènes, qui décriraient donc possiblement, de manière directe, car *in situ*, des activités agro-pastorales, peut sembler étonnante. D'autant plus que le nombre de mentions à de tels phénomènes dans la littérature grise montre qu'ils ne sont pas si anecdotiques. On peut aisément comprendre que de telles traces diffuses et dont le caractère anthropique est incertain, puissent être délaissées au profit de vestiges, eux, indiscutablement anthropiques, ou dont le discours archéologique qui résultera de leur analyse est attendu et maîtrisé. Il est de plus évident que les contraintes d'interventions matérielles et temporelles de l'archéologie préventive (sans parler du temps de l'archéologie de sauvetage) occasionnent la nécessité de faire des choix. Cependant, lorsque ces découvertes soutiennent un discours anthropologique, comme celui des modalités d'exploitation d'un terroir, ou de la mobilité des groupes humains, il est indispensable de s'y attarder un peu plus. C'est ce que nous nous proposons de faire dans ce travail.

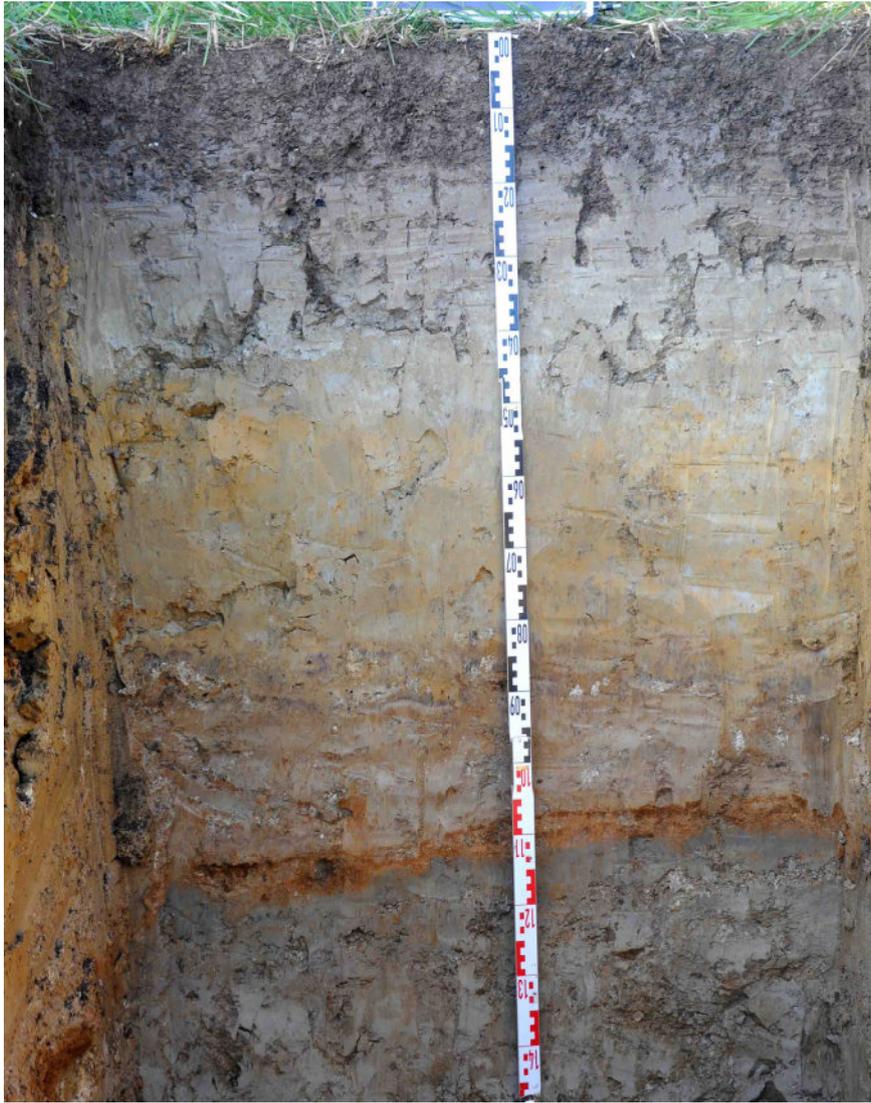


Figure 10 : Exemple de solum complexe avec un horizon fortement teinté par évolution pédologique (crédits : Hauert et al., 2017 ; dans Gobat et Guenat, 2019, comm. pers.).

L'hypothèse de formation privilégiée par J.-M. Gobat et C. Guenat est celle d'une oxydation du fer liée à l'alternance de dessiccation-humectations favorisées par la pente et le caractère sableux du mince horizon rouge-orangé, encaissé dans des dépôts fortement argileux.

6. Problématique et démarche générale

Partant du constat que l'utilisation du feu dans une visée agro-pastorale doit, au même titre que toute action technique, posséder *a minima*, une *action physique efficace* (considérée dans son propre cadre rationnel, c'est-à-dire la tradition ; Sigaut, 2003b ; Mauss, 1950), ou dit autrement, avoir un *effet attendu en réponse à un problème précis* ; alors, ne devrions-nous pas nous attendre à ce que ces usages puissent engendrer des produits distincts de ceux résultant de feux de végétation naturels ?

Quels sont les emplois du feu dans le domaine agro-pastoral ?

À quels objectifs répondent-ils ?

Dans quels contextes sont-ils employés ?

Quelles sont les modalités opératoires spécifiques de ces pratiques ?

Quelles conclusions peut-on en tirer vis-à-vis de leur visibilité archéologique ?

Et enfin, peut-on mettre en évidence, à travers les marqueurs de feu préservés dans les archives pédologiques et sédimentaires, l'existence de pratiques agricoles ou pastorales ?

Afin d'essayer de répondre à ces multiples questionnements, les textes agronomiques et techniques modernes portant sur les techniques « traditionnelles » de l'agriculture sont des ressources précieuses. Dans sa thèse sur « *L'agriculture et le feu* » (1975), François Sigaut, ethnologue et agronome (Bourrigaud, 2012 ; Mahias, 2013 ; A. de Beaune, 2014), a réalisé une vaste synthèse technologique sur les méthodes de préparation du champ, dans les agricultures préindustrielles. Ce travail n'a toutefois eu que des répercussions très limitées dans le domaine de l'archéologie. Les différents exemples que nous avons évoqués jusque-là montrent pourtant que ce ne sont pas les données (tant archéologiques que paléo-environnementales) qui manquent, pour être confrontées à ces connaissances. Évidemment, rien ne dit que la synthèse de ces textes permettrait d'atteindre une quelconque exhaustivité en regard des techniques ayant réellement existé au cours des périodes anciennes. Il nous semblerait toutefois dommage de les négliger dans l'étude des agricultures préhistoriques, sous prétexte qu'elles concernent des périodes de notre histoire relativement proches. Au même titre que les approches ethnoarchéologiques, elles peuvent nous permettre d'ouvrir le champ des interprétations possibles, et s'inscrivent « naturellement » dans le cadre d'une démarche d'analyse historique au sens large (Sigaut, 1975b ; Pétrequin et Pétrequin, 1993 ; Roux, 2007 ; Gosselain, 2011). Ces ressources nous apprennent notamment l'existence d'une autre technique agricole reposant sur l'usage du feu que l'abattis-brûlis, dont les modalités de mise en œuvre en diffèrent grandement : l'*écobuage*. Cette technique n'est simplement jamais envisagée par les archéologues.

Dans la partie suivante, nous reprendrons donc, une partie notable des éléments déjà exposés par F. Sigaut, enrichie de nos propres lectures, et notamment de travaux de géographes et d'agronomes ayant documenté les pratiques d'écobuages. Cependant, nous chercherons à mettre en avant les spécifiques techniques susceptibles de posséder une « visibilité archéo-pédologique », dans l'objectif de disposer d'une grille de lecture à confronter à nos cas d'étude.

Partie 2 :
**Les arts du feu en agriculture : vers une
reconnaissance géoarchéologique**

1. Systèmes agraires et techniques de culture : concepts, définitions et classifications

S'intéresser aux témoins archéologiques « primaire » de l'agriculture, c'est logiquement se pencher sur les lieux mêmes où elle a été pratiquée (Boissinot et Brochier, 1997 ; Boissinot, 2000). Soit, d'un point de vue géographique, le champ, ou d'un point de vue agronomique, la terre. Avant de nous atteler à préciser les spécificités des pratiques du feu, il convient d'abord de préciser quelques définitions relatives aux agricultures européennes, leurs cadres conceptuels et quelques éléments importants qui les caractérisent, ou permettent de les différencier.

1.1. Le champ et sa fertilité : définitions

Le **champ** (étym. : 1080, du latin *campus* « plaine, terrain cultivé ») est défini selon un dictionnaire généraliste (Le Grand Robert de la langue française, 2005) ainsi : « *Pièce de terre propre à la culture (et généralement, affectée à une culture particulière)* ».

Le **sol** (étym. : 1538, *soul*, XV^e, du latin *solum*) peut être défini de nombreuses manières selon le point de vue adopté²⁰. De manière synthétique, il est le « *produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent* » (G. Aubert et J. Boulaine in Mathieu et Lozet, 2011). Selon une définition agronomique : « *le sol agricole est la partie de la couche superficielle de l'écorce terrestre qui, grâce à sa structure meuble et sa composition physico-chimique, est en mesure d'assurer un développement normal des végétaux cultivés* » (R. Diehl in Soltner, 1994, p. 13). Les notions de **sol agricole** ou de **terre arable** (terre potentiellement cultivable, mais qui ne l'est pas forcément) recouvrent donc plus précisément celle de fertilité du sol (Mathieu et Lozet, 2011).

La notion de **fertilité du sol** peut faire référence à un niveau de production utile (sens concret, abondance et qualité des récoltes) ou une aptitude à produire (sens théorique, rationalité des rendements) des plantes cultivées (Gachon, 2014 ; Sigaut, 1992). Elle peut être définie « *comme la résultante, réelle ou théorique, d'effets multiples et interdépendants caractéristiques du milieu géographique (climat et sol), ainsi que de l'action de l'homme (techniques culturales)* » (Gachon, 2014). Ainsi, il convient généralement de distinguer ce qui relève de la fertilité naturelle (foncière), de la fertilité acquise ou potentielle (Soltner, 1994 ; Mathieu et Lozet, 2011). Elle ne se limite pas à la richesse des sols en éléments chimiques nutritifs et concerne tout autant leurs propriétés et leurs fonctionnements physiques et biologiques, les conditions pédoclimatiques saisonnières, etc. (AFES, 2009). La notion de fertilité potentielle (ou du potentiel agronomique d'un sol) est une appréciation relative, qui n'est pas la même pour différentes sociétés et notamment en fonction des moyens techniques dont elles disposent (Revel, 1991 ; Sébillotte, 1992 ; Soltner, 1994). Finalement, l'ensemble des moyens mis en œuvre par les agriculteurs tendent directement ou indirectement à maintenir cette fertilité sur le long terme,

²⁰ Voir la définition de l'AFES : <https://www.afes.fr/sols-et-definitions/>

puisqu'elle garantit les besoins indispensables à la stabilité du système social (Mazoyer et Roudart, 1997).

Pour cela, le **travail du sol** constitue une étape majeure, il regroupe « *l'ensemble des façons culturales, opérations mécaniques visant à maintenir ou à mettre un terrain (un champ, une parcelle) dans l'état physique considéré comme le plus favorable possible à la réussite d'une culture* » (Morlon et Sigaut, 2022). Dans le cas des agricultures non mécanisées, le terme **labour** peut être considéré comme synonyme des façons culturales. Avec la diversification de ces dernières, son sens s'est restreint pour signifier précisément « *le retournement d'une tranche de terre de dimensions définies, tel qu'il s'obtient avec la charrue proprement dite* » (ibid.). Le travail du sol variera selon les effets recherchés, il est donc, dans une certaine mesure, dépendant des propriétés des sols et de leur état avant l'opération. De façon générale, ces travaux sont nécessaires pour : améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (ameublissement, incorporation des engrais, contrôle de l'humidité, exposition aux agents climatiques), permettre l'implantation (semis) et l'assainissement des cultures (lutte contre les mauvaises herbes et parasites ; Soltner, 1994).

1.2. Les approches systémiques pour l'étude des sociétés agraires

Le concept de **système agraire** proposé par Marcel Mazoyer et Laurence Roudart (1997) offre un cadre d'analyse général pertinent pour aborder les composantes des agricultures anciennes. Les deux agronomes le définissent comme :

« L'expression théorique d'un type d'agriculture historiquement constitué et géographiquement localisé, composé d'un écosystème cultivé caractéristique et d'un système social productif défini, celui-ci permettant d'exploiter durablement la fertilité de l'écosystème cultivé correspondant. »
(Mazoyer et Roudart, 1997, p. 46)

Le système agraire est décomposé en deux sous-systèmes principaux en interrelation, qui sont « *l'écosystème cultivé* » et le « *système social productif* » (Mazoyer et Roudart, 1997, p. 42-45). L'écosystème cultivé correspond aux différentes formes et organisations des écosystèmes, impliquant les espaces directement aménagés ou non (jardins, terres labourables, pâtures, près, forêts, etc.), leurs fonctionnements spécifiques (activités liées à leur maintien, cycles culturels, systèmes d'élevage, etc.), et leurs interactions (circulation organisée de matières et d'énergie, impacts sur les écosystèmes voisins, etc.). Le système social productif correspond quant à lui, aux aspects techniques, économiques et sociaux de l'organisation agraire. Il se compose des différents moyens mis en place par les sociétés (équipements, instruments, plantes et animaux domestiques, savoirs et force de travail, etc.), nécessaires à l'exploitation et au renouvellement de la fertilité de l'écosystème cultivé. Le système agraire est un cadre d'analyse pertinent à différentes échelles, mais comprenant *a minima* un ensemble d'unités de production cohérentes (exploitations agricoles), dont les systèmes de production et les caractéristiques sociales (catégorie sociale de l'exploitant, de la main-d'œuvre, mode d'accès à la terre, etc.) peuvent être similaires ou non, et complémentaires. Enfin, le concept de système agraire intègre une dimension temporelle, car les systèmes qu'il cherche à définir ne se développent pas *ex nihilo* mais s'inscrivent dans une dynamique évolutive, cohérente à l'échelle des grandes régions du globe.

Son application nécessite la considération d'une quantité de données importante et de nature variée, c'est pourquoi il fonctionne de manière pertinente en emboîtement à d'autres concepts dont l'échelle d'analyse est plus réduite (Cochet, 2011a ; voir Tableau 3). L'échelle qui va nous intéresser plus particulièrement est celle du **système de culture**, défini comme suit :

Un « sous-ensemble du système de production et défini, pour une surface de terrain traitée de manière homogène, par les cultures pratiquées avec leur ordre de succession et les itinéraires techniques (combinaison logique et ordonnée des techniques culturales) mis en œuvre. »
(Sébillotte, 1976 ; in Cochet, 2011b)

Il s'agit donc d'une conceptualisation agronomique des logiques technologiques appliquées par les agriculteurs à des parcelles cultivées de manière identique, qui répondent à des objectifs de production précis (Papy, 2013). Ou autrement dit : « *un outil efficace de compréhension de ce qui se passe "au champ"* » (Cochet, 2011b). À l'échelle d'une exploitation agricole, plusieurs systèmes de cultures peuvent donc coexister. Pour François Papy (2013), ce système doit être étudié de concert avec les techniques d'aménagement de l'espace « *qui ne se déroulent pas au fil du temps, mais marquent des étapes dans la transformation des milieux* », qui y sont intimement associées (p. ex. défrichage, drainage, terrassement, parcellarisation, etc.). Ce qui équivaldrait, en quelque sorte, à adopter une position intermédiaire entre l'analyse du système de production et celui du système de culture (Tableau 3). Exception faite, comme nous allons le voir, du défrichement, qui occupe dans de nombreux systèmes de cultures une place tout à fait singulière.

La définition des « *types de champs* », concept parent de celui du *système de culture* (De Schlippé, 1956 ; in Cochet, 2011a), repose sur une notion qui sera dans ce dernier, reléguée au second plan : celle du « *fond écologique spécifique* » dont les caractéristiques du champ ne sauraient être dissociées. L'abandon du concept de type de champs s'explique selon toute vraisemblance, par une théorisation implicitement orientée vers l'analyse de systèmes de cultures « modernes » et donc le plus souvent « permanents » (Papy, 2013 ; voir également la place du milieu dans le modèle de Sébillotte, 1992). Dans un tel contexte, les procédés d'ouverture de la parcelle sont relativement négligeables en comparaison des opérations culturales réitérées au fil des cycles de succession. Ce sont alors des phénomènes cumulatifs et des rétroactions qui prennent le pas, dans l'évolution générale des champs cultivés. Au contraire, dans le cas d'une mise en culture temporaire, opérée sur un terrain qui ne l'est pas déjà, cette étape d'ouverture devient centrale. La nature et l'état physique du terrain (végétation et sol) vont constituer les obstacles fondamentaux auxquels les cultivateurs feront face.

Dans les conditions de l'agriculture préindustrielle, quels moyens les agriculteurs ont-ils à leur disposition, mais surtout, par quels procédés peuvent-ils surmonter ces obstacles ? Mettons ici de côté les opérations d'aménagement « lourdes » (terrassements, transports de terres) qui traduisent sans nul doute une volonté de production et de valorisation dans une perspective à moyen ou long terme, ou sont liées à des terroirs spécifiques (Blanchemanche, 1991), pour nous concentrer sur l'objet champ si l'on peut dire « ordinaire ». Les classifications des techniques d'agriculture selon divers critères peuvent nous apporter des informations intéressantes, mais nous présenterons, dans un premier temps, la classification qui sert encore souvent de modèle général aux archéologues.

Tableau 3 : Objets, concepts et emboîtement d'échelles des analyses systémiques des agricultures d'après Hubert Cochet (2011b).

Concept	Système agraire		
	Système de production (<i>farming system</i>) /système d'activités		Village / région / nation
	Système de culture /système d'élevage	Exploitation agricole	
Objet/échelle d'analyse	Parcelle/ troupeau	Exploitation agricole	Village / région / nation
Type d'analyse	Agro-écologique (bio-technique)	Agro-socio-économique	Agro-géographique et socio-économique

1.3. Une classification économique des agricultures et quelques amalgames communs

S'il est un modèle, ou plus justement une classification, à laquelle les archéologues font souvent référence, c'est bien celle proposée par Ester Boserup (1965). D'ailleurs, le schéma d'opposition binaire des agricultures néolithiques reprend en fait *grosso modo*, explicitement ou non, les extrêmes de cette classification (p. ex. : Bogaard, 2004b ; Praud et Martial, 2015 ; Pétrequin, Pétrequin et Schaal, 2016 ; Guilaine, 1991). Elle est organisée selon un gradient théorique d'intensité croissante de l'utilisation des sols, c'est-à-dire de la fréquence des récoltes à l'échelle d'une parcelle cultivée, ou inversement d'une diminution de la période de non-culture. Cette classification s'ordonne telle que nous le résumons dans le Tableau 4 : avec l'*abattis-brûlis* qui correspondrait au mode de culture dit à jachère-forêt, et les *champs permanents* qui correspondraient à un système de récolte annuelle (ou multiple). Il est indispensable de rappeler que cette classification prend le parti de simplifications orientées dans le but de faire une analyse économique de la question agraire. Cela implique que les techniques agricoles – même si de nombreux exemples parsèment la démonstration de l'auteure – ne sont prises en compte que d'un point de vue secondaire, ou généralisé à l'extrême.

Un exemple flagrant en est l'usage erroné du terme de jachère, amalgamé à celui de friche, bien que la distinction a été clairement analysée (Sigaut, 1975, 1993 ; Sigaut et Morlon, 2008a ; Viader, 2014). Au sens commun, la **friche** est une « *formation végétale résultant de l'arrêt des cultures* », « *terre vierge ou (le plus souvent) laissée à l'abandon* » (TLFi), soit une formation naturelle de succession secondaire au sens large, ligneuse ou non (Morlon, 2012b ; Rameau, 1999). Néanmoins, dans les textes historiques, la friche faisait également, et semble-t-il très souvent, référence à des prairies spontanées (naturelles), voire semées (artificielles). Mais surtout, qu'il s'agisse de terrains envahis boisés ou non, le terme indiquait des terrains pâturés, tout à l'inverse du sens actuel de la friche (Morlon, 2012b). Ainsi, c'est bien logiquement que le terme défricher avait pour sens l'action de « *retourner une prairie* » (Sigaut et Morlon, 2008a).

La **jachère**, dans son sens actuel, est peu ou prou synonyme de ce dernier : « *État d'une terre labourable qu'on laisse reposer temporairement en ne lui faisant pas porter de récolte afin qu'elle produise ensuite abondamment* » et par extension une « *terre abandonnée, mal entretenue* » (TLFi). Cependant, dans son sens historique, la jachère se réfère à « *l'ensemble des labours successifs de printemps et d'été destiné à la préparation des semailles d'automne* » et aux « *terres qui sont en train de recevoir cette préparation, après le premier labour et jusqu'aux semailles* » (Sigaut, 1977, 2007). Le nombre de labours est variable, souvent de trois, mais pouvait atteindre une dizaine (ibid.). Ils visaient non seulement à ameublir la terre pour préparer la culture, mais leur fonction première est l'élimination des mauvaises herbes²¹. C'est dire à quel point le terme de jachère recouvre un sens différent (Sigaut et Morlon, 2008a ; Donadieu, 1993). C'est la définition historique de la jachère que nous retiendrons, dans le cas contraire nous l'utiliserons entre guillemets (voir § suivant).

Cet amalgame est – malheureusement encore fréquemment – à l'origine de nombreux contresens et d'incompréhension des pratiques agricoles²². Mais dans le cadre d'une classification des systèmes d'agriculture, cela devient assez problématique (Sigaut et Morlon, 2008a). Dans le détail, d'autres confusions font jour dans cette classification, comme la considération que des terres non cultivées sont des terrains non exploités, alors que dans de nombreux systèmes, les friches servent à l'alimentation du bétail et/ou la production de fumier. On pourrait aussi mentionner la vision réductrice de l'outillage (absence de l'araire ou non distinguée de la charrue ?) et de l'écosystème initial de la culture.

Par ses raccourcis et ses simplifications (néanmoins indispensables pour modéliser), la porte est ouverte à des théories générales qui, d'apparence seulement, tombent sous le sens. Nous pensons en particulier à celle du phénomène millénaire de raccourcissement du temps de « *jachère* » (au sens de friche) depuis le néolithique (Boserup, 1965, chap. The historical sequence). Selon cette théorie, l'évolution d'un système d'abattis-brûlis néolithique aux systèmes sans « *jachère* » se serait opérée par une réduction progressive du temps de retour sur les anciennes parcelles cultivées. Ainsi, les forêts primaires auraient laissé la place à des boisements secondaires puis des végétations buissonnantes et ainsi de suite à des milieux de plus en plus ouverts (Tableau 4). Mais outre ce qui est une réalité historique à partir de la fin du Moyen-Âge (Mazoyer et Roudart, 1997, p. 313-332), où les systèmes d'assolement avec jachères véritables seront progressivement remplacés par d'autres sans jachère, via l'intégration de nouvelles cultures (prairies artificielles, fourragères), rien de tel ne supporte la théorie d'E. Boserup pour les périodes plus anciennes. Nous avons déjà évoqué les difficultés à identifier l'abattis-brûlis pour les périodes anciennes, et il faut bien avouer que la question de la transition vers les systèmes à jachères (à l'âge du fer ?) reste mal connue.

Outre cela, cette classification place le milieu végétal comme une composante négligeable, et sous-entend qu'il n'y aurait pas de grandes différences techniques dans la difficulté de mettre en culture une

²¹ « *chaque façon détruisait les mauvaises herbes germées et ramenait à la surface d'autres graines pour les faire germer à leur tour, et ainsi réduire le stock de graines présent dans le sol* » (Sigaut et Morlon, 2008b).

²² Néanmoins cette distinction n'est pas acceptée par tous les agronomes, par exemple Michel Sébillotte (1977) use indifféremment du terme de jachère en justifiant qu'il recouvre dans tous les cas des moyens de restaurer la fertilité : il parle ainsi de jachère nue, jachère naturelle, jachère enherbée, jachère forestière...

forêt primaire, un taillis, un fourré ou une prairie, au-delà de l'opposition charrue/emploi du feu. Mais ce qui est flagrant, c'est qu'à travers plusieurs exemples, E. Boserup dévoile le caractère réducteur de son propre modèle. Un certain nombre de critiques ont déjà été faites à cette classification, mais compte tenu de son impact sur les modèles archéologiques des agricultures anciennes, il nous semblait important d'y revenir (voir : Grigg, 1979 ; Morrison et al., 1996). Dans le cadre d'une analyse des techniques, cette classification se montre peu adaptée. Elle nous a cependant permis d'entamer un aspect central des agricultures préindustrielles, celui de la permanence des champs.

Tableau 4 : Classification des systèmes d'utilisation du sol en agriculture selon Ester Boserup (1965 ; Mise en forme C. Menbrivès).

	Durée de culture	Durée de jachère (repos)	Milieu végétal associé	Outillage
Culture à jachère-forêt	1-2 ans	> 20-25 ans	forêt secondaire	hache, feu, bâton à fourir
Culture à jachère-buisson	1-2 à 6-8 ans	6-10 ans	buissonnant-arbustif	houe, feu
Culture à jachère-courte	(?)	1-2 ans	herbe	charrue
Récolte annuelle	annuelle (fourrages/herbages compris)	plurimensuelle	-	charrue
Récolte multiple	> 2 récoltes/an	mensuelle-négligeable	-	charrue

1.4. Culture permanente, culture temporaire : antagonisme, complémentarité et techniques culturales

Pour avancer dans la définition des agricultures anciennes, il est un point qui apparaît crucial, c'est celui des méthodes de renouvellement ou de maintien de la fertilité, à disposition des agriculteurs. Ces méthodes sont étroitement liées à la dynamique temporelle des espaces cultivés. Récemment, Roland Viader (2014) a résumé avec justesse les problèmes de définition autour des notions de *cultures temporaires* et de *cultures permanentes*. Il propose une redéfinition claire et tranchée, qui met l'accent sur leurs spécificités techniques, que nous résumons dans le Tableau 5. Le critère discriminant majeur est celui de l'existence ou non d'années de friche, intercalées dans les successions culturales. La *friche* doit alors être prise dans un sens large, incluant tant les végétations herbacées que les végétations ligneuses secondaires (buissons, bois). Sans oublier que les végétaux de ces friches pouvaient être exploités de diverses manières, il ne s'agissait donc pas forcément de parcelles abandonnées, mais qu'il faut plutôt considérer comme « en repos » (Antoine, 2014 ; Morlon, 2012b ; Schroeder, 2014). Pour les *cultures temporaires*, la fertilité du champ est renouvelée lors du défrichage avec la réincorporation de la biomasse végétale qui s'est naturellement développée. Elles se distinguent donc des *cultures*

permanentes, dont la fertilité est assurée par les fumures, et les labours (jachère) qui outre l'élimination des mauvaises herbes et la préparation du lit de semences, visent à intégrer les matières fertilisantes au sol (Sigaut, 1977 ; Sigaut et Morlon, 2008a). Afin que la fertilité des cultures permanentes soit maintenue, il y a inévitablement un transfert de fertilité qui doit s'opérer à l'échelle du système de production. Avant l'apparition de la faux à l'âge du Fer (Nillesse et Buchsenschutz, 2007 ; Sigaut, 2003a), permettant l'exploitation à grande échelle du foin, le fourrage provient certainement pour l'essentiel des feuilles d'arbres récoltées en rameaux (le « *feuillard* » ; Sigaut, 1987, 2003a ; Petit et Watkins, 2004). Cette récolte peut advenir en forêt, sur des friches ligneuses, des arbres isolés, des haies, mais il peut aussi s'agir d'une véritable sylviculture (« *prés boisés* » ; Rackham et di Stefano, 1982 ; Sigaut, 1987 ; Moreno et Poggi, 1998 ; Halstead, 1998). Mais la récolte de végétaux dans les friches ne s'arrêtait pas là : en forêt, la litière du sol, les branches mortes, mais aussi divers buissons et autres plantes (fougères, ajoncs, buis, etc.) pouvaient être récoltés comme engrais ou pour produire le fumier (le « *soutrage* » ; Sigaut, 1975).

Tableau 5 : Définition des techniques culturales temporaires et permanentes selon Roland Viader (2014 ; Mise en forme C. Menbrivès).

	Cultures temporaires	Cultures permanentes
Mode de renouvellement de la fertilité	Friche (régénération végétale post-culturale)	Fertilisation (fumure animale ou végétale, parcase)
Travail de la terre	Défrichements réguliers	Labours répétés
Exemples	Abattis-brûlis Écobuage Cultures avec herbages	Assolements biennal, triennal quadriennal

Nous comprenons alors que les friches jouent un rôle de premier plan pour fournir les matières organiques nécessaires aux champs cultivés de façon permanente, de manière plus ou moins directe (parcase, prélèvement de la végétation pour le fourrage ; Sigaut et Morlon, 2008a). Le Tableau 6, tiré de F. Sigaut et P. Morlon (2008), récapitule les effets de différents types de pâturage, sur la fertilité des terrains. Il faut évidemment considérer le cas de la stabulation (Poirier et Nuninger, 2012 ; Ouzoulias, 2006). Mais s'il est certainement le plus efficace, car il permet de produire un fumier véritable et en quantité, il demande une charge de travail autrement plus importante, et pose surtout le problème des moyens de transport (volumes de matière et nombres de déplacements ; Mazoyer et Roudart, 1997, p. 223-225 et 263-266). Au contraire des méthodes de pâturage précédentes, le transfert de fertilité à l'échelle du terroir exploité est maximum, et cette pratique s'inscrit dans des systèmes de production bien différents. D'autre part, il faut bien considérer que le nourrissage du bétail avec du feuillard n'est pas une pratique strictement liée à la stabulation.

Ainsi, les friches, milieux résultants de l'arrêt des cultures, qui caractérisent donc en règle générale les agricultures temporaires, constituent un potentiel de ressources non négligeable pour les cultures permanentes d'un même terroir. De plus, la remise en culture de ces friches permet judicieusement

« *d'étendre les emblavures sans réduire la productivité des secteurs de culture permanente* » (Viader, 2014). Deux remarques conclusives de l'auteur à propos de l'organisation des agricultures médiévales et modernes, mais qui nous paraissent tout à fait judicieuses pour des systèmes agraires plus anciens encore, méritent d'être prises en compte. D'abord :

« À l'inverse de ce qu'avance la théorie classique, tout semble indiquer que les cultures temporaires n'étaient pertinentes qu'à partir du moment où les cultures permanentes ou semi permanentes ne l'étaient plus. Autrement dit, il y a quelques fortes raisons d'avancer que ce n'est pas en tant que stade primitif que devraient être envisagées les cultures temporaires, mais bien au contraire, comme l'une des voies de l'intensification de la production » (ibid., p. 24).

Et le contrepoint :

« Il y avait d'une part des systèmes cultureux où le défrichement était une exception et une conquête, et d'autre part des systèmes cultureux pour lesquels, au contraire, le défrichement était un fait de structure banal et inlassablement répété » (ibid., p. 29).

Cette seconde conclusion rejoint tout à fait celle de François Sigaut, à propos de l'abattis-brûlis, qui propose de distinguer les « *systèmes autonomes* » où cette méthode fournit l'essentiel des ressources alimentaires, des « *systèmes d'appoint* » où la majorité des ressources provient de champs permanents (1975, p. 121-124 ; voir aussi p. ex. : Confino, 1969 ; Conesa, 2014 ; Schroeder, 2014).

Tableau 6 : Influences des pratiques de pâturage sur la fertilisation (d'après Sigaut et Morlon, 2008b, p. 43).

Type de pratique		Effet sur la fertilité du terrain
Pâturage sans apport de fourrage	Pâturage jour et nuit	À court terme, « fertilisation » (accélération du recyclage des éléments) À long terme, appauvrissement
	Pâturage le jour de bétail parqué ailleurs la nuit	Appauvrissement
	Parcage de nuit de bétail pâturant ailleurs de jour	Fertilisation
Pâturage avec apport de fourrage		Fertilisation, si la quantité de fourrage apportée est importante
Cas particulier : pâturage de chaumes qui, autrement, seraient enlevés du terrain		Moins d'exportation, ce qui revient à une fertilisation

Néanmoins, F. Sigaut (1975) ne place pas la limite temporaire/permanent au même endroit que le définit R. Viader (2014), car il y inclut, outre un rapport relatif entre la durée des cultures et celles de non-culture, une distinction entre les *friches* et les *herbages*, ces derniers étant considérés au même niveau d'importance que les cultures. Il précise toutefois bien que les limites de durée qu'il donne n'ont pas une valeur absolue, et que toutes les transitions sont dans les faits possibles (ibid. p. 121-131). La distinction qu'il propose peut se résumer ainsi :

- Les *systèmes de culture temporaire*, où la période de friche est largement supérieure à celle de la durée d’usage de la terre (cultures et herbages confondus). Soit rarement plus de cinq ans de culture pour une à plusieurs dizaines d’années de friche.
- Les *systèmes de culture permanente*, où les terres restent en usage. La période de culture à proprement parler (en vue d’une récolte) est alors supérieure ou du même ordre de grandeur que celle de non-culture (herbages).

Dans le Tableau 7, nous avons formalisé de manière synthétique les résultats de F. Sigaut. Nous voyons ainsi qu’il regroupe en « *systèmes de culture permanente avec herbage* » des agricultures qui sont pour R. Viader des *cultures temporaires*, mais en précisant bien que se sont des systèmes qui reposent sur des défrichements périodiques. Si l’on peut évidemment discuter de la pertinence ou non de ce choix²³, l’essentiel n’est pas là. En réalité, F. Sigaut ne cherche qu’à pousser plus avant le problème technologique des méthodes de défrichement, qui concrètement, n’auront pas le même intérêt ni la même efficacité selon le milieu végétal et la nature du sol où ils seront opérés. Et dans ce cas précis, c’est pour y distinguer parmi les différents systèmes cultureux, ceux favorables au développement de la **pelouse** (étym. : vers 1582, forme dialectale de l’ancien français *peleus* « gazon », latin *pilosus* « poilu, velu ») ou du **gazon** (étym. : Fin XVI^e ; *wason*, 1178 ; *gason*, vers 1213 ; francique *waso* « motte de terre garnie d’herbe »). Celui-ci n’étant pour F. Sigaut, pas seulement une formation végétale herbacée spécifiquement dense et fibreuse, mais un véritable matériau avec des caractéristiques physiques propres, intermédiaires entre celles de la tourbe et de la terre²⁴ (1975, p. 182-186). Ainsi, son exploitation nécessite un savoir-faire et des procédés adaptés²⁵, soit très compendieusement : trancher et soulever (Portères, 1972).

Il faut considérer que ce type de formation végétale (naturelle et/ou anthropique ? Leuschner et Ellenberg, 2017, p. 600-607 ; Dutoit et al., 2009 ; Bal, Allée et Liard, 2015) possédait une importance certaine dans plusieurs systèmes agro-pastoraux historiques. De plus, selon les contextes édaphiques, même sans pâturage, ce milieu peut persister plusieurs dizaines d’années et bien plus encore, avant de commencer à être colonisé par une végétation ligneuse (Leuschner et Ellenberg, 2017, p. 584-586 et 708). Les processus dirigeants ces successions végétales sont complexes, mais il est clair que la densité du tapis herbeux limite leur installation et la germination de la banque de graine. Cela étant, pour être défrichés, les moyens employés ne sont logiquement pas les mêmes que ceux qui sont pertinents pour une végétation forestière. Et cela vaut pour les techniques du feu, car effectivement, il en existe une inhérente au défrichement des gazons. C’est l’**écobuage**, entendu au sens « classique », qui vise à brûler

²³ Il peut évidemment paraître étrange de parler de systèmes de culture permanente avec des périodes de non-culture... Néanmoins il nous semble que R. Viader (2014, p. 19) fait sur ce point un mauvais procès de la thèse de F. Sigaut : la classification de ce dernier repose sur des distinctions de type de milieux végétaux et non de formes d’appropriation du sol (communaux/privatifs). Les classifications des deux auteurs divergent mais leurs points de vue ne sont pas fondamentalement contradictoires. D’autre part, on notera que certains auteurs choisissent de parler de systèmes cultureux semi-permanents, dont pour évoquer ces systèmes de cultures avec herbages (Schroeder, 2014 ; Devroey, 2014).

²⁴ D’ailleurs, le terme gazon désigne à la fois le milieu végétal et les carreaux de gazons détachés.

²⁵ A priori spécifiques aux agriculteurs-éleveurs ; du reste, l’exploitation des gazons n’est pas uniquement du ressort des techniques agricoles, car elle concerne notamment les techniques de façonnage des paysages ruraux et l’architecture (Blanchemanche, 1990 ; Sigaut, 1981).

la couche superficielle du sol sous forme de fourneaux, technique que nous allons décrire plus en détail dans les parties suivantes (Partie 2-3.4, p. 69).

Tableau 7 : Classification des systèmes de culture comportant des défrichements (/déboisement) périodiques et des méthodes principales de préparation du champ associées, d'après François Sigaut (1975, p. 124-131 ; Formalisation et mise en forme C. Menbrivès)

Systèmes culturaux		Durées	Ferti- lisation	Méthodes de mise en culture privilégiées
Systèmes de culture permanente avec herbage	Systèmes céréaliers avec herbage	Herbage court	Possible	Jachère
		Herbage long		Jachère ou potentiellement écobuage
	Systèmes herbagers			Herbage >= Labours
Systèmes de culture temporaire	Systèmes prairiaux (milieu gazon)	Culture : 1 à 3-4 ans Friche : 10 à 30-50 ans	Non	Presque toujours par écobuage
	Systèmes forestiers (taillis ou forêt secondaire)	Culture : 1 à 3-4 ans Friche : 10 à > 50 ans		Abattis-brûlis

Dans les textes historiques, il est souvent difficile de savoir le sens exact que recouvrent les mots qui évoquent les pratiques agricoles (Burri, 2017 ; Viader, 2014). Faire la seule distinction entre des références à des emblavures temporaires de celles de champs permanents est un vrai problème²⁶. Néanmoins, au regard de la précieuse littérature qui aborde les techniques concrètes de préparation du champ, et même des textes historiques parfois peu précis, il paraît bien que l'usage du feu relève de l'universalité. Et cela, tout spécialement pour le déboisement ou le défrichement, tous deux temporaires. En effet, l'utilisation du feu (dont nous allons voir ensuite qu'elles en étaient les manières) permet une élimination rapide et effective des différents obstacles à la culture, et dans le même temps, offre une bonification immédiate au terrain, en particulier grâce aux cendres. D'ailleurs, comment auraient été réalisées ces ouvertures temporaires du milieu sinon « par le feu » ? Les historiens ruralistes sont, à notre connaissance, peu prolixes sur ce sujet. Une jachère longue (de plus de douze mois) est

²⁶ « L'historiographie, ce faisant, incline à considérer par défaut toute mention d'essart comme un indice de défrichement permanent et à n'accepter l'idée d'emblavures intermittentes que lorsque celles-ci sont dûment avérées. Ce traitement différencié, faut-il le souligner, ne peut qu'entraîner une grave sous-estimation des pratiques de cultures temporaires » (Viader, 2014, p. 15)

évidemment possible pour remettre en culture une ancienne pâture, quoi que en l'absence d'outils tractés (et surtout de charrue, l'araire étant peu adapté à ce type de travail), une telle opération devait être particulièrement coûteuse par rapport aux méthodes usant du feu (et même sans employer le feu comme agent principal, il pouvait toujours trouver une place secondaire via par ex. des brûlages en tas ou un feu courant ; Sigaut, 1975, p. 89-97). Mais quid, par exemple, dans le cas de landes broussailleuses acides (ou les ravageurs de culture peuvent particulièrement pulluler ; *ibid.*) ou tout autrement, d'une forêt dense ?

Enfin, un autre caractère souvent mentionné vis-à-vis des champs temporaires, est celui que leurs rendements seraient souvent assez élevés, au moins pour la première année, mais en tout cas rarement moindre (ou seulement de peu), par rapport aux systèmes permanents (Beaudouin, 2014 ; Conesa, 2014 ; Saavedra, 2014). C'est un point qui est difficile à aborder à travers les archives historiques, en particulier car la nature des terres cultivées dans l'un ou dans l'autre système n'est pas forcément comparable (fertilité foncière variable), quand encore il est possible de l'établir. Néanmoins, un accroissement des rendements paraît pouvoir se justifier assez logiquement du fait de l'enrichissement en cendres. Le lien n'est pas toujours clairement établi, mais il ne fait pas de doute qu'il joue ici un rôle primordial. Par ailleurs, les expérimentations actuelles d'abattis-brûlis en Europe semblent confirmer ce phénomène (Schier et al., 2013).

1.5. De l'utilité des sources agronomiques modernes

Après avoir exposé ces différents éléments – dont certains (et d'autres encore) mériteraient sans aucun doute plus de détail – il apparaît que les modèles proposés pour le Néolithique sont souvent trop simplistes et sur certains points assez peu consistants vis-à-vis des réalités historiques de l'agriculture (p. ex. l'hypothèse d'un unique système de culture permanente et intensive pendant près de dix siècles voire plus), dont nous n'avons fait qu'effleurer la complexité. D'une part, il apparaît que la notion même d'agriculture « permanente » reste assez subjective et qu'en elle-même, elle ne nous renseigne en rien sur les spécificités des agricultures préhistoriques : techniques de culture, méthodes de renouvellement de la fertilité, milieux physiques, etc. D'autre part, on voit qu'au sein d'un même système, les cultures permanentes et temporaires peuvent osciller entre antagonisme et complémentarité. D'un côté, les cultures permanentes peuvent judicieusement profiter des produits des friches pour le renouvellement de leur fertilité, et donc implicitement des cultures temporaires. Même minoritaires, elles peuvent donc avoir un rôle primordial et parfois même, indissociable des cultures permanentes. D'un autre côté, des systèmes où les emblavures temporaires fournissent la majorité des ressources agricoles n'excluent pas non plus l'existence de champs permanents, et notamment de jardins potagers. Ces observations ne font que confirmer le manque de pertinence de vouloir démontrer à tout prix l'existence d'un système (« jardinage intensif ») sans en avoir précisé les modalités effectives, sans considérer leurs possibles interrelations, et surtout l'éventail des autres possibilités.

Il y a donc un décalage très net entre les problématiques archéologiques relatives aux agricultures préhistoriques et les problèmes concrets que pose l'agriculture, vue à travers les textes historiques modernes et médiévaux. Évidemment les matériaux qui nous renseignent ne sont ni de même nature ni d'un même ordre de précision. Néanmoins, est-il encore pertinent aujourd'hui de s'appuyer presque

exclusivement sur des modèles d'agriculture pour une large part (ou uniquement) fondés à partir des données archéologiques et paléoenvironnementales elles-mêmes, plutôt que de s'aider des connaissances acquises sur des systèmes existants ou ayant existé (aussi partielles que ces données soient) ? Dans d'autres domaines archéologiques, les chercheurs ne rechignent pourtant pas à s'appuyer sur l'ethnographie, qui du reste concerne souvent des milieux géographiques assurément bien différents de nos contrées. Il est évident que les connaissances agronomiques modernes ne sont pas aptes à résoudre tous les problèmes que posent les agricultures préhistoriques, mais elles nous apparaissent comme des bases solides et pertinentes (contextes géographiques similaires, agricultures non ou peu mécanisées, grande précision de certains textes) et encore largement sous-exploitées.

Avant de regarder de manière détaillée ce que ces sources historiques nous apprennent sur les usages du feu dans les agricultures préindustrielles, et d'en tirer quelques conclusions pour les approches géoarchéologiques, il nous est nécessaire de rappeler quelques notions générales sur le feu. Dans la partie suivante, nous présentons donc une synthèse sur les mécanismes et les impacts physiques engendrés par les feux naturels.

2. Les feux de végétation naturels

2.1. Le feu et les incendies naturels de végétation : mécanismes de la combustion et principes généraux

Le feu, ou la combustion, est un phénomène qui consiste en la transformation d'un combustible en présence d'oxygène (comburant) sous l'effet de la chaleur, en énergie thermique accompagnée d'eau (vapeur) et de dioxyde de carbone (Pyne, Andrews et Laven, 1996 ; Scott, 2000 ; Scott et al., 2014b). Pour ce qui est des incendies de végétation, le combustible est donc essentiellement formé de cellulose et d'hémicelluloses (glucides) et de lignine (Gobat, Aragno et Matthey, 2003, p. 24). La combustion est un processus chimique d'oxydation exothermique, c'est-à-dire que la chaleur produite est supérieure à la chaleur initiale requise, et qui plus est très rapide, ce qui entraîne une réaction en chaîne. Autrement dit, une fois initié, et dans des conditions globalement similaires ou, disons relativement stables, le phénomène continuera tant que du combustible et de l'oxygène seront disponibles. Toute réserve gardée vis-à-vis de leurs dynamiques respectives, la combustion peut en quelque sorte être considérée comme le pendant inverse de la photosynthèse (Pyne, Andrews et Laven, 1996 ; Scott et al., 2014b) :

- Photosynthèse : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Énergie solaire} \rightarrow \text{O}_2 + \text{Glucides (cellulose, etc.)}$
- Combustion : $\text{Combustible} + \text{O}_2 + \text{Chaleur initiale} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Énergie thermique}$

Hors intervention humaine, volontaire ou non, l'occurrence des incendies de végétation nécessite une source de chaleur initiale suffisamment élevée (Scott, 2000 ; Scott et al., 2014a). Les impacts de foudre sont la principale cause naturelle d'ignition. À celle-ci s'ajoute autant des phénomènes énergétiques de grande ampleur comme l'activité volcanique ou l'impact d'une météorite, que la simple étincelle résultant d'une chute de pierres. Le déclenchement et la diffusion des incendies dépendent d'un grand nombre de paramètres, qui s'exercent à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces

paramètres sont relatifs au contexte physique et environnemental (topographie, altitude, hydrographie, végétation potentielle, etc.), aux conditions climatiques et météorologiques (latitude, température, précipitation, vent, etc.), et au combustible (type, état, humidité, volume, répartition, etc.). L'interaction de ces composantes est à l'origine d'une inflammabilité de la végétation et donc de régimes de feu (définis par leur comportement, récurrence, extension, etc. ; voir plus bas) très variables à l'échelle du globe, mais également sur le temps long (Power et al., 2008 ; Whitlock et al., 2010 ; Marlon et al., 2013 ; Curt et al., 2022 ; Vannière et al., 2016).

De façon théorique, trois principaux types de feu sont distingués selon le combustible affecté (Figure 11) : les feux de surface (végétation de surface, litière), les feux de cimes (végétation aérienne) et les feux de (sous-)sol (Davis, 1959 ; Scott, 2000). Ce dernier type de feu concerne les horizons de surface humifères (horizons organiques O) et tout spécialement la tourbe, matériau largement organique, mais néanmoins poreux, ce qui permet la disponibilité en oxygène indispensable à la combustion. Il est cependant évident que ces différents milieux ne sont pas clos : tant que les conditions sont favorables, le feu peut théoriquement se propager entre eux (Pyne, Andrews et Laven, 1996 ; Irannezhad et al., 2020 ; Rein, 2009, 2013). Néanmoins, les tourbières sont aussi aptes à supporter des feux de surface sans que la tourbe ne brûle en profondeur (Lin et al., 2019).

Deux formes principales de combustion sont reconnues : celles avec des flammes, soit au sens propre les feux flamboyants ou flambants (« *flaming fire* »), et celles sans flammes, ou autrement dit les feux consumants²⁷ (« *smoldering/smouldering fire* » ; Scott, 2000 ; Rein, 2013 ; Huang et al., 2016). Cette seconde forme concerne tout spécialement les couches humifères et les tourbes. Il s'agit d'une combustion lente, à relativement faibles températures en comparaison de celles avec des flammes (voir § suivant), comprises entre 300°C et des pics maximums pouvant atteindre les 600°C (Scott, 2000 ; Ryan et Koerner, 2012 ; Rein, 2013). Ajoutons une particularité à ce type de matériaux, c'est qu'ils peuvent subir une combustion spontanée, en fonction de leur température ambiante, leur proportion en matériau organique/inorganique, leur taux d'humidité et leur épaisseur (Restuccia, Huang et Rein, 2017 ; Yuan, Restuccia et Rein, 2021). Cette combustion résulte d'un auto-échauffement, conjoint à un empêchement de la dissipation de la chaleur. Pour que de tels phénomènes se produisent à des températures ambiantes (< 50°C), il semble que des volumes (épaisseurs) assez conséquents de tourbes soient nécessaires (ibid.).

Les incendies de surface se propagent sous la forme de fronts de flammes. Leur production est le fait des substances volatiles inflammables (monoxyde de carbone CO, méthane CH₄, ammoniac NH₃, etc.) qui s'échappent lors de la décomposition des composés organiques (Scott, 2000 ; Scott et al., 2014a ; Taylor et al., 2004). L'inflammation correspond à l'étape d'ignition. Cette dernière marque le passage entre les phases de préchauffage (déshydratation et torréfaction, phases endothermiques) et la pyrolyse (début de la phase exothermique, c'est-à-dire la combustion au sens strict). Elle intervient au-delà de 200 à 300°C environ, selon le type de molécule organique considérée (Beall, 1968 ; Byrne et

²⁷ Nous n'avons pas trouvé l'équivalent dans la littérature française, mais le verbe *consumation* nous paraît le plus approprié pour ce phénomène : « *Action de consumer quelque chose, de détruire quelque chose (comme) par le feu, progressivement et complètement* » (TLFi).

Nagle, 1997 ; Pyne, Andrews et Laven, 1996). Du fait de l'inflammation des composés volatils, les températures montent rapidement au-delà de 400°C, et atteignent couramment entre 700 et 1000°C dans les flammes (avec des pics qui peuvent dépasser les 1500°C ; Scott, 2000 ; Neary et al., 1999). Une fois la majeure partie des gaz volatilisés, leur concentration devient trop faible pour soutenir une flamme. Cette phase est marquée par la présence de braises et de fumées (« *glowing phase* »). Elle est observée après le passage du front de flammes de l'incendie. Elle est parfois indifférenciée de la combustion de type consumante, mais dans cette dernière, la dégradation thermique continue (Pyne, Andrews et Laven, 1996). La combustion peut se poursuivre jusqu'à ce qu'il ne reste plus que des cendres sensu stricto, à savoir la fraction résiduelle minérale du combustible. Elle peut alors être décrite comme complète. Au contraire, dans le cas où la quantité d'oxygène deviendrait insuffisante, la combustion est interrompue, et se forment les charbons de bois (et d'autres végétaux/organes). Certains archéo-anthracologues définissent cette combustion incomplète comme une calcination²⁸, et se réfèrent à la combustion complète sous le terme de comburation (Chabal et al., 1999).

Les transferts thermiques sont de trois types. Le rayonnement, qui se réalise indépendamment du milieu (propagation de photons). La convection, qui concerne les fluides (gaz et liquides) capables de se déformer (à une échelle de temps courte), est associée à un transfert de matière. La conduction, qui concerne elle aussi les fluides, mais surtout les solides, et n'opère pas de déplacement de matière : il s'agit d'un transfert d'énergie d'agitation thermique à l'échelle moléculaire (Musy et Soutter, 1991). C'est souvent ce dernier processus de propagation, qui prime dans les sols soumis à une chauffe, et qui va conditionner l'apparition et le développement des altérations physiques, identifiables (Neary et al., 1999). La conductivité thermique²⁹ exprime cette capacité d'un matériau à transmettre la chaleur (Bonneau, 1979 ; Musy et Soutter, 1991). Elle est assez variable selon la nature des matériaux comme l'illustre la Figure 12 (Musy et Soutter, 1991 ; Yun et Santamarina, 2008 ; Boyer et Dell, 1980). Outre les caractéristiques texturales et structurales des sols (densité, taille et agencement des particules), l'humidité apparaît comme un paramètre important, car elle facilite la diffusion de la chaleur en profondeur, mais peut en même temps atténuer une montée rapide de température, en surface du sol (Busse et al., 2010 ; Mataix-Solera et al., 2011 ; Scotter, 1970 ; Valette et al., 1994). Cela étant, les sols sont de manière générale, souvent considérés comme faiblement conducteurs.

²⁸ Il nous semblerait toutefois plus approprié de parler de carbonisation (« Transformation d'une substance organique en charbon » ; TLFi) pour évoquer ce processus de combustion interrompue, puisque la calcination se réfère spécifiquement à la transformation en chaux (ibid.).

²⁹ Quantité de chaleur qui traverse une unité de surface selon une unité de temps et sous un gradient de température donné.

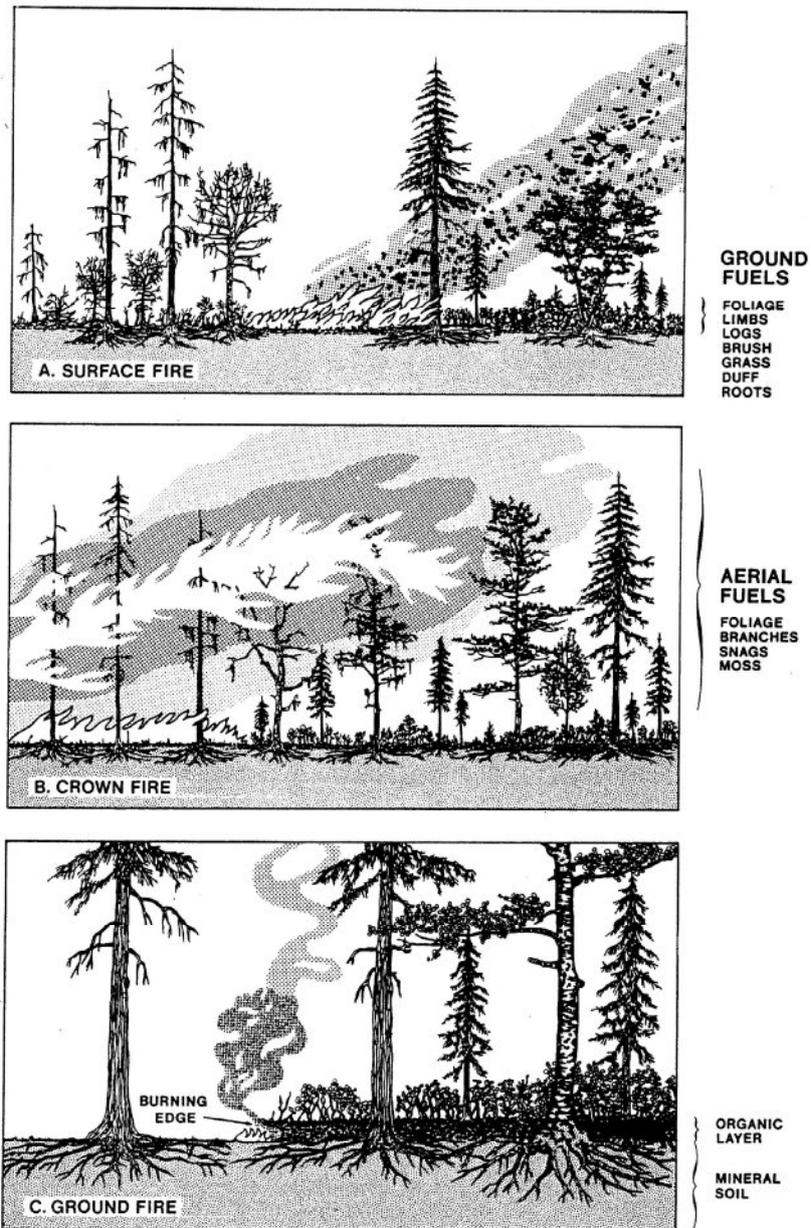


Figure 11 : Les types d'incendies de végétation et leurs combustibles (d'après Scott, 2000 ; et Davis, 1959)

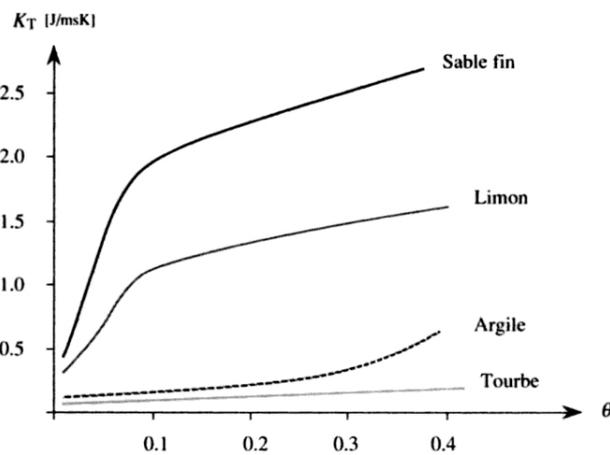


Figure 12 : Conductivité thermique (K_T) de quelques types de sols en fonction de la teneur en eau (θ) d'après Musy et Soutter (1991, p. 153).

2.2. Dynamiques et sévérité des feux : généralités et exemples

Pour définir les feux et leurs effets, il est convenu de distinguer deux principales notions. L'*intensité* du feu correspond au flux d'énergie thermique libéré lors du processus de combustion, qui d'un point de vue physique peut être quantifié de différentes manières (Keeley, 2009 ; Neary, Ryan et DeBano, 2005). La *sévérité* du feu mesure les pertes ou les changements des matières organiques en surface et dans le sol (ibid.). Par extension, les *réponses écosystémiques* post-incendie (érosion, régénération des communautés végétales, recolonisation faunistique, etc.) sont parfois incluses dans la notion de sévérité (Keeley, 2009 ; Neary et al., 1999). La sévérité est le plus souvent estimée après le passage du feu, sur la base de la nature des altérations observées sur le sol et/ou la végétation (nature et état des matières organiques résiduelles, quantités et couleurs des cendres, effets sur les horizons organiques ou minéraux, changement de couleur et de structure, hydrophobie de surface, profondeur des altérations, etc.), ainsi que leur récurrence et leur extension spatiale (Ryan et Noste, 1985 ; Parsons et al., 2010 ; Jain et al., 2012). Les notions d'intensité et de sévérité doivent être distinguées, car elles ne présument d'aucune relation de cause à effet directe. Par exemple, certains feux peuvent produire un front de flammes très élevé et se déplacer très rapidement, et sont alors d'une grande intensité, mais peuvent n'avoir que des effets très modérés ou même tout à fait négligeables sur le sol et la capacité de la végétation à se régénérer (p. ex. : Neary, Ryan et DeBano, 2005 ; Parsons et al., 2010, p. 3). Cela est notamment vrai pour les écosystèmes où les plantes ont développé des traits d'adaptation pour résister au feu, mais pas uniquement (Scott et al., 2014c). Autre exemple, des feux de forte intensité peuvent décimer des forêts en ne laissant les arbres que partiellement carbonisés, ce qui risque de favoriser un feu ultérieur encore plus dévastateur (Agee et Skinner, 2005).

Le *régime de feu* est un concept qui décrit les caractéristiques et les rôles du feu dans un écosystème spécifique (exprimés en termes de fréquence, de saisonnalité, de type, d'intensité, d'extension spatiale, etc.). Ces régimes découlent en partie du climat et de la nature de la végétation, mais aussi des effets de rétroaction entre ces derniers et les nombreux autres paramètres qui conditionnent le développement des feux (voir partie précédente). Comme nous l'avons dit, ces régimes peuvent grandement fluctuer sur un même espace, à l'échelle millénaire ou séculaire. Ces régimes, et en particulier les intervalles de retour de feu sur un même espace, ont un rôle notable dans la sévérité des feux. Mais les situations sont complexes, car elles dépendent comme nous l'avons vu plus haut, d'un grand nombre de paramètres, qui varient à différentes échelles spatiales et temporelles. Néanmoins, quelques règles, ou plutôt des tendances générales peuvent être énoncées. Il apparaît notamment que les feux les plus sévères sont surtout associés aux régimes où ils sont les moins fréquents (Scott et al., 2014d). Mais la réciproque n'est pas systématique. Dans des milieux prairiaux, il est très improbable que des feux de forte sévérité puissent advenir, car la biomasse produite est insuffisante pour créer de telles conditions. Les feux peuvent d'ailleurs y être fréquents, et se propager en surface en ayant un impact très limité sur la litière et quasiment aucun sur le sol (Neary et al., 1999 ; Scotter, 1970 ; Parsons et al., 2010). Cependant, si ces milieux herbacés sont en voie de recolonisation ligneuse et dans des conditions générales où les ignitions sont peu fréquentes (p. ex. climat humide), le combustible va progressivement s'accumuler au sol, et lorsqu'un feu se déclenchera, il sera plus susceptible d'avoir des effets graves. C'est dans les écosystèmes boisés, et surtout les plus denses, que les incendies les plus sévères sont généralement rencontrés. Cela s'explique par l'abondance du combustible potentiel, et notamment des bois morts, sur pied ou au sol, qui peuvent brûler de manière prolongée, et laisser des marques plus fortes.

2.3. Principaux produits et traces des feux naturels

À l'échelle d'un même incendie, les produits et les effets du feu peuvent être très variables. Le terme de mosaïque décrit avec justesse les paysages incendiés, où se juxtaposent à l'échelle d'une même station, des zones gravement affectées et d'autres, épargnées (Connor, Cannon et Carlevato, 1990 ; Rab, 1996 ; Kushla et Ripple, 1997 ; Parsons et al., 2010 ; Bodí et al., 2014). La combustion de la biomasse végétale va entraîner la formation de divers produits. Schématiquement, il peut être distingué ceux qui seront exportés dans le panache de fumée de l'incendie puis transportés par les courants aériens (micro-charbons, suies, aérosols, hydrocarbures aromatiques polycycliques, composés volatils, etc.), de ceux formés et déposés sur place (Bodí et al., 2014 ; Scott et al., 2000, 2014a ; Simoneit, 2002). Les trois principaux types de traces retrouvés après le passage du feu sont des cendres et des résidus carbonisés de différents types (dont les charbons), et des altérations physico-chimiques des sols. D'un point de vue géoarchéologique, en contexte tempéré humide et de plein air, ces dernières sont intéressantes, car elles sont marquées dans les sols et sont donc moins susceptibles d'être rapidement perturbées et remobilisées par les agents naturels, en comparaison des produits déposés en surface. De plus, la chauffe des sédiments peut leur permettre d'acquérir une certaine résistance mécanique aux altérations superficielles (Giovannini et Sequi, 1976 ; Giovannini et Lucchesi, 1983 ; Mallol et al., 2007 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017 ; Villagran et al., 2017).

La production de résidus carbonisés au cours d'un feu est très variable et difficile à estimer (Ohlson et Tryterud, 2000 ; Blackford, 2000 ; Bégin et Marguerie, 2002 ; Bal, 2006). Elle va notamment dépendre du type de feu, de son intensité et de l'état et la quantité de biomasses disponible. Par exemple, certains feux de forêt rapides n'affectent que superficiellement les troncs des arbres et carbonisent surtout les branchages de faible diamètre ou les plantes de port bas (Scott et al., 2000 ; Bal, 2006). Les organes végétaux carbonisés peuvent être de tous types : bois, branches, racines, écorces, feuilles, graines, fruits, etc. (Bégin et Marguerie, 2002 ; Scott et al., 2000). Néanmoins, sur les zones brûlées même, seuls les charbons de tissus ligneux ont en général une résistance mécanique suffisante pour être préservés à long terme. Mais ce caractère est aussi variable selon les essences de bois (dû aux différences de l'anatomie cellulaire) et les températures de carbonisation (Chrzaszew et al., 2014).

Les cendres, qui correspondent au sens strict à la fraction résiduelle inorganique, résultant de la combustion complète des végétaux³⁰, constituent un produit majeur des incendies. Elles exposent des colorations variées, principalement en fonction du type de combustible et de leurs températures de formation (Wattez, 1988, 1992 ; Bento-Gonçalves et al., 2012). De manière générale, du fait de la destruction progressive des matières organiques, les cendres qui résultent d'une combustion plus avancée ont tendance à être plus claires, blanchâtres (Figure 13.a)(Bodí et al., 2014 ; Pereira, Úbeda et Martin, 2012). Les cendres sont majoritairement constituées de silice (Si), sous forme de phytolithes, et de calcium (Ca), sous forme de pseudomorphoses d'oxalate de calcium en calcite (ou POCC ; Brochier et Thinon, 2003 ; Canti, 2003 ; Canti et Brochier, 2017). Les cendres de graminées sont largement formées de phytolithes, alors que les cendres de bois sont majoritairement constituées de

³⁰ Dans la littérature sur les effets des feux naturels, le terme cendre est parfois employé pour désigner l'ensemble des produits observés sur le terrain, incluant les matières organiques chauffées et celles carbonisées, charbons, suies (Bodí et al., 2014).

pseudomorphoses calcitiques. Mais les cendres végétales comportent aussi, en proportion variable, d'autres éléments minéraux secondaires. Elles sont en particulier relativement riches en phosphore (P) et en potassium (K) assimilables par les plantes, car ils sont relativement peu volatils (au contraire de l'azote (N) et du soufre (S), qui volatilisent à température inférieure ; Gillon, 1990 ; Certini, 2005 ; Bodí et al., 2014). Ces éléments chimiques, ainsi que le calcium, sont sous des formes facilement minéralisables ou déjà solubles, donc rapidement disponibles pour la croissance des végétaux. Les quantités de cendres produites dans des feux de forêt peuvent être localement très importantes, des couches mesurant jusqu'à une dizaine de centimètres sont documentées (Parsons et al., 2010). La concentration des cendres permet ainsi une augmentation immédiate et non négligeable du pH, et constitue une réserve en minéraux qui peut être valorisée plusieurs mois après leur formation (Gillon, 1990). Néanmoins, en contexte de plein air et de climat humide, les cendres sont particulièrement sensibles à l'érosion mécanique et éolienne, et sont habituellement rapidement dissoutes (Canti et Brochier, 2017).

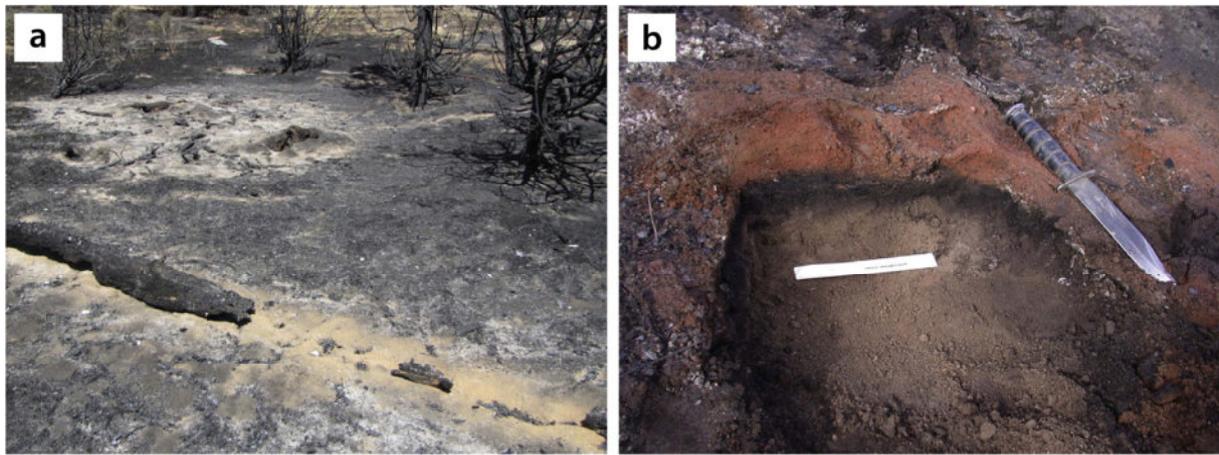


Figure 13 : Exemples d'altérations critiques observées dans des incendies de surface.

(a) Aire incendiée de haute sévérité, la surface du sol a été jaunie par la combustion d'un tronc. Au fond, une zone de cendres blanchâtres avec des trous de souches ayant été presque entièrement pyrolysées. Les arbres carbonisés encore en élévation sont des Pins *ponderosa* (incendie de Fourmile Canyon, Colorado, USA, Septembre 2010 ; crédits : Bento-Gonçalves et al., 2012)

(b) Coupe à travers une trace linéaire rubéfiée d'un tronc entièrement pyrolysé. Le niveau noir est carbonisé. Couteau de 30 cm (incendie de Stonewall Peak Cuyamaca Mountains, California, USA ; crédits : Goforth et al., 2005 ; Ulery et al., 2017)

Nous avons indiqué que les sols sont globalement réputés comme étant d'assez mauvais conducteur de chaleur. Ainsi, lorsqu'ils sont soumis à des feux de surface, les températures atteintes sont nettement inférieures à celles mesurées dans les flammes, et décroissent très rapidement en profondeur (selon une décroissance exponentielle ? Beadle, 1940 ; Scotter, 1970 ; DeBano, Dunn et Conrad, 1977 ; Rundel, 1983 ; Raison et al., 1986, 1986 ; Gillon, 1990 ; Bradstock et Auld, 1995 ; Neary et al., 1999 ; Penman, Lemckert et Mahony, 2006 ; Penman et Towerton, 2008 ; Mataix-Solera et al., 2011 ; Scott et al., 2014a, p. 17-18). Généralement, dès les premiers centimètres sous la surface, les températures chutent sous les 200°C. Les chauffés du sol les plus importantes, sont parfois reliées à la présence d'une litière épaisse (plusieurs décimètres), mais surtout de troncs ou d'amas denses de bois directement en contact avec le

sol, ou effondrés au cours de l'incendie. De manière simplifiée, la concentration du combustible permet un temps de chauffe prolongé, plus susceptible d'engendrer des altérations fortes. Celles-ci se manifestent le plus fréquemment sous la forme de traces rubéfiées à jaunâtres (voir Figure 13), et sont souvent superposées à un niveau fortement noirci (Connor, Cannon et Carlevato, 1990 ; Ulery et Graham, 1993 ; Meyer, Wells et Timothy Jull, 1995 ; Goforth et al., 2005 ; Neary, Ryan et DeBano, 2005 ; Parsons et al., 2010). Elles peuvent être masquées sous des concentrations de cendres ou charbonneuses, mais restent généralement très localisées. Schématiquement, les teintes colorées s'expliquent par une combustion oxydante où les matières organiques sont détruites, et le fer cristallise en de nouvelles formes d'oxydes (généralement de l'hématite de teinte rouge), alors qu'en profondeur, la présence insuffisante d'oxygène engendre des conditions réductrices et les matières organiques carbonisent, entraînant un noircissement (ibid.). Selon la nature de la surface du sol, la profondeur de ces deux faciès peut nettement varier. Les niveaux oxydés apparaissent souvent peu profonds, sur quelques millimètres, alors que l'altération noirâtre peut être épaisse de plusieurs centimètres (Mataix-Solera et al., 2011 ; Ryan et Koerner, 2012). La rubéfaction maximum documentée atteint tout de même presque dix centimètres (Ulery et Graham, 1993). Mais ces altérations ne se bornent pas à ces changements de couleur du sol, puisque ces dernières sont seulement l'expression physique d'une part des modifications géochimiques et minéralogiques plus complexes qui peuvent se produire (voir ci-après ; Ulery, Graham et Bowen, 1996 ; Cornell et Schwertmann, 2003).

À ces traces, il faut ajouter le cas déjà évoqué des souches et racines carbonisées en place (Figure 9, p. 29). Ces phénomènes sont mentionnés comme étant commun lors de feux de forêt de sévérité marquée (Neary, Ryan et DeBano, 2005). Ils semblent néanmoins surtout advenir dans les terrains montagneux, plutôt pentus ou suffisamment drainants, et affectent surtout les arbres sur pieds déjà morts, en voie de décomposition (Leslie et al., 2014). Ils concerneraient principalement des bois résineux, mais non exclusivement. À ce propos, il a été évoqué que la formation de poix lors de la pyrolyse des souches pourrait contribuer à alimenter le feu souterrain (Wendorf, 1982, p. 175). Ces combustions laissent typiquement des cavités racinaires latérales complètement ouvertes, ou dans certains cas, au contraire, leur sommet est presque immédiatement bouché, par l'effondrement de la terre autour de la souche (Leslie et al., 2014). Le feu peut là aussi engendrer une altération notable des sédiments (rubéfaction), essentiellement localisée à la circonférence des souches, mais cela n'est pas du tout systématique (Bellomo, 1993 ; Ffolliott et al., 2011 ; Moody et al., 2013 ; Goforth et al., 2005 ; Ryan et al., 2012). Des expérimentations de combustion de souches *in situ*, ont montré que les températures moyennes pouvaient rester très basses (200 à 250°C ; Bellomo, 1993). Bien que l'on dispose d'une bonne documentation visuelle sur ce type de traces, peu de travaux ont été menés sur leurs processus de formation (la littérature concerne surtout leurs conséquences hydro-géomorphologiques).

Avec l'augmentation des températures et le maintien de la chauffe, diverses modifications des matériaux organiques et minéraux des sols peuvent se manifester (Iglesias, Cala et Gonzalez, 1997 ; Reynard-Callanan et al., 2010 ; Bodí et al., 2014 ; Ulery et al., 2017). Les constituants chimiques peuvent être volatilisés, ou changer de forme, suivant différentes dynamiques en fonction de leur forme initiale. Inversement, de nouveaux constituants peuvent se développer (Figure 14). Les modifications sur la phase minéralogique argileuse et les oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium sont importantes, car elles peuvent advenir à partir de températures assez modérées (dès 300-400°C). Dans le détail, leurs

seuils d'altérations sont très variables selon leur composition exacte. Ajoutons que les modifications sur les sols ne sont pas limitées aux surfaces thermo-rubéfiées et carbonisées, mais peuvent se développer de façon discrète et extensive, que ce soit dans des environnements où les feux sont fréquents ou non (DeBano, Neary et Ffolliott, 1998). La faune du sol et les micro-organismes, concentrés dans les horizons humifères et organiques, sont généralement détruits à des températures comprises entre 50 et 200°C (Raison, 1979 ; Neary et al., 1999 ; Mataix-Solera et al., 2011). Puisqu'ils sont susceptibles à des températures de chauffe très faibles, la diffusion facilitée de la chaleur en contexte de sol humide peut leur être fatale. Le feu agit ainsi comme un stérilisant. La texture des sols peut être modifiée, devenir plus grossière par cimentation des particules fines (pseudo-particules). Des propriétés d'hydrophobicité peuvent apparaître ou être renforcées (par volatilisation/ condensation des substances organiques hydrophobes), en surface ou en profondeur, ce qui peut grandement modifier la circulation de l'eau (Neary, Ryan et DeBano, 2005 ; Scott et al., 2014a, p. 18-22). La stabilité structurale des agrégats peut s'accroître ou diminuer (Bissonais, 1996 ; Mataix-Solera et al., 2011 ; Thomaz, 2021).

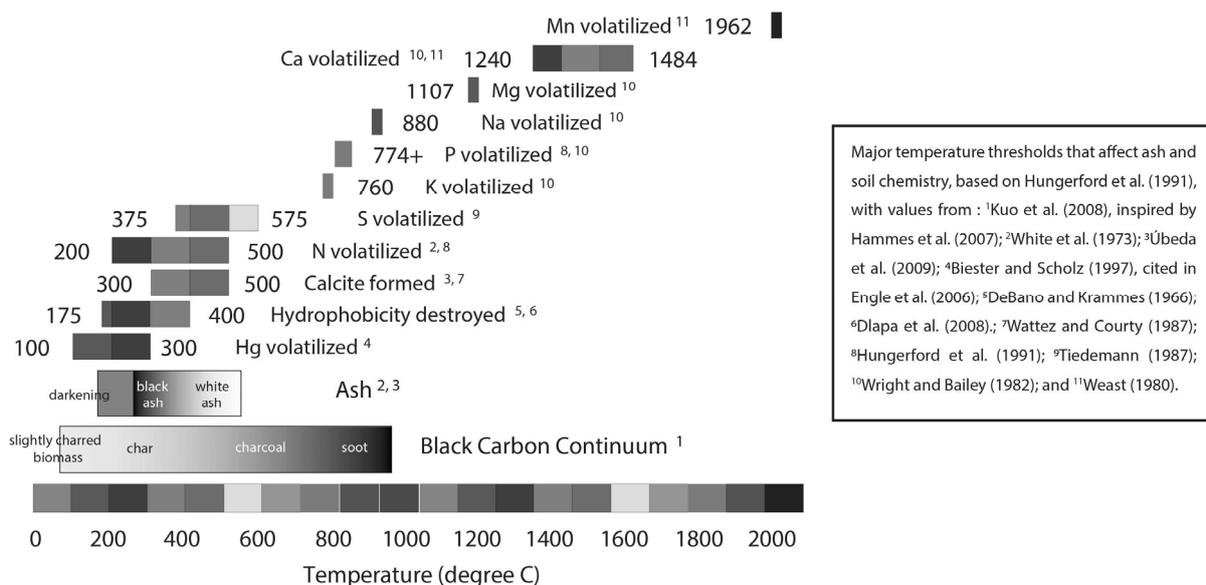


Figure 14 : Les seuils de températures affectant les cendres et les éléments chimiques du sol (modifié d'après Bodí et al., 2014).

Les feux consumants (*smouldering fires*), qui concernent en particulier les tourbières, constituent un cas assez particulier. Le processus même de la combustion diffère assez nettement de celui des feux de végétation de surface (voir Rein, 2009, 2013). En effet, même si les températures restent très basses, les produits organiques carbonisés (charbons) qui se forment au cours de la réaction de pyrolyse subissent un processus d'oxydation très progressif, directement sur leur surface réactive (ibid.). En termes de produits, ce type de feux a donc la particularité de ne théoriquement laisser que des cendres. Ils peuvent engendrer la formation de divers composés volatils, par ailleurs qui peuvent être assez toxiques, mais pas de suies, car les températures sont trop faibles. Dans les tourbières, la combustion se propage verticalement et horizontalement de manière extrêmement lente. Leur progression est

généralement stoppée à la rencontre d'un substrat inorganique (ou faiblement organique), d'une nappe d'eau ou d'une humidité trop importante du matériau. Les cendres restantes étant susceptibles de disparaître assez rapidement (par lessivage ou remobilisation hydromécanique), de tels événements peuvent n'être perceptibles qu'à travers un très mince niveau carbonisé, correspondant au niveau où le phénomène s'est interrompu (Figure 15), voire même ne peuvent tout simplement pas être identifiés macroscopiquement (Ellery et al., 1989 ; Davies et al., 2013 ; Zaccone et al., 2014). Dans le cas de niveaux tourbeux profonds et sous-surface, la combustion peut entraîner des paysages chaotiques, avec des effondrements désordonnés en surface des terrains, subséquents à la combustion quasi complète de la tourbe. Ces feux pouvant se produire à des profondeurs importantes, ils sont difficilement alimentés en oxygènes, mais les pertes de chaleur y sont également limitées. Ce type de feux n'est pas très bien connu, mais ils se rapprochent vraisemblablement des combustions assez particulières affectant les gisements de houille (Rein, 2013 ; Roy et al., 2014)

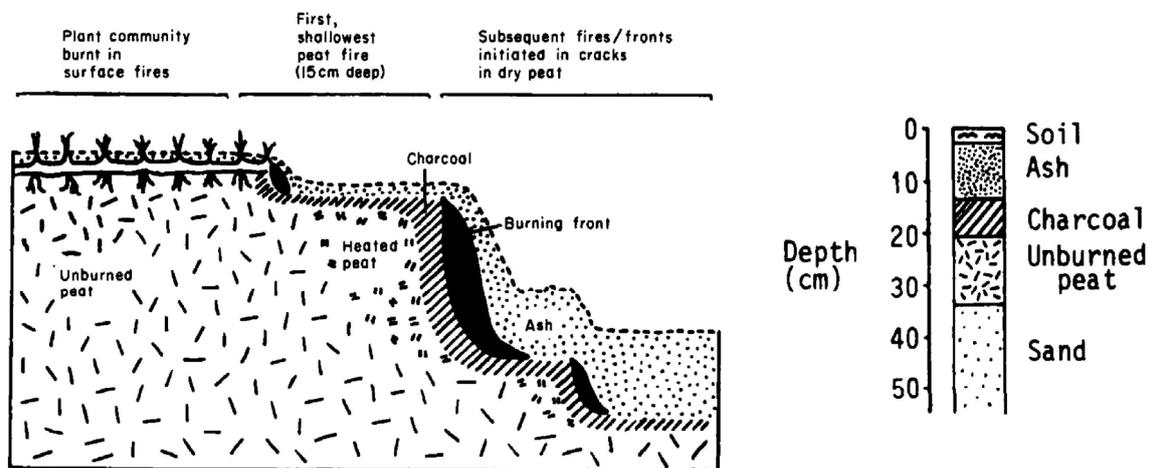


Figure 15 : Coupe schématique illustrant la dynamique d'un incendie de tourbe (gauche) et profil type observé dans une tourbière nouvellement incendiée et après consolidation des produits (d'après Ellery et al., 1989)

2.4. Des vestiges de feux particulièrement sévères ?

Par ailleurs, il convient de mentionner, que l'on trouve dans la littérature géoarchéologique, la documentation de traces attribuées à des feux de forêt naturels, qui se présentent sous la forme d'altérations particulièrement visibles (Figure 16). C'est le cas notamment dans l'archipel des Channel Islands en Californie, où elles ont fait l'objet de nombreux travaux, car leur origine est restée longtemps controversée (en particulier, car elles sont parfois associées à des restes de mammouths brûlés et d'incertains outils lithiques ; une origine « hydrodynamique » a également été envisagée ; voir : Orr et Berger, 1966 ; Wendorf, 1982 ; Cushing et al., 1986 ; Kennett et al., 2008 ; Rick, Erlandson et Vellanoweth, 2006 ; Rick, Wah et Erlandson, 2012 ; Pigati et al., 2014 ; Muhs, 2014). Elles se manifestent sous la forme de concentrations de sédiments rubéfiés et associés à des résidus de végétaux carbonisés, dont la morphologie est relativement variée. Il faut dire que l'importance de ces altérations est tout de même remarquable en comparaison des traces d'incendies actuels de forte sévérité (Pigati et al., 2014 ; Rick, Wah et Erlandson, 2012). Ces traces sont aujourd'hui interprétées comme résultant de

feux particulièrement intenses, associés à une accumulation de combustible dans des forêts de conifères, et dans un contexte d'assèchement régional. Elles sont toutes datées de la fin du Pléistocène, et correspondraient à de multiples événements qui s'étalent sur plus de vingt millénaires (entre 40 000 et 11 000 cal. BP environ ; *ibid.*). Les facteurs déclenchant ces ignitions restent toutefois discutés.

Nous pouvons également mentionner les couches de sédiments rubéfiés associées à d'abondantes masses de verres naturels, identifiées dans le désert d'Atacama au Chili. Celles-ci auraient été formées par des incendies naturels de surface (et des sols eux-mêmes ?), d'une végétation riche en silice, qui se serait accumulée dans un contexte d'ancienne zone humide (Roperch et al., 2017). Plusieurs feux en seraient à l'origine, et ils sont également datés de la fin du Pléistocène. Cette interprétation a récemment été remise en cause et attribuée à des phénomènes cosmiques, à savoir de l'explosion à basse altitude de comètes, qui auraient engendré un flash thermique extrêmement puissant (Schultz et al., 2021, 2022 ; voir aussi : Roperch et al., 2022). Si ces différents phénomènes résultent effectivement d'incendies, il semble donc qu'ils n'aient pas d'équivalents sous nos conditions climatiques actuelles.

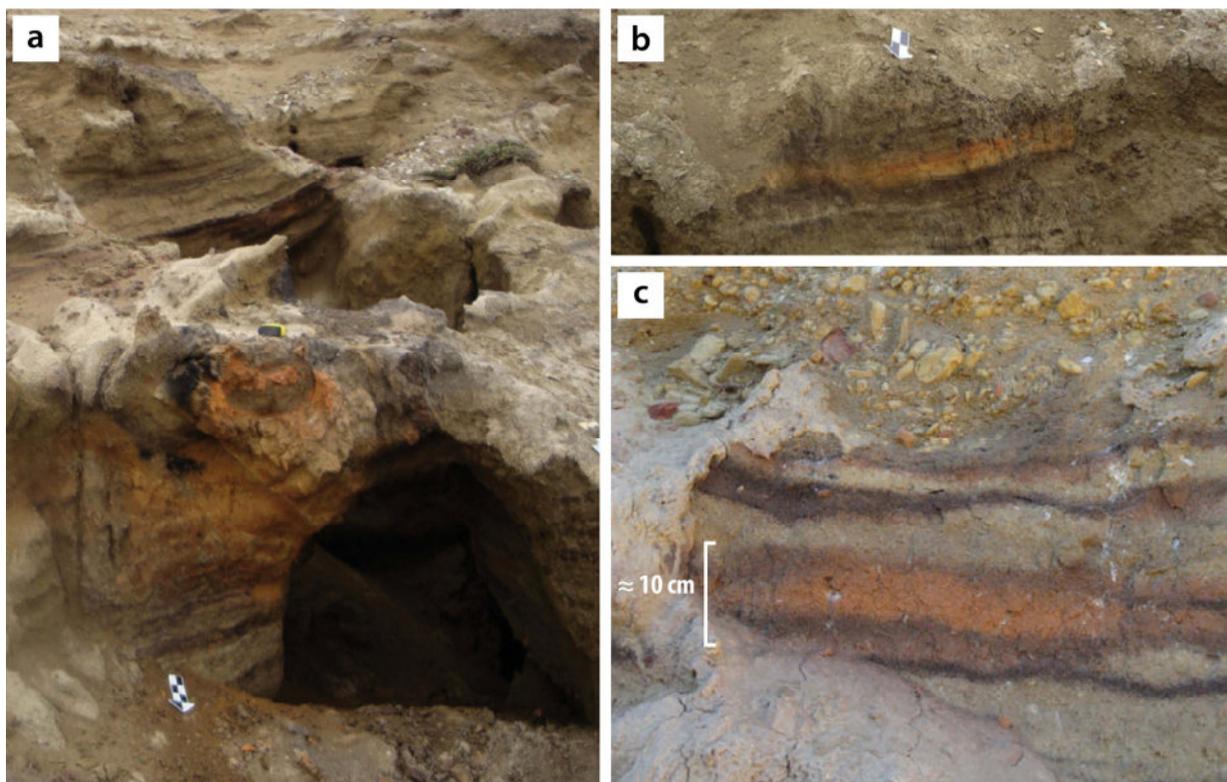


Figure 16 : Différents exemples d'altérations thermiques pléistocènes des Channel Islands (Californie).
(a) et (b) Santa Rosa Island (crédits : Rick, Wah et Erlandson, 2012). Noter l'aspect laminaire des sédiments superposés à la rubéfaction, qui semblerait s'expliquer par une chauffe postérieure de la paroi ou des dépôts inférieurs à la surface du sol incendié.
(c) Lentille de sédiments rubéfiés et carbonisés interprétés comme une séquence d'altération thermique *in situ* (crédits : Pigati et al., 2014)

3. Les feux anthropiques : du façonnage des paysages à la préparation des champs

3.1. Dans le paysage : les feux courants anthropiques

Hors du foyer et des activités artisanales, le feu est un **agent** (« *qui est une force agissante, un principe d'action* » TLFi), associé à un grand nombre d'activités « traditionnelles » dans le façonnage des paysages. Entre les mains humaines qui l'initient et celles qui tentent de le contenir, le phénomène du feu n'en devient pas pour autant un outil : « *contrairement à n'importe quel outil, le feu peut agir sur la matière indépendamment de la main ou du corps de l'homme, si bien que le plus souvent, l'intervention humaine, même pourvue de renforts et d'auxiliaires, est impuissante à l'assujettir [...] de fait, un outil n'a pas de puissance ni de dynamique propre* » (Ribet, 2011a). C'est pourquoi, hors des structures de combustion, circonscrites, l'utilisation technique du **feu courant** (c'est-à-dire un feu « *qui court à la surface du sol* », Ribet, 2011a) suit des règles bien spécifiques, mais relativement variables, tant vis-à-vis des objectifs que des contextes géographiques où il est en usage. Sa maîtrise requiert assurément une connaissance aigüe des environnements et des dynamiques végétales des zones concernées, pour obtenir les effets souhaités. Pour cela, les chaînes opératoires s'appuient en premier lieu sur des compétences et des savoirs du domaine sensoriel et prévisionnel (observation, capacité décisionnelle en situation d'incertitude) pour conduire et composer *avec* le feu, autonome et imprévisible (Ribet, 2005, 2011a). La connaissance du fonctionnement du feu « naturel » est donc primordiale. Outre l'ensemble des savoir-faire impliqués lors du brûlage, il est d'abord ceux liés à l'allumage même. Le jeu sur les saisons de mise à feu, les conditions météorologiques (vent, humidité, neige, etc.), en rapport avec la configuration et l'état de la parcelle (topographie, végétation, etc.), permettent d'adapter le brûlage aux objectifs recherchés (Ribet, 2011a ; Dumez, 2010 ; Bruzon, 1990 ; Métaillié, 1978).

Dans le cadre de la gestion des espaces, le feu peut donc être employé à courant, pour des objectifs variés, dont il n'est pas notre objet de faire une synthèse exhaustive, mais qu'il convient tout de même de mentionner. Dans la plupart des cas, ils relèvent d'une volonté d'entretien, de favorisation et de renouvellement du milieu végétal (voir la classification de Dumez, 2010, p. 36-40). Il faut tout de même y apporter une exception, celle des emplois à vocation cynégétique. Le feu permet la croissance d'une nouvelle végétation, qui sera alors nettement plus appétente pour le gibier (Fuhlendorf et al., 2009 ; Vermeire et al., 2004 ; Vinton et al., 1993). Ce principe vaut également dans le cadre du pâturage d'animaux domestiques. Néanmoins, pour la chasse, le feu justifie également son emploi, pour améliorer la visibilité en dégageant des zones, favoriser l'installation et le maintien de certaines faunes, ainsi que pour le piégeage du gibier (et précisons-le, pas seulement pour les grands mammifères ; Bruzon, 1994 ; Mallol et al., 2007 ; Dumez, 2010 ; Jones, 2012 ; Welch, 2014). La régénération de la végétation, et en particulier des herbages, est également l'un des objectifs majeurs des brûlages pastoraux (Métaillié, 1978 ; Ribet, 2009). Les feux courants à vocation pastorale peuvent aussi être menés pour ouvrir un milieu envahi par la végétation ligneuse, notamment les landes broussailleuses ou les fougères, qui empêchent le pâturage. Ces feux, qui sont d'ailleurs encore souvent identifiés improprement sous le vocable d'écobuage, visent selon différents rythmes, à entretenir les parcours des troupeaux (ibid.). Si le feu permet de se débarrasser de certains végétaux, il peut aussi avoir vocation à

favoriser certains taxons (Steensberg, 1955 ; Gottesfeld, 1994). Les deux objectifs ne s'excluent pas. Ils sont, dans le cas d'une favorisation spécifique, associés à des pratiques de cueillette (alimentation, médicament), en particulier de fruits, mais aussi d'autres produits végétaux sauvages, qui peuvent être employés dans le cadre d'activités artisanales (Anderson, 1996 ; Dumez, 2010 ; Martínez-Torres et al., 2016 ; Long, Lake et Goode, 2021). Le feu peut également servir à faciliter une activité de récolte, comme c'est le cas des feux de nettoyage de sous-bois des châtaigneraies (Dumez, 2010).

Ces exemples illustrent que les techniques à feu courant répondent à des objectifs variés, qui par ailleurs, trouvent également leur place chez des peuples de non-agriculteurs (Bruzon, 1994 ; Scherjon et al., 2015). À l'échelle d'un même groupe humain (indifféremment agriculteur-chasseur-pasteur), ces différentes activités liées au feu, y compris les feux agricoles que nous allons ensuite décrire, peuvent se conjuguer, ou s'exclure (p. ex. : Bruzon, 1994 ; Métaillé, 1999). Du moins, nous n'avons pas connaissance de règles générales en la matière. D'autre part, pour un territoire exploité par différents groupes, il est fort probable qu'à partir d'une certaine densité d'occupation, ces activités peuvent entrer « en concurrence » ou engendrer des adaptations pratiques, spécifiquement car elles sont de nature extensive (voir p. ex. Bruzon, 1994). En tout cas, l'emploi régulier de l'une ou l'autre de ces pratiques (autrement dit si elles s'inscrivent dans un cadre culturel spécifique), est susceptible de modifier sensiblement (au moins de manière localisée), et diversement, le régime du feu et la dynamique de ces écosystèmes.

Néanmoins, il reste difficile de définir comment peuvent effectivement s'enregistrer ces différentes pratiques dans les archives paléoenvironnementales, à travers la pluie pollinique et le signal incendie ; et comment les distinguer clairement des évolutions des régimes de feu qui seraient plutôt d'origine naturelle (Dietre et al., 2016 ; Rius, Vannière et Galop, 2009 ; Tinner et Lotter, 2006 ; Whitlock et al., 2010 ; Scherjon et al., 2015).

Pour ce qui est des traces physiques et des produits engendrés par le passage de ces feux, on peut raisonnablement admettre qu'ils ne doivent pas fondamentalement différer de ceux des phénomènes naturels (feux qui se déroulent à courant, et touchent, le cas échéant, des surfaces non préparées). Toutefois, il faut considérer que les traces que nous avons précédemment décrites, sont celles les plus marquantes et résultant d'incendies sévères (Partie 2-2.3, p. 50). Dans le cadre d'un usage cyclique du feu, par exemple pour l'entretien et la réouverture de pâtures, éliminant plus ou moins régulièrement le combustible, et menés au cours de saisons plus froides et humides, on peut s'attendre à ce que ces feux ne produisent pas de telles altérations. Ceci est en particulier valable dans le cas où ces feux ne concernent que des végétations herbacées, comme dans certains brûlages pastoraux, où le rythme du feu peut être très fréquent, de l'ordre de quelques années ou même annuel (Métaillé, 1978 ; Dumez, 2010). Au contraire, dans le cas de feux initiés dans des écosystèmes où ils sont très rares (déforestation à feu courant ?), des traces de feux sévères liés à des accumulations de combustible ne peuvent être exclues. On notera que les résultats obtenus dans le cadre de brûlages dirigés (feux préventifs pour réduire le combustible en forêt) montrent que ceux-ci peuvent engendrer des altérations modérées ou n'avoir que des effets tout à fait négligeables (Raison et al., 1986 ; Penman, Lemckert et Mahony, 2006 ; Fultz et al., 2016 ; Agee et Skinner, 2005). En tout cas, nous n'avons pas connaissance pour ce type de feux d'altérations comparables aux thermo-rubéfaction des feux de forêt sévères. En l'état actuel des

recherches, la faisabilité même de la distinction géoarchéologique des feux extensifs anthropiques de ceux naturels reste en suspens (au contraire des approches paléo-environnementales).

Par ailleurs, il faut ajouter que c'est bien dans les situations de feux courants que la probabilité que le feu s'étende involontairement au-delà des limites attendues est la plus forte. Il faut aussi prendre en compte que le déclenchement de feux de végétation sans attentes précises vis-à-vis des surfaces qui seront affectées, ou autrement dit de véritables incendies intentionnels (mais qui s'inscrivent bien dans un objectif d'exploitation du territoire), est mentionnée (Métailié, 1978). L'existence de telles mises à feu est d'ailleurs d'autant plus probable pour les périodes anciennes et les régions où les espaces non habités sont plus vastes³¹.

3.2. Le feu autour et dans les champs

Le feu possède des propriétés (fumée, lumière, chaleur, transformation des matériaux) qui offrent à l'ingéniosité humaine la possibilité d'en décliner les usages sous des formes et pour des objectifs, très variés. Le domaine de l'agriculture n'est pas en reste, loin de là. Le feu peut être employé à courant en surface du champ, ou au contraire de manière circonscrite (feu concentré, en tas), de façon ponctuelle, régulière ou même cyclique, et ceci dans des systèmes qui soient permanents ou temporaires (p. ex. : Martínez-Torres et al., 2016). De « simples » feux de surface, peuvent par exemple permettre de se protéger et d'éloigner des insectes nuisibles et de lutter contre certains ravageurs, grâce à la production de fumée, ou encore tout autrement pour accompagner les travaux des champs, etc. Dans l'éventualité qu'ils soient entretenus un certain temps, pour répondre à un ou plusieurs besoins, ces feux peuvent être pleinement considérés comme des foyers. Ces activités sont au moins théoriquement susceptibles de faire partie des témoins archéologiques de feu hors-sites d'habitat (Mallol et al., 2007 ; Vaté et Beyries, 2007 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017). Cependant, compte tenu de leur nature discrète (foyers à plat, de plein air) et des phénomènes taphonomiques auxquels ils peuvent être soumis, ils peuvent aisément se confondre avec les vestiges de feux naturels, et participent au caractère ubiquiste des indices de combustion, retrouvés hors des sites archéologiques (Mallol, Mentzer et Miller, 2017 ; Courty, 2012 ; Ryan et al., 2012).

Plus proches des activités culturelles à proprement parler, l'usage du feu est récurrent et sans aucun doute universel pour l'éradication et le nettoyage radical du sol : plantes adventices, indésirables ou jugées inutiles, atteintes de maladies, ou encore parasites et autres ravageurs des cultures (le feu est « *le premier pesticide* » ; Sigaut, 1975, p. 99-100). Le brûlage à feu courant des chaumes laissés après la fauche en est un exemple bien connu, et d'ailleurs déjà explicitement mentionné dans la littérature

³¹ Par ailleurs, on peut se demander à quel point, les incendies liés à la pyromanie ou à des situations conflictuelles sont le fait de nos sociétés modernes et des pertes de savoir-faire liées au feux paysagers et notamment pastoraux (voir p. ex. Leone, 1990). Car il faut bien considérer que de telles pratiques s'inscrivent elles aussi dans un système social et écologique cohérent.

romaine antique³² (Sigaut, 1975 ; Dove, 2015). Ce brûlis permet de détruire certains parasites qui peuvent être encore présents dans les chaumes ainsi qu'une partie des mauvaises herbes, tout en apportant une faible quantité de cendres au sol. Il est mentionné que de la paille pouvait même être amenée au champ, pour accroître la quantité de combustible (et donc l'efficacité du feu). Ce procédé était notamment d'usage en cas de remise en culture directement à l'automne (ou avant) succédant à la récolte, sans jachère intermédiaire (pratique dite « restoublage » ; Sigaut, 1976). Mais les chaumes peuvent aussi être arrachés, puis brûlés en tas. D'autres techniques procédaient par une récolte de végétaux sur différents terrains, qui étaient amenés dans les champs préalablement labourés pour y être brûlés à feu courant, juste avant qu'ils ne soient ensemencés (généralement pour des cultures d'hiver, à l'automne). C'est le cas de la technique dite du « brûlot », appliquée aux ajoncs, genêts et bruyères, mentionnée dans de nombreuses régions et sous divers noms (Vendée, Deux-Sèvres, Massif central, Loire, Aveyron, Corse ; voir Sigaut, 1975, p. 40). Une des descriptions données de cette pratique, indique que pour pallier à l'érosion éolienne des cendres produites, et afin qu'elles se fixent au sol, le cultivateur attend au dernier moment qu'une pluie s'annonce, avant de brûler (Baudet-Lafarge, 1860). Tout comme les feux courants précédemment évoqués, ces pratiques n'en sont pas moins dénuées de savoir-faire spécifiques, et cherchent à mettre à leur avantage les éléments naturels. Cependant, sans réfuter ni leur intérêt ni leur importance, ces feux n'occupent pas une place aussi fondamentale que ceux que nous allons maintenant détailler, qui existent en tant que méthodes de préparation du champ à part entière, et peuvent être la base de systèmes cultureux complets : l'abattis-brûlis et l'écobuage.

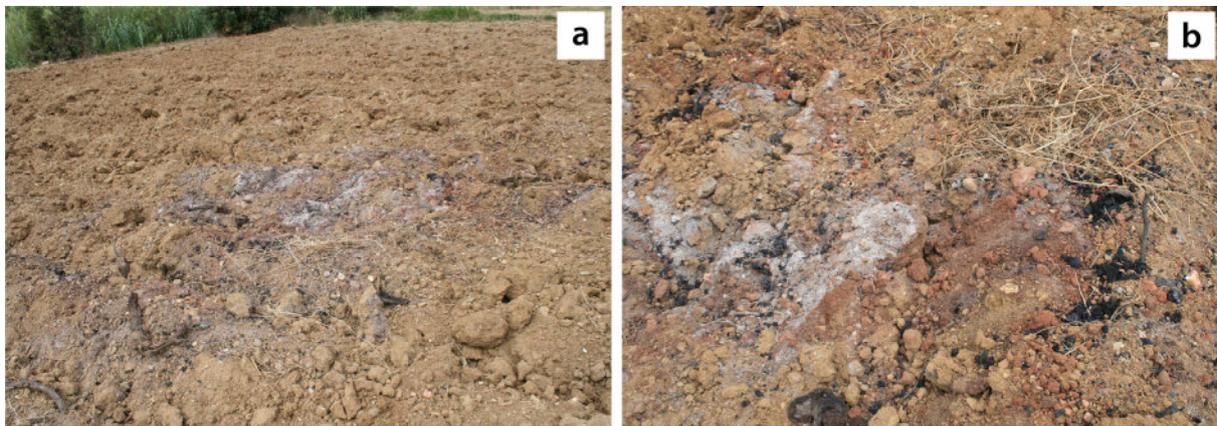


Figure 17 : Exemple de traces de combustion faisant suite à un brûlage de ceps de vignes sur une surface labourée (crédit : Alain Giosa).

³² « Il y a aussi des gens qui mettent le feu aux chaumes dans les champs, pratique très vantée par Virgile. Il la justifie surtout par la nécessité de brûler la graine des mauvaises herbes » (Pline l'ancien, Histoire Naturelle, Livre XVIII, LXXII, La moisson).

3.3. L'abattis-brûlis

3.3.1. Définition générale et questions sémantiques

« *Abattre une parcelle de forêt, brûler le bois, ensemercer le terrain une ou quelques années avant de l'abandonner de nouveau à la forêt* » (Sigaut, 1975, p. 18). C'est la manière la plus simple de définir cette méthode de préparation du champ par le feu, en milieu boisé, qu'est l'abattis-brûlis. Cette technique est très bien connue puisqu'elle a été documentée par de nombreux ethnologues, géographes et agronomes, dans un grand nombre de régions à travers le monde (Eyzaguirre, 1986 ; Gely, 1984 ; Von Verschuer, 1995 ; et références suivantes). Certains systèmes agraires reposent principalement, voire exclusivement sur cette méthode de culture. Encore aujourd'hui, ce système constitue la base de l'agriculture de diverses populations, spécifiquement dans les zones intertropicales (Dounias et al., 2000 ; Bahuchet et Betsch, 2012). Il est aussi assez bien renseigné pour les régions de climats tempérés, mais surtout à travers les écrits historiques et modernes. L'abattis-brûlis a été employé dans nos régions jusqu'au XIX^{ème} voire jusqu'au début du XX^{ème} siècle, dans les Ardennes, les Alpes, les Pyrénées, en Corse et ailleurs (Blache, 1923, 1932 ; Noirfalise et Thill, 1960 ; Sigaut, 1975 ; Mouthon, 2007).

Il est fait référence à ce système sous un certain nombre de dénominations : abattis-brûlis, essartage, culture sur brûlis, culture itinérante, etc. (Bétéille, 2014 ; Mazoyer et Roudart, 1997, p. 99-140; sans tenir compte évidemment des appellations locales). Les questions étymologiques relatives à cette pratique ont été largement discutées, sans qu'aucun consensus ne se dégage quant à la manière la plus appropriée de la nommer (Portères, 1972 ; Barrau, 1972 ; Sigaut, 1975 ; Grenand, 1996 ; Barrau, 1996 ; Viader, 2014). Les termes *abattis-brûlis* ou *essartage à feu courant* (Boutry, 1920 ; Blache, 1923), sont ceux qui nous paraissent les plus clairs, car *abattis* et *essartage* renvoient à un milieu boisé, et l'usage du feu est spécifié. Cependant, la dénomination *essartage* (ou *sartage* et ses dérivés) seule est incommode, car elle est employée dans la littérature historique tant pour désigner des cultures temporaires que permanentes, avec usage du feu ou non (cela est d'ailleurs signalé de longue date : Boutry, 1920 ; Blache, 1923, p. 557 ; Grenand, 1996 ; Mouthon, 2007 ; Harfouche et Poupet, 2013 ; Viader, 2014 ; Burri, 2017). D'autre part, le terme d'*agriculture itinérante* n'est pas faux, mais il est insuffisamment précis, et amène souvent à l'amalgame entre l'itinérance des champs et la mobilité résidentielle (p. ex. Bogaard, 2004a). Cela ne signifie pas que l'abattis-brûlis n'ait jamais été accompagné du déplacement des agriculteurs³³ ou qu'il n'y ait jamais eu de populations semi-nomades le pratiquant³⁴, mais il n'y a là aucune relation systématique, du moins cela reste selon nous à démontrer. Malgré que le terme abattis-brûlis ait d'abord été employé pour désigner les systèmes tropicaux, nous privilégions l'emploi de ce terme. Nous décrivons dans la partie suivante, les procédés de cette technique, tels qu'ils sont renseignés dans le contexte européen, principalement à partir des sources documentaires secondaires

³³ Cela apparaît dans les archives pour les périodes de travaux aux champs : mobilité saisonnière.

³⁴ Cela est documenté par l'ethnographie ; mais cette mobilité n'est-elle pas tout autant liée à la chasse et la cueillette ?

3.3.2. Procédés techniques

Il faut insister sur le fait que, si l'abattis-brûlis est bien une technique de déboisement, elle est strictement temporaire. La recolonisation du terrain par la végétation ligneuse après la mise en culture y est donc indispensable. C'est pourquoi ses procédés visent à faciliter, ou *a minima* ne pas contrarier cette repousse (l'abattis-brûlis peut d'ailleurs aussi bien être considéré comme une pratique forestière qu'une pratique agricole ; Mazoyer et Roudart, 1997 ; Dounias et al., 2000 ; Betsch, 2001 ; Blache, 1932). Ainsi, logiquement, l'abattis-brûlis exclut le dessouchage du terrain. En règle générale, la végétation ligneuse est préalablement abattue, ébranchée, puis laissée telle quelle, une année voire plusieurs, afin qu'elle sèche³⁵. L'abattage ordonné des arbres dans un même sens revient dans plusieurs textes (Montelius, 1953 ; Soininen, 1959 ; hormis en bordure de parcelle pour préparer le coupe-feu). Il existe aussi des techniques visant à l'effondrement des arbres les uns par les autres, mais cela n'est pas documenté en contexte européen (Steensberg, 1955, p. 68). Cela semble moins fréquent, mais dans le cas de bois âgés et de diamètre important, ceux-ci sont seulement écorcés et laissés à sécher sur pied, avant abattage (Sigaut, 1975 ; Soininen, 1959). Le séchage peut alors durer plusieurs années. Quelques arbres sont parfois préservés vivants au sein des parcelles (le balivage ; Boutry, 1920). Certains cas mentionnent que des troncs d'arbres (ou d'autres végétaux) sont amenés des terrains voisins sur celui à traiter (Sigaut, 1975 ; Soininen, 1959). Au contraire, des fûts de la parcelle déboisée peuvent être mis en réserve pour d'autres usages (Steensberg, 1955 ; Noirfalise et Thill, 1960). Les écorces de différentes espèces (notamment celles des chênes, bouleaux, saules, peupliers, pins) peuvent à ce moment-là, être l'objet d'une récolte extensive, en vue d'une exploitation artisanale, en particulier pour en extraire le tanin pour le traitement des cuirs, mais aussi pour un usage domestique (Durand, 2003 ; Mouthon, 2007). La saison de l'abattage du bois semble varier, elle est mentionnée en hiver et au cours de l'été (Sigaut, 1975 ; Mouthon, 2007). En Finlande, la période de feuillaison maximum (mi-été à début-automne) semblait privilégiée (Soininen, 1959), mais dans le cas d'une récolte d'écorce, le printemps devait certainement primer (lors de la période de montée de sève, les écorces plus distendues facilitent l'enlèvement ; Azéma, 2004)

De retour sur le terrain, le combustible est préparé selon différentes manières, si cette opération n'a pas été déjà réalisée avant le séchage. Les troncs d'arbres sont souvent répartis en parallèle sur la totalité de la parcelle traitée. Dans le cas où la végétation est essentiellement constituée de taillis, les branches sont mises en fagots et peuvent être disposées en andains croisés (Mouthon, 2007). Dans d'autres cas, le combustible n'est pas étalé, mais les fûts sont alors roulés sur le terrain, lors de la combustion (Figure 20 ; Ehrmann et al., 2014). Il ne s'agit donc plus vraiment d'un véritable feu courant (Portères, 1972). Les illustrations disponibles suggèrent cependant que le bois pouvait à la fois être en partie étalé et en partie roulé. Avant la mise à feu, il pouvait y avoir préparation d'un coupe-feu, avec un ratissage de la végétation superficielle autour de la zone, possiblement (rarement ?) accompagné un mouillage superficiel (Steensberg, 1955).

³⁵ Nous n'avons connaissance que d'une seule mention indiquant que le bois serait brûlé sur pied, en renfort de combustible, bois et broussailles, coupés autour du champ et laissés à sécher sur le terrain (Tooke, 1801, p. 24 ; in Portères, 1972, p. 172).



Figure 18 : Représentation d'une variante finnoise de l'abattis-brûlis dite « Kaski » d'après Berndt Lindholm (1872).
“Burn-beating at Lisalmi in Savo” (Huile sur toile 57 x 87 cm) ; Bukowskis – Arts & Business.



Figure 19 : Représentation composite de la préparation d'un sol par abattis-brûlis pour la culture du lin dans la province de Vologda en Russie d'après Illarion Mikhaïlovitch Prianichnikov (1887-1890).
Galerie nationale Tretiakov, Moscou, Russie. Wikimedia Commons.



Figure 20 : Essartage à feu courant finnois avec roulage des fûts, d'après Wilhelm von Wright (1825).
Finnish Heritage Agency : <https://finna.fi/Record/museovirasto.D0EA465F47392CA36B76317633FEC1CE>



Figure 21 : Champ essarté à feu courant en Finlande (Photographie Metla/Ismo Hyttinen ; nationalparks.fi).
Noter la conservation de plusieurs arbres sur pieds, et la clôture typique avec les troncs quasi complets.

Vient donc l'étape du brûlage. Nous n'avons pas beaucoup d'informations relatives à ce sujet. On dispose cependant de documents filmés d'abattis-brûlis réalisés en Finlande au début du XX^{ème} siècle³⁶, qui constituent un exemple évidemment très spécifique de leur mise en œuvre, mais riche d'information, en particulier pour les étapes de la conduite du feu, pour lesquelles les sources historiques sont indigentes. Ces archives semblent nous confirmer que les outils et procédés employés pour l'abattis-brûlis, ne devaient pas grandement différer de ceux de la conduite du feu courant dans le domaine pastoral (voir Ribet, 2011b ; Dumez, 2010). On retrouve notamment les torches en végétaux permettant une propagation rapide du feu, avec une méthode d'allumage linéaire. Il y a aussi les outils végétaux (branchages feuillus) pour étouffer le feu en tapant, qui sont parfois mis à tremper pour limiter le dessèchement et l'inflammation de l'outil. De plus, on observe des perches en bois, employées pour ventiler le feu grâce à un savant mouvement de levier. Il faut enfin mentionner les gaffes (perches avec crocs), qui visent le cas échéant, à faire rouler vers soi les fûts enflammés (Figure 20). Cette dernière technique en particulier, illustre que le brûlage soit souvent un travail collectif (Sigaut, 1975 ; Dumez, 2010, p. 65 ; Montelius, 1953, p. 42). En contrepoint, on remarque tout de même que quand le combustible était étalé, une fois le feu allumé tout autour du terrain, il ne nécessitait aucune intervention, au moins dans un premier temps. Les textes donnent des informations contradictoires quant à la conduite recherchée du feu : inflammation puissante et rapide dans le vent, ou au contraire allumage sous le vent pour une propagation plus lente (Montelius, 1953 ; Sigaut, 1975). Il est fort probable que ces différences dans les procédés de mise à feu et le déroulé de la combustion s'expliquent par les conditions précises du terrain essarté (pente, végétation feuillue ou résineuse, saison du brûlage, etc.), mais cela est rarement explicite. Une seconde opération de brûlage pouvait être menée lorsque la combustion des bois était très incomplète. Dans certains cas, les résidus non ou partiellement carbonisés étaient d'abord rassemblés en tas avant d'être brûlés³⁷ (ibid.). Dans d'autres cas, cela pouvait se faire par un nouveau (voire un premier) roulage de fûts (Soininen, 1959). Les troncs partiellement brûlés pouvaient aussi être sortis du champ après un unique brûlage, et réservés pour d'autres usages (Figure 18). Peut-être que les « essarteurs » considéraient que la quantité de cendres obtenue était alors déjà pleinement suffisante. Dans certains abattis-brûlis de pinèdes, il est mentionné des cas où la combustion concerne seulement l'écorce (Steensberg, 1955).

La période de mise à feu est variable, mais vraisemblablement circonscrite entre environ mai et septembre pour que les conditions naturelles permettent d'assurer sa réussite (Sigaut, 1975 ; Boutry, 1920 ; Soininen, 1959). La saison la plus précoce des essartages est surtout contrainte par les différences climatiques régionales. Mis à part cela, elle dépendrait surtout de la culture choisie. Dans tous les cas, le semis gagne à être réalisé le plus rapidement possible, pour bénéficier de l'enrichissement en cendres. Ce sont donc plutôt des cultures d'automne et d'été et non celles semées au début du printemps qui sont privilégiées. Avant les semailles, la parcelle était donc nettoyée avec enlèvement des troncs, rebrûlage et possible épierrement.

³⁶ https://elonet.finna.fi/Record/kavi.elonet_elokuva_604870

³⁷ Cette pratique est appelée **cherbottage** (d'après Cornebois, voir dans Sigaut, 1975, p. 24) mais ce terme aurait aussi été employé pour désigner l'essartage à feu couvert (voir Partie 2-3.5, p. 98), Noirfalise et Thill (1960) s'y réfèrent comme le labour d'enfouissement des semis après le brûlage et dans son Vocabulaire de Géographie agraire, P. Fénelon (1962) renvoie ce terme à une opération aratoire légère...

Après le semis, les semences sont enfouies par divers moyens outillés, selon les régions et les traditions. Cela pouvait être avec des instruments manuels, houes (fourchues), râtaux, ou attelés, araire ou herse. Cette dernière semble avoir eu une importance certaine, et il est bon de préciser que son usage était ici de couvrir les semences, car associée à la charrue, la herse visait surtout à briser les mottes avant les semailles (Haudricourt et Brunhes Delamarre, 1986, p. 112-113 ; Comet, 1992, p. 159-162). La herse peut être de confection relativement complexe, ou prendre la forme d'une « simple » cime de sapin ou d'un fagot d'épineux (Sigaut, 1975). Le choix de l'outillage devait certainement jouer selon la densité de souches sur le champ et l'état du sol après le feu (Figure 19). Il ressort clairement que dans l'abattis-brûlis, le travail du sol n'est en règle générale que très superficiel, et n'intervient qu'après le feu, pour le recouvrement des semis. Évidemment, on trouvera toujours une exception, comme dans un exemple Corse, où un labour unique accompagne le déboisement, « *toujours sans porter atteinte aux souches* » (Gavini, 1840, in Sigaut, 1975, p. 28).

Les cultures sur abattis-brûlis sont pour une large part des céréales (froment, seigle, orge, avoine), mais diverses autres plantes pouvaient l'être, sarrasin, lin, pavot, navets, pois, crucifères, et d'autres encore (Soininen, 1959 ; Noirfalise et Thill, 1960 ; Sigaut, 1975 ; Mouthon, 2007 ; Beaudouin, 2014). Une seule culture était parfois réalisée, mais de nombreux cas rapportent qu'il était fréquent que deux ou trois récoltes se succèdent, et même plus rarement, jusqu'à cinq années ou plus après le déboisement (Sclafert, 1926 ; Montelius, 1953 ; Soininen, 1959 ; Sigaut, 1975 ; Mouthon, 2007). Nous ne connaissons pas vraiment les raisons qui expliquent ces variations, mais on peut supposer que la fertilité naturelle du sol devait jouer, de même que la nature de la végétation secondaire s'y développant (sans compter d'autres choix économiques ou contraintes d'ordre foncier, etc. ; voir partie suivante). Il est flagrant que dans certains systèmes d'abattis-brûlis, la repousse de la végétation ligneuse se manifeste en même temps que la première année de culture (Noirfalise et Thill, 1960). Par contre, nous n'avons pas beaucoup de détails sur les méthodes de préparation des cultures postérieures, et en particulier si le feu était à nouveau employé (p. ex. par brûlage des chaumes). Un seul texte mentionne qu'après une première récolte, les nouvelles broussailles étaient coupées et brûlées pour une seconde année de culture (Laure, 1837, p. 174).

Mais les cultures, bien que centrales, ne sont pas tout. Une fois celles-ci terminées, en tant que friche boisée, le terrain peut fournir des ressources pour d'autres usages (bois de chauffe, fourrage ; Noirfalise et Thill, 1960 ; Mouthon, 2007). Il faut citer l'exemple des taillis ardennais, où le genêt, dont la germination était favorisée par le passage du feu, était même semé à la volée, car il fournissait de nombreux avantages, en termes de produits végétaux, mais aussi agronomiques (notamment facilitation de la fixation de l'azote ; voir en particulier Noirfalise et Thill, 1960 ; et : Boutry, 1920 ; Soltner, 1994, p. 159). D'autre part, le terrain pouvait ensuite servir de pâture. Dans les exemples finlandais et suédois, la parcelle est souvent clôturée à cet usage (Figure 21), sinon pour faire du foin ou encore pour protéger les récoltes des dégâts d'animaux sauvages (on note pour les clôtures le réemploi des troncs partiellement brûlés ; Montelius, 1953 ; Soininen, 1959 ; Steensberg, 1955). La mise en pâturage pouvait n'avoir lieu que plusieurs années après la mise en culture, une fois la repousse des ligneux déjà bien assurée. Dans les terrains plutôt favorables à la pousse de l'herbe, ils pouvaient l'être directement à la suite des cultures (Montelius, 1953 ; Steensberg, 1955, p. 78-79). À ce titre, il faut mentionner que dans certains cas, l'abattis-brûlis était mené avec comme objectif premier celui de la préparation d'une prairie (Mouthon, 2007 ; d'après Čitaja dans Sigaut, 1975, p. 124). Néanmoins, cela n'excluait pas que

ces terrains soient tout de même d'abord cultivés une ou quelques années (Montelius, 1953). Dans tous les cas, au bout d'un certain temps, le terrain était tout de même abandonné.

3.3.3. Les systèmes d'abattis-brûlis

L'abattis-brûlis en tant que système, est généralement cyclique, c'est-à-dire qu'après un certain temps, une fois la friche jugée suffisamment reboisée, le terrain pouvait être à nouveau essarté à feu courant pour un nouveau cycle³⁸. La durée de ce cycle est cependant assez variable. De manière très simplifiée, il peut être considéré que certains systèmes ont une révolution longue, de plusieurs dizaines d'années, et concernent donc généralement des forêts déjà bien formées et assez hautes. D'autres systèmes ont une révolution courte, au minimum d'une quinzaine d'années, et en moyenne d'environ vingt ans : ils sont appliqués à des boisements développés en taillis. Dans la pratique, des systèmes intermédiaires sont recensés, comme en Russie, où un premier abattis-brûlis est réalisé sur une futaie haute, puis le terrain est abandonné une dizaine d'années avant que l'opération ne soit répétée sur le subséquent taillis (Haxthausen, 1847, p. 238 ; in Sigaut, 1975). Des rotations encore plus courtes sont mentionnées (< 10-15 ans), mais il n'est jamais évident de savoir si l'opération s'applique à un véritable taillis ou si elle concerne plutôt des fourrés ou des broussailles. Ce type de déboisement (faudrait-il parler là de défrichement ?) devait être particulièrement pénible du fait de l'éventuel encombrement du terrain par les jeunes pousses. Il s'agit de situations certainement « marginales », qui se situent à la limite du système d'abattis-brûlis tel que nous venons de le décrire (Sigaut, 1975 ; Boserup, 1965 ; voir également Partie 2-3.5, p. 88). Par ailleurs, on notera qu'il semble exister une relation entre la durée de la friche forestière et le nombre d'années de mise en culture. Dans les systèmes à taillis de courte durée, il n'y aurait généralement qu'une ou deux emblavures, alors qu'elles pouvaient être plus nombreuses dans les systèmes à cycles de longue durée (Noirfalise et Thill, 1960 ; Sigaut, 1975).

Nous ne nous attarderons pas sur le fait que de nombreux auteurs ont décrié cette pratique, que ce soit d'ailleurs pour les tropiques ou sous nos latitudes, en leur faisant porter les maux du déboisement et de la dégradation des sols et des forêts (voir p. ex. Grenand, 1996 et Note 11, p. 18). Ce point a déjà été clairement, et à de nombreuses reprises, souligné et réfuté. Il est évident que tout système peut évoluer et se modifier, sinon disparaître, mais cela ne démontre en rien de leur viabilité ou de leur durabilité, notion par ailleurs toute relative. Il nous paraît bien plus juste de considérer que l'abattis-brûlis est « *un système agro-sylvicole relativement équilibré et conservateur dans son principe* » (Noirfalise et Thill, 1960 ; voir également : Bahuchet et Betsch, 2012 ; Myllyntaus, Hares et Kunnas, 2002).

³⁸ Notons néanmoins que dans certains cas d'agricultures tropicales, il peut n'y avoir aucun retour sur les terrains ayant déjà été cultivés (mais à quelle échelle temporelle ?), les occupants abandonneraient alors leur village pour en fonder un nouveau ailleurs (Pétrequin, Pétrequin et Schaal, 2016). Nous n'avons pas connaissance de cette possibilité dans le contexte européen.

3.3.4. Effets et produits des abattis-brûlis

Si les pratiques d'abattis-brûlis ont été abondamment documentées dans de nombreuses régions du globe par les ethnologues et géographes, elles ont également suscité l'intérêt des archéologues et écologues, lesquels ont mis en place des expérimentations depuis plus de 50 ans (Iversen, 1956 ; Reynolds, 1977 ; Ehrmann et al., 2014 ; Kelm, 2014). Ces expérimentations visaient principalement à montrer la pertinence de l'essartage à feu courant dans les régions non tropicales, et se sont surtout intéressées à des questions de productivité, de coût, d'évolutions des propriétés physico-chimiques des sols et botaniques (succession végétale). Finalement, assez peu de travaux publiés sont disponibles concernant leurs effets physiques et les produits que ces pratiques engendrent. Néanmoins, ceci peut aisément s'expliquer du fait que les altérations engendrées y sont relativement limitées en comparaison des incendies de grande sévérité.

L'abattis-brûlis est donc une technique de feu courant, qui se déroule dans des conditions largement excédentaires en oxygène, ainsi très favorables à une combustion complète des végétaux. Cependant, il apparaît fréquent que le bois ne soit qu'incomplètement brûlé. Ceci peut être relié au fait que le combustible, lorsqu'il est étalé sur la totalité du terrain – et bien qu'il puisse représenter un volume très important – n'est pas concentré, ce qui facilite la dispersion de la chaleur produite (Pyne, Andrews et Laven, 1996, p. 96-102). Autrement, lorsque les bois sont roulés, ils sont bien en quelque sorte concentrés, mais ils sont progressivement déplacés (Figure 20 et Figure 22). Ces procédés limitent grandement la propagation de la chaleur en profondeur dans le sol. Les températures mesurées en surfaces restent donc relativement faibles³⁹, et décroissent rapidement dès les premiers centimètres sous la surface (< 200°C environ ; Schulz, Vannina et Hall, 2014 ; Herrmann et al., 2007), pareillement au cas d'incendies naturels d'intensité modérée. Les seules altérations notables qui sont documentées correspondent aux surfaces des « feux d'allumages », qui sont pour le coup de véritables foyers⁴⁰, où la combustion de bûches est maintenue pendant plusieurs heures (ibid.). Le but de ces foyers est de fournir des braises nécessaires à la poursuite du brûlage du rouleau. Nous n'avons pas connaissance d'un tel procédé dans les références aux pratiques historiques et traditionnelles. Il nous paraît fort probable que la nécessité de ces foyers soit due à des conditions peu favorables lors du déroulement des expérimentations

(p. ex. vent insuffisant ? Rösch et al., 2002). Par contre, des altérations plus importantes peuvent effectivement être attendues lorsque les bois imbrûlés de la première opération sont ensuite

mis à feu en tas. Mais dans ce cas, ces feux sont situés sur le terrain cultivé, et non en périphérie. Ils seront donc affectés, comme le reste du terrain, par les labours postérieurs, qui vont plus ou moins superficiellement écorcher ces surfaces.

³⁹ Des expérimentations extra-européennes indiquent des températures de surface plus élevées, mais elles sont soit liées à des amas empilés de bois (foyers pour les braises), soit de durée relativement courtes sur un même point (Ketterings, Bigham et Laperche, 2000 ; Thomaz, Antoneli et Doerr, 2014).

⁴⁰ Dont les altérations peuvent globalement être comparées à celles observées sous les feux d'amas de bois (« pile-burning ») dans le cadre de pratiques de nettoyage sylvicoles (Pastor et al., 2010 ; Smith, Cowan et Fitzgerald, 2016).

Dans tous les cas, il apparaît que les cendres sont le principal produit de cette pratique. Les auteurs notent également qu'elles sont accompagnées par une quantité substantielle de particules charbonneuses (Reynolds, 1977 ; Rösch et al., 2004 ; Herrmann et al., 2007 ; Eckmeier, Rösch, Ehrmann, et al., 2007). Outre, l'enfouissement des semences, c'est l'activité biologique qui est susceptible de largement remanier ces résidus carbonisés. L'abattis-brûlis va entraîner une chute initiale de l'activité biologique et notamment des populations de vers de terre, mais à l'échelle de quelques années, la population de ces derniers est susceptible de s'accroître et même de largement dépasser leur densité antérieure (Herrmann et al., 2007, p. 130-131). Ce phénomène serait un effet secondaire de l'augmentation du pH, qui trop acide, nuit à leur développement (Topoliantz et Ponge, 2005). En conséquence, les charbons déposés sont d'autant plus susceptibles d'être ingérés et émiétés (Eckmeier, Gerlach, Skjemstad, et al., 2007). Cette désintégration poussée peut se marquer par un abaissement significatif de la clarté des horizons de surfaces essartés (qui n'est pas vraisemblablement pas due à la carbonisation des sédiments, mais bien la dispersion de particules de bois infra-millimétriques carbonisées ; *ibid.*).

Des travaux récents menés sur des traces laissées par des abattis-brûlis expérimentaux et modernes en Estonie illustrent que les marqueurs de cette pratique sont à rechercher à l'échelle méso- et microscopique (Ponomarenko et al., 2019 ; Blinnikov et al., 2019). Les auteurs proposent une combinaison de quelques indicateurs paléobotaniques qui permettraient de distinguer cette pratique dans ce contexte, incluant brièvement, la présence de charbons de bois, de phytolithaires carbonisés et de taxons cultivés, et d'un assemblage de pollens caractéristiques. D'autres chercheurs ont proposé que les terrains historiquement essartés par le feu, et cela à de multiples reprises, comme dans le Massif ardennais, les sols seraient nettement enrichis en phytolithes, résultants des végétations graminéennes post-culturelles (mais aussi des céréales), par rapport à aux parcelles forestières non cultivées (Herbauts, Berthelon et Gruber, 1990). Toutefois, dans ce dernier contexte, il est aussi documenté une autre pratique qui pourrait être à l'origine de cette particularité, l'écobuage (voir également Partie 2-3.5, p. 88), dont nous allons maintenant traiter (Boutry, 1920 ; Noirfalise et Thill, 1960 ; Froment, 1968).



Figure 22 : Un abattis-brûlis expérimental en cours (crédits Manfred Rösch et al., 2017)
Burning by pulling burning wood cylinders, made of branches and twigs, over the ground (speed ca. 3 m·h⁻¹).
<https://doi.org/10.3390/land6010011>

3.4. L'écobuage ou fournelage

3.4.1. Définition générale et questions sémantiques

« *L'écobuage est une méthode de préparation du champ : le sol gazonné est détaché à la houe, à la bêche ou à la charrue, les gazons sont mis à sécher, puis disposés en fourneaux et brûlés ; les cendres sont ensuite répandues sur le champ* ». C'est ainsi que François Sigaut (1982b) définit de manière synthétique l'écobuage « classique ». L'auteur entend par cet adjectif, la forme de l'écobuage telle qu'elle est décrite dans la majorité des textes agronomiques du XVIII^{ème} siècle, certainement pour l'en distinguer d'emblée de son sens commun actuel, souvent assimilé à celui d'un brûlage à feu courant (pastoral ou dirigé ; Métaillé, 1978 ; Métaillé et Faerber, 2003 ; Ribet, 2009 ; Dumez, 2010). L'enlèvement de la couche superficielle de terre, en tant qu'étape initiale, constitue l'étape clef de l'écobuage. D'ailleurs, en Europe de l'ouest, jusqu'au XVIII^{ème} siècle, le verbe **écobuer** ne s'appliquait manifestement qu'à l'action de peler la terre (étym. : 1519, *terre gobuée* ; 1721, *écobuer* ; terme dialectal de l'ouest dérivé de *gobuis* « terre pelée où l'on se dispose à mettre le feu » lui-même dérivé du saintongeais *gobe* « motte de terre » ; TLFi ; Portères, 1972, p. 158-162 ; Sigaut, 1975, p. 172-176). Ainsi, le véritable sens historique du terme écobuage s'est d'abord élargi pour signifier « écobuer et brûler » (cela se retrouve dans l'appellation anglaise « *paring and burning* »), puis plus récemment, s'est restreint pour devenir un synonyme du seul brûlage (ibid.). Le sens d'écobuage que nous retenons est celui donné par F. Sigaut, c'est-à-dire d'une technique agricole de mise en culture de milieux principalement herbacés, qui s'appuie sur une méthode de combustion bien spécifique : celle d'un *feu couvant* ou à *couvert* (Portères, 1972)

Roland Portères (1972), a réalisé une synthèse majeure autour des pratiques d'écobuage dans leur sens premier, c'est-à-dire, procédant par enlèvement des mottes, des gazons, avec ou sans brûlage (autrement dit des systèmes d'agriculture compostière). Compte tenu de la particularité des modifications physico-chimiques engendrées par le feu sur les matériaux (organiques et inorganiques), et de l'importance de ces produits dans les enregistrements pédo-sédimentaires, nous ne considérerons pas ici les techniques sans combustion. De plus, et bien que sur certains aspects techniques elles puissent être très similaires (Portères, 1972), elles n'occupent qu'une place minoritaire en Europe centrale (exception faite du cas de l'étrépage ou *plaggen*, dont la manifestation archéo-pédologique est évidente : McKey, 2021 ; Langohr, 2001 ; Pape, 1970 ; voir aussi Rodrigues et al., 2020). Peut-être serait-il judicieux pour éviter toute confusion d'employer un autre terme que celui d'écobuage, par exemple celui de fournelage (Portères, 1972 ; Sigaut, 1975), qui illustrerait tout à fait cette pratique, et qui a l'avantage de n'en désigner aucune autre, mais peut-être au défaut de lui faire perdre encore un peu de sa visibilité, alors qu'elle est déjà méconnue (McKey, 2021, paragr. 7).

Comme le remarque très justement Doyle McKey (2021), la terminologie de l'écobuage est un véritable problème, entre les différents termes actuels des usages du feu, ceux de la littérature historique, les appellations traditionnelles locales, et les traductions à faire entre ces dernières, la littérature est très difficile à appréhender. Ainsi : « *researchers are often unaware of work by others that they should know* » (ibid.). Nous redécouvrons nous même encore au moment de l'écriture de ces lignes d'anciens travaux qui nous avaient complètement échappé, malgré les quelques années déjà depuis lesquelles nous nous penchons sur la question.

Comme nous allons le voir, les techniques d'écobuage sont documentées dans de nombreuses régions du globe : Afrique tropicale humide, Inde, Asie, Bolivie, Europe du Nord (Fairhead et al., 2017 ; Portères, 1972). Beaucoup sont encore en usage ou du moins l'étaient encore récemment. L'écobuage a aussi été (ré)introduit, dans des provinces du monde où la mécanisation agricole et les engrais chimiques ne sont pas développés (car trop dispendieux), en conjuguant des méthodes traditionnelles et des techniques de production actuelles (Michellon et al., 2001).

La plus ancienne description française est attribuée à Bernard Palissy (vers 1580), mais celui-ci ne mentionne alors pas le terme écobuage (ce qu'il décrit en diffère d'ailleurs légèrement, voir ci-après). Celle d'Olivier de Serres (1600), qui est plus détaillée, ne le mentionne pas non plus. Le terme écobuer ne sera introduit dans la littérature agricole que bien plus tard, par Duhamel du Monceau et le marquis de Turbilly, vers 1760. À l'époque moderne, il était, sinon fréquent – car il constituait l'étape initiale (défrichement) de certains systèmes de cultures – vraisemblablement au moins, connu et pratiqué ponctuellement sur une vaste majorité du territoire français (Figure 23). Son importance est illustrée par la diversité de ces appellations régionales, et indirectement, à travers la relative variété des outillages à bras développés pour dégazonner les friches. Elle l'est aussi par les nombreuses expérimentations visant à mécaniser, avec la charrue, le découpage et le tranchage des gazons. Cela se manifesta avec le développement général de la mécanisation agricole, à partir du milieu du XVIII^{ème} s., d'abord en Angleterre puis en France. Mais du fait de ce même mouvement, et des engrais chimiques, son emploi a progressivement décliné au cours du XIX^{ème} siècle. Dans nos régions, il persista très ponctuellement au début du XX^{ème} s., voire jusque dans les années 1950 environ (dans le Massif central en 1950 : Métailié, 1999 ; Bal et Métailié, 2005 ; aussi à Tavel vers 1950, dans : Portères, 1972 ; Sigaut, 1975, p. 201 ; voir aussi en Galice (Espagne) jusque dans les années 1980 : Soto et al., 1995 ; Bouhier, 1979).

Nous décrivons ici principalement l'écobuage tel qu'il est renseigné en France, mais nous nous appuyons également si nécessaire sur la littérature extra-européenne. Elle nous livre des précisions importantes qui complètent les écrits modernes, et qui nous paraissent tout à fait pertinentes du fait de la grande similarité des techniques de l'écobuage, sur les différents continents où il est documenté (dont nous détaillerons ensuite ces variantes et leurs caractères discriminants).

3.4.2. Procédés techniques

Roland Portères (1972) et François Sigaut (1975) définissent l'enchaînement caractéristique des opérations suivantes : (1) écroûtage, pelage de la terre ou dégazonnement ; (2) séchage des herbes et de leurs racines et de la terre qui y est maintenue ; (3) construction des fourneaux ; (4) conduite de la combustion ; (5) épandage des cendres et des résidus chauffés.

Selon l'Abbé Rozier (1793 ; d'après Portères, 1972) : « *Le grand art de l'écobuage consiste à enlever seulement la portion de terre pénétrée par les racines. Le grand art est encore de conserver à ces tranches toute la terre attachée aux racines* ». Outre ce que nous avons précédemment dit sur les charrues, en France, à l'époque moderne, ce sont principalement des outils à bras, plus ou moins spécialisés, qui étaient d'usage : différents types de houes, dont en particulier l'écobue, une sorte relativement plus lourde ; des bêches poussées, des tranche-gazons, et d'autres (Sigaut, 1975, chap. II ;

Figure 24). Les auteurs classiques insistent souvent sur la nécessité de régulariser les plaques extirpées. Elles sont apparemment souvent de forme rectangulaire et de quelques décimètres de côté. L'épaisseur du pelage des terrains gazonnés est donnée entre un demi et un décimètre⁴¹. Dans certains cas toutefois, en contextes pédologiques assez humifères (sols volcaniques d'altitude ; Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007) ou fortement argileux (Pictet, 1808), elle peut atteindre deux dizaines de centimètres d'épaisseur. Les gazons sont disposés dressés, dès qu'ils sont extraits, de sorte qu'ils sèchent le plus rapidement et totalement. La méthode la plus fréquemment mentionnée est celle en faîtière, herbes tournées vers l'intérieur (Figure 26). Le temps de séchage est naturellement tributaire de la région climatique et de la saison de l'opération. Il peut être assez court, de quelques jours, à long de plusieurs semaines (Turbilly, 1760, et Gasparin, 1845). Un auteur mentionne une mise en fourneau au soir, de gazons levés le matin même (Louis de Villeneuve, 1843). Si le temps est humide, les mottes doivent être bougées et retournées, pour éviter qu'elles ne repoussent (Turbilly, 1760).

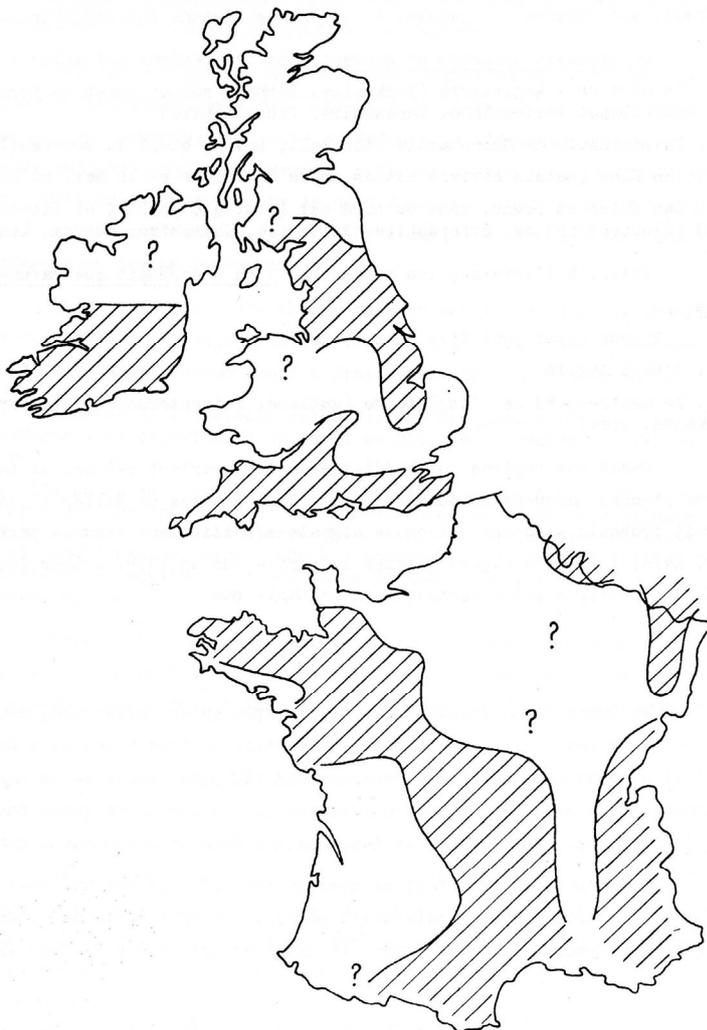


Figure 23 : Essai cartographique de l'écobuage « classique » en France et dans les îles Britanniques, vers 1800, d'après F. Sigaut (1975)

⁴¹ Données approximatives données dans les textes en pouce ou directement en centimètres : Duhamel du Monceau (1762) donne environ 5 à 8 cm ; Turbilly (1760), 11 cm ; l'Abbé Rozier (1793), 3 à plus de 6 cm ? ; Lasteyrie (1827), 3 à 11 cm voire jusqu'à 16 cm ; Louis de Villeneuve (1843), 8 cm ; Ringelmann (1890), 10 cm.

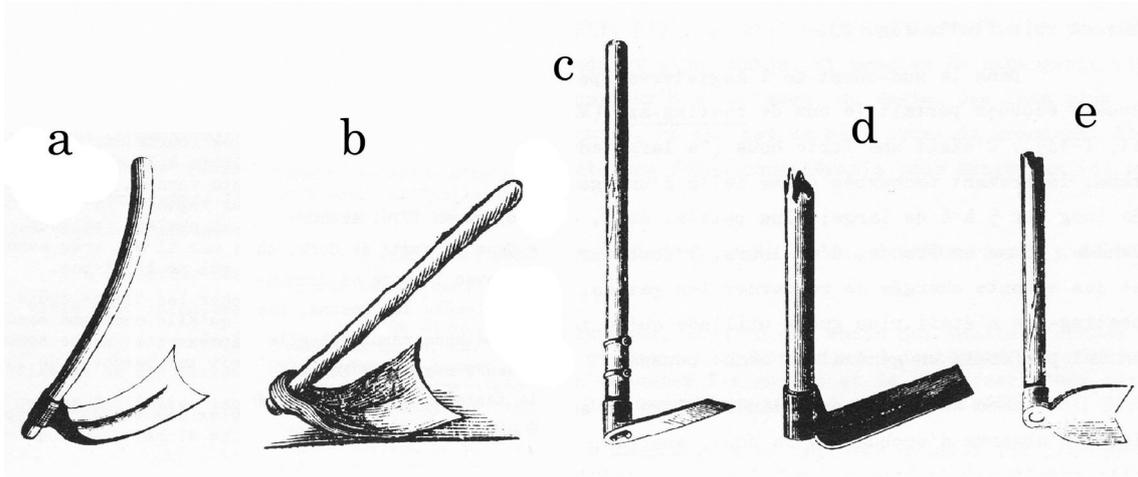


Figure 24 : Différentes variantes d'outils à écobuer (en partie repris de Sigaut, 1975).

(a) et (b) Écobues d'après respectivement : Duhamel du Monceau en (1762) et le marquis de Turbilly (1761).

(c), (d) et (e) Houes des Ardennes, de l'Odenwald et de Syrie d'après J.P.J. Klotz (1862).

L'écobuage est réalisable entre avril et septembre, mais il est le plus généralement opéré en été (Sigaut, 1975). Ringelmann (1890) indique toutefois que le pelage des gazons peut se faire à la fin de l'hiver ou au début du printemps⁴². Louis de Villeneuve (1843) évoque la difficulté de lever les gazons pendant les périodes de sécheresse. Et pour Duhamel du Monceau (1762), la combustion « *se fait dans les mois les plus chauds de l'année* ». En fait, la saison de l'écobuage, et en particulier celle de la mise à feu, dépend beaucoup de la culture choisie, mais aussi de la main-d'œuvre disponible (Sigaut, 1975). Comme pour l'essartage à feu courant, et peut-être plus encore, ce sont les cultures d'été et d'automne qui sont favorisées par rapport à celles de printemps (ibid.).

Une fois bien séchées, les mottes sont rassemblées pour façonner des fourneaux. Le cas du transfert de mottes de gazon sur un autre terrain est indiqué par Louis de Villeneuve (1843). Cela était certainement peu courant, et il s'explique dans ce cas-ci, par l'emploi d'un nouveau modèle de charrue spécifique, source d'un gain de temps et d'effort très significatif. Les descriptions et les illustrations historiques de fourneaux montrent qu'ils suivent à peu près toujours les mêmes principes, quoique dans le détail, il existe une relative diversité de constructions (Figure 26). Les formes les plus courantes sont celles de fourneaux ou de buttes plus ou moins hémisphériques (certains fourneaux sont carrés d'après Dombasle, 1862, dans Portères, 1972), mais des constructions en andains ou en forme de longs dos d'âne sont aussi documentées (Sigaut, 1975, p. 27 : exemples des Massifs des Maures et de l'Esterel). Ces derniers auraient l'avantage de ne demander qu'une moindre quantité de terre pour la couverture. Les dimensions des fourneaux sont comprises entre moins d'un mètre et jusqu'à un peu plus de trois mètres de diamètre et/ou de hauteur, mais en moyenne, les structures ne devaient que rarement être aussi importantes que ce maximum (donné par Turbilly, 1760 ; voir aussi sur la Figure 25). Le risque de tels fourneaux était que la combustion soit beaucoup trop hétérogène, insuffisante au sommet et trop

⁴² Ajoutons que la levée de mottes de tourbes au printemps pour ne les brûler qu'au printemps suivant est aussi mentionnée (De Laveleye, 1865 dans Sigaut, 1975, p. 114-115). Néanmoins, bien que F. Sigaut le relève comme un écobuage (donc au sens premier ?), il n'y avait là pas de fourneau, ces mottes de tourbes étant brûlées à feu courant.

importante à la base (Duhamel du Monceau, 1762). Mais surtout, plus les fourneaux sont grands, plus ils nécessitent de manutention des mottes de terre, qu'il fallait aller chercher de plus loin, et ensuite inévitablement épandre plus largement (Dombasle, 1862). La dimension des buttes est en toute logique, relative à l'épaisseur des mottes de terre, et inversement proportionnelle à leur densité sur le terrain. Ainsi, cette densité peut être très importante si elles sont de faibles dimensions, avec des structures distantes de seulement un ou deux mètres (Nicolăi, 1961, p. 39-40 ; Portères, 1972, p. 178). Dans le cas où ces buttes écobuées ne sont pas épandues, cela crée des paysages tout à fait singuliers (ibid. ; voir Figure 27). Néanmoins, la culture directement en butte n'est pas signalée en Europe, ce qui s'explique certainement par la nature des cultures en question : entre autres, manioc et arachides. Les choix qui président aux dimensions des fourneaux ne sont pas vraiment précisés.

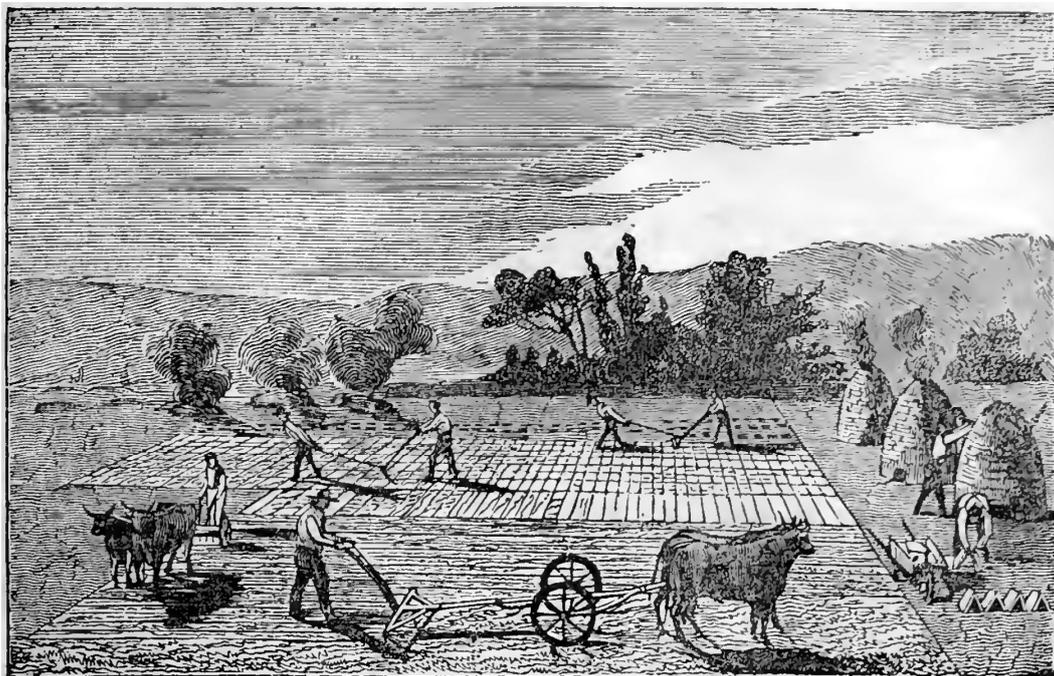


Figure 25 : Illustration de l'écobuage dans la Maison Rustique du XIX^{ème} siècle, Encyclopédie d'agriculture pratique (C. Bailly, 1842 ; crédits : Internet Archive).

Au centre, différentes méthodes de découpages des gazons, qui sont ensuite séchés en faïtières (en bas à droite) puis mis en fourneaux (juste derrière). Noter dans ce cas-ci les dimensions très volumineuses des fourneaux.

Pour ce qui est du mode de construction des fourneaux, il semble que deux méthodes prévalent. Dans la première, le combustible généralement sous forme de fagots sert d'armature, et les mottes sont disposées avec les tiges de végétaux tournées vers l'intérieur autour de celles-ci (p. ex. Ringelmann, 1890 ; Figure 26.a). Une ouverture à la base du fourneau est réalisée en laissant une extrémité (ou les deux ?) dépasser à l'extérieur (Louis de Villeneuve, 1843). Dans l'autre méthode, les gazons sont tournés tête en bas et empilés pour fabriquer une muraille, le combustible est ensuite placé au centre, puis le dôme du fourneau est finalisé (Duhamel du Monceau, 1762 ; Figure 26.c). Ici, c'est une véritable petite porte qui est maçonnée, avec un linteau en bois. Cette méthode de montage, qui paraît

particulièrement ajustée⁴³, semble surtout appropriée pour des plaques de gazons « véritables », moins pour des mottes de terre irrégulières et plus ou moins herbeuses. Insistons sur le fait que les mottes avec leurs herbes sont donc systématiquement retournées. L'ouverture à la base du fourneau, parfois complétée par une cheminée sommitale, permet la propagation du feu à l'allumage, grâce au vent. Elles sont alors pour tous les fourneaux, ouvertes dans la même direction. Plusieurs auteurs mentionnent une préférence pour le nord (Duhamel du Monceau, 1762 ; Ringelmann, 1890). Quant au combustible, ce sont donc surtout des fagots, mais divers débris ligneux, du petit bois, brindilles ou encore des feuillages pouvaient être ajoutés (Noirfalise et Thill, 1960). Dans certaines pratiques d'Afrique et d'Inde, l'emploi de bouses de vaches desséchées (mais aussi de fumier d'enclos) est attesté comme combustible, parfois même majoritaire (Portères, 1972 ; Pülschl et Koch, 1990 ; Amare, Yitaferu et Hurni, 2013). On ajoutera qu'il est également fait mention de pratiques où le montage des fourneaux (ou billons) se fait progressivement, une fois seulement la mise à feu effectuée (Lasteyrie, 1827 ; procédé aussi mentionné dans un exemple d'Inde par Mollison, 1901, p. 73-75).

D'autre part, si l'on retrouve hors d'Europe des techniques d'écobuage en butte, dont l'édification procède de manière plus ou moins comparable à celles décrites ci-dessus (quoique moins architecturées que ce que montrent les dessins agronomiques), il semble que la pratique en billons ou en andains, soit aussi assez fréquente, notamment en Afrique (Bezot, 1966 ; Nzila, 1992 ; Portères, 1972). Par ailleurs, certains de ces andains sont conçus d'une façon qui nous évoque beaucoup la technique des lazy-beds⁴⁴. Par exemple, dans l'écobuage *Maala* (Nzila, 1992, p. 57-59), la végétation des prairies de graminées hautes est rabattue et des billons sont formés en les déracinant et en les retournant de deux côtés, l'un vers l'autre. L'opération est répétée pour former un long billon. Entre ceux-ci, la terre est creusée pour en recouvrir encore un peu plus ces billons, qui seront ensuite brûlés (voir notamment les exemples de la plaine du Logone au Tchad donnés par Portères, 1972 : R. Dumont, 1954 ; G. Bouteyre, 1955 ; M. Gaide, 1956)⁴⁵. Dans ces cas-là, les structures de chauffe sont de faible épaisseur, et n'impliquent pas autant de terre qu'en comparaison des fourneaux. Nous avons l'impression que ces techniques en andains seraient plutôt spécifiques à certains contextes : soit, car les sols à écobuer ne sont que faiblement structurés (certainement des sols à dominante silteuse), soit, car il s'agit de terrains où la couverture végétale n'est pas assez dense pour qu'ils puissent être convenablement décapés sous forme de plaques ou de mottes cohérentes. Ce point serait à préciser. Sont-ce de telles techniques qui sont documentées à l'époque moderne dans les Maures et l'Esterel ? Cela nous paraît fort probable, puisque dans les massifs de Galice, une technique de brûlage en andains couverts, comparable à celles africaines, est renseignée (Soto et al., 1995 ; ne pas se fier au titre : le « slash-and-burn » indiqué par les auteurs étant bien une technique de combustion à feu couvert...).

⁴³ Sur la seule base de cette illustration, on comprend qu'il puisse être difficile d'imaginer que des architectures aussi précises servent pour préparer un champ, qui plus est « temporaire » ...

⁴⁴ Qui sont des billons (ou ados) réalisés en repliant des tranches de terre en sens perpendiculaire, sur une grande longueur (Bell et Watson, 2007). Nous n'avons pas trouvé de publications faisant le lien effectif entre les deux pratiques. Une technique de plus qui rapprocherait les techniques d'écobuages de celles compostières ? A moins que ces modalités d'écobuage observées dans certaines régions d'Afrique, ne résultent d'adaptions importées par les Européens ?

⁴⁵ Il faut encore mentionner des techniques où à l'inverse, des tranchées sont creusées, remplies de combustible (paille) et refermées avec cette même terre, pour enfin être brûlé (à Madagascar : Husson et al., 2009 ; et au Vietnam : Chabanne et al., 2002). Là encore : réadaptation récente de techniques traditionnelles locales ?

Mais revenons à notre chaîne opératoire, avec l'étape de la combustion. Il semble donc qu'il était judicieux de profiter de temps venteux pour procéder à la mise à feu. Une fois celle-ci bien lancée, elle pouvait durer toute une nuit, voire jusqu'à plusieurs jours durant, sans même que la pluie ne puisse plus l'empêcher, comme l'indiquent certains textes (Duhamel, 1762 ; Dombasle 1862 ; Ringelmann, 1890). Il était toutefois nécessaire de surveiller les fourneaux, notamment au début, ceux-ci pouvant s'écrouler, s'éteindre, mais surtout se fissurer, laissant alors des flammes apparaître, flammes qu'il fallait empêcher en colmatant avec de la terre, ou parfois en rajoutant de nouvelles plaques de gazon (Rozier, 1793 ; Dombasle 1862). Rozier (1793) évoque aussi la possibilité de mouiller les fourneaux ainsi qu'un pétrissage superficiel de la terre (mention qui rappelle le procédé décrit pour le charbonnage en meule ; voir Partie 23.6, p. 91). Mais Duhamel (1762) pondère ces propos : les espaces ne doivent pas être trop fermés pour ne pas étouffer la combustion. Il fallait donc jouer habilement pour obtenir la combustion souhaitée. Avec l'avancement de la cuisson, et l'incinération progressive des matières organiques, le fourneau va petit à petit s'affaisser (Ringelmann, 1890). Que ce soit pour les écobuages européens ou extra-européens, ce sont toujours les mêmes points essentiels qui sont généralement évoqués à propos de la combustion : elle doit être lente, modérée et sans flamme.

Il était parfois nécessaire d'opérer à nouveau l'opération, pour les fourneaux ou les plaques n'ayant pas brûlé, ou insuffisamment (Turbilly, 1760). « *Quand les fourneaux sont refroidis, on attend que le temps se mette à la pluie afin que la cendre ne s'envole pas ; et alors on répand la terre cuite le plus uniformément qu'on peut, n'en laissant point aux endroits où étoient les fourneaux, qui, malgré cela, donneront de plus beau grain que le reste du champ. C'est pour cela qu'on ne laisse à ces endroits que les gazons qui n'ont pas été cuits* » (Duhamel, 1762). Les structures sont donc démantelées et les résidus de chauffe sont épandus à travers le champ. On note l'importance des éléments naturels, vent et pluie, pour tirer le meilleur bénéfice des opérations. L'auteur met en avant un fait qui revient dans plusieurs écrits, et sur lequel il convient d'insister, celui que les places des fourneaux deviennent particulièrement fertiles et même alors que tous les résidus produits ont été retirés (Pictet, 1808, p. 472 ; Dombasle 1862). Une fois les cendres et résidus dispersés, le champ est semé, et le tout est enfoui par un labour plus ou moins superficiel ou un hersage.

La variété des cultures possible sur écobuage paraît assez large, et apparemment peu restrictive, excepté le fait que l'opération est plutôt adaptée à la saison estivale. Il est bon de noter qu'elles ne se limitent pas aux céréales et que d'autres plantes – en particulier certains tubercules⁴⁶ et autres plantes à racines (navets et navette), des crucifères, pavot, lin, etc. – s'y montrent tout à fait adaptés (Sigaut, 1975, chap. III.3). En outre, la technique est même mentionnée comme tout à fait pertinente en vue d'un reboisement. Entre autres auteurs, Duhamel (1780, p. 284), indique la possibilité de semer sur écobuage des glands en même temps que du froment ou du seigle. Après une récolte et quelques années en broussailles, la nouvelle chênaie qui avait germé en même temps que les céréales, se développe et prend le dessus. La méthode a été appliquée à d'autres espèces, dont des essences résineuses, et permettrait

⁴⁶ La pomme de terre en est un bon exemple, car elle occupe une place centrale dans certains systèmes, comme actuellement en Inde (Prokop et al., 2018), mais surtout en Amérique du Sud, dans les Andes (Jobbé-Duval, Cochet et Bourliand, 2007), et c'était également le cas à l'époque moderne en Angleterre et en Irlande.

de remplacer en deux décennies, un pré en bois. Nous ne savons pas si ces pratiques (que l'on peut pour le coup qualifier de forestière) ont eu une réelle importance à l'époque moderne, ou relèvent surtout d'expérimentations ponctuelles. Des procédés de reboisement comparables sont aussi mentionnés au Congo (voir L. Humblet, 1958 ; et A. Schmitz et J. Delvaux, 1958 ; dans Portères, 1972 ; expérimentation à partir de la pratique indigène d'écobuage ?). Pour R. Portères cependant (1972), l'écobuage est étroitement lié aux systèmes de production céréalière.

Pour F. Sigaut (1975), d'après les auteurs classiques, l'écobuage était donc en particulier adapté aux milieux prairiaux, engazonnés, et également dans les landes (ajonc, bruyère, fougère, genêt, etc.), les friches buissonnantes, les marais et tourbières. Du point de vue pédologique, il est presque toujours déconseillé pour les terres sableuses (excepté Pictet, 1808, p. 475), terres qui « *se vitrifient* », et mises en opposition à celles qui « *se calcinent* » (Turbilly, 1760, p. 65-66). Les sols acides paraissent « *éminemment "écobuables"* » (Sigaut, 1975). Les sols calcaires enfin sont considérés par certains auteurs comme tout à fait aptes à être écobués (plus précisément les sols crayeux : Sir John Sinclair, 1820, dans Sigaut, 1975; aussi Pictet, 1808, p. 467), mais pour d'autres, ne le sont pas (Dombasle 1862 ; p. 163). Les exemples d'écobuages extra-européens nous démontrent effectivement sa pertinence dans des contextes divers, mais généralement herbacés, prairiaux et broussailleux. Il apparaît encore lié à des sols très humifères, mais développés dans des matériaux pyroclastiques (Andosols), par exemple à Madagascar (Michellon et al., 2002) ou dans les prairies humides de haute altitude de cordillère des Andes (« les puna » ; Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007). Il est aussi documenté sur des sols ferrallitiques, à nappes d'eau perchées (plateaux) en saison des pluies, comme le système *Maala* de savane humide du Congo (Nzila, 1992), ou le *Muki* dans le Massif du Fouta-Djalon en Guinée (Portères, 1972). Enfin, l'écobuage se prête bien aux sols à hydromorphie temporaire des plaines alluviales, et tout particulièrement ceux très argileux (Bouteyre, 1958 ; Cabot, 1965). Pour R. Portères, en Afrique comme en Europe, l'emploi de l'écobuage ne serait pas nécessairement lié au manque de terres disponibles à cultiver, mais concernerait plutôt des terres incultivables autrement (Portères, 1972, p. 186).

Page suivante

Figure 26 : Illustrations de l'écobuage dans la littérature agronomique moderne et contemporaine.

Différentes représentations des étapes de construction de fourneaux, avec pêle-mêle séchage des plaques de gazons en faitières et enroulées, aspect d'un champ avec ses fourneaux et différentes constructions :

(a) d'après Ringelmann (1906) extrait de Portères (1976)

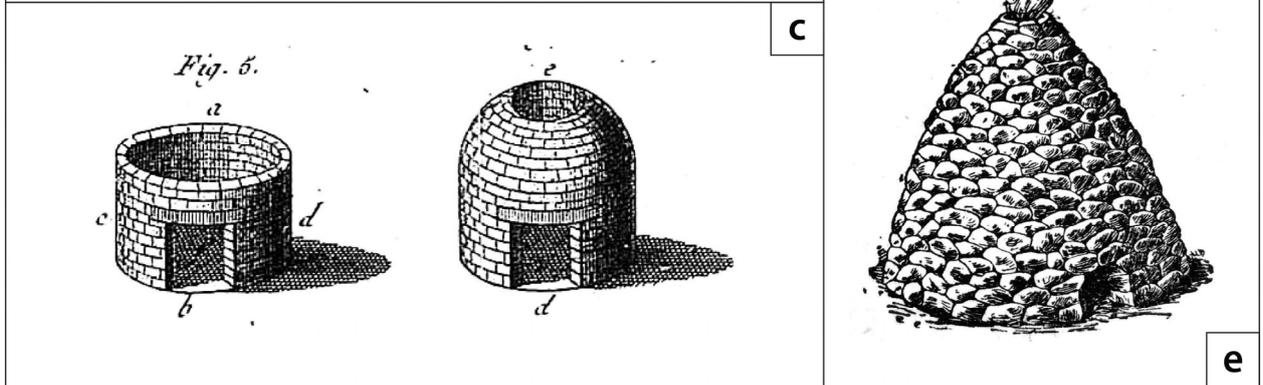
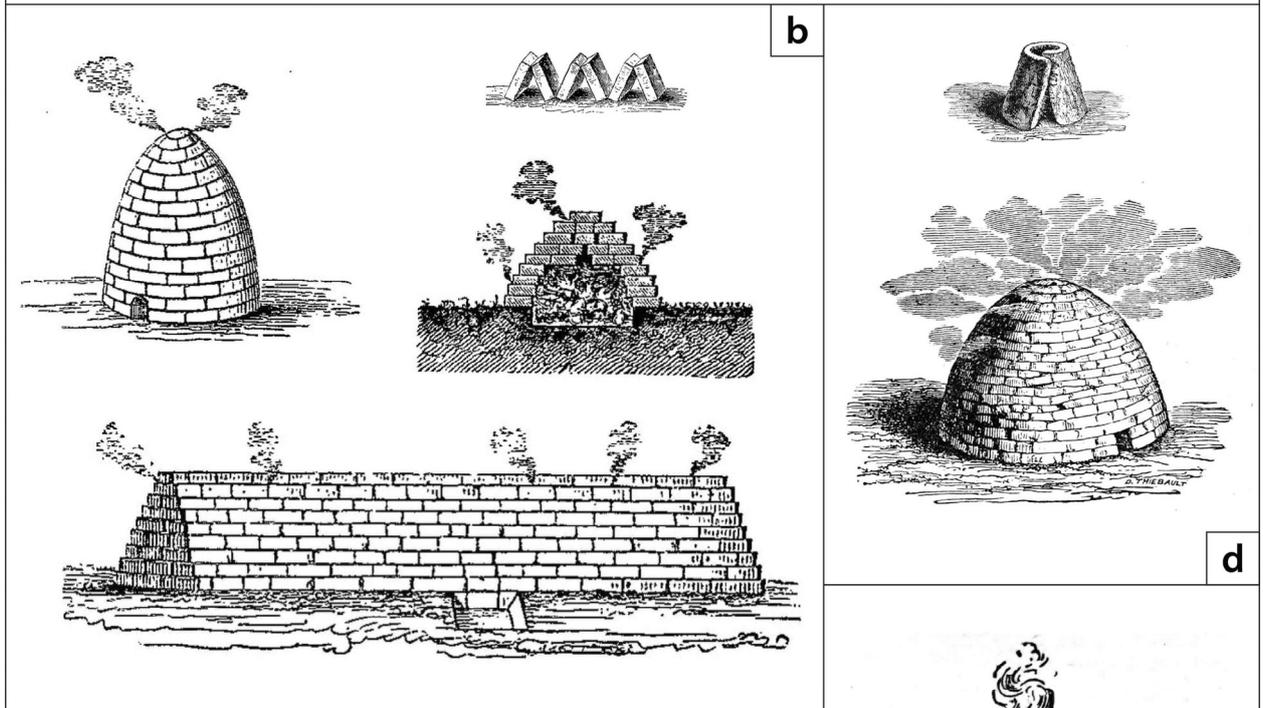
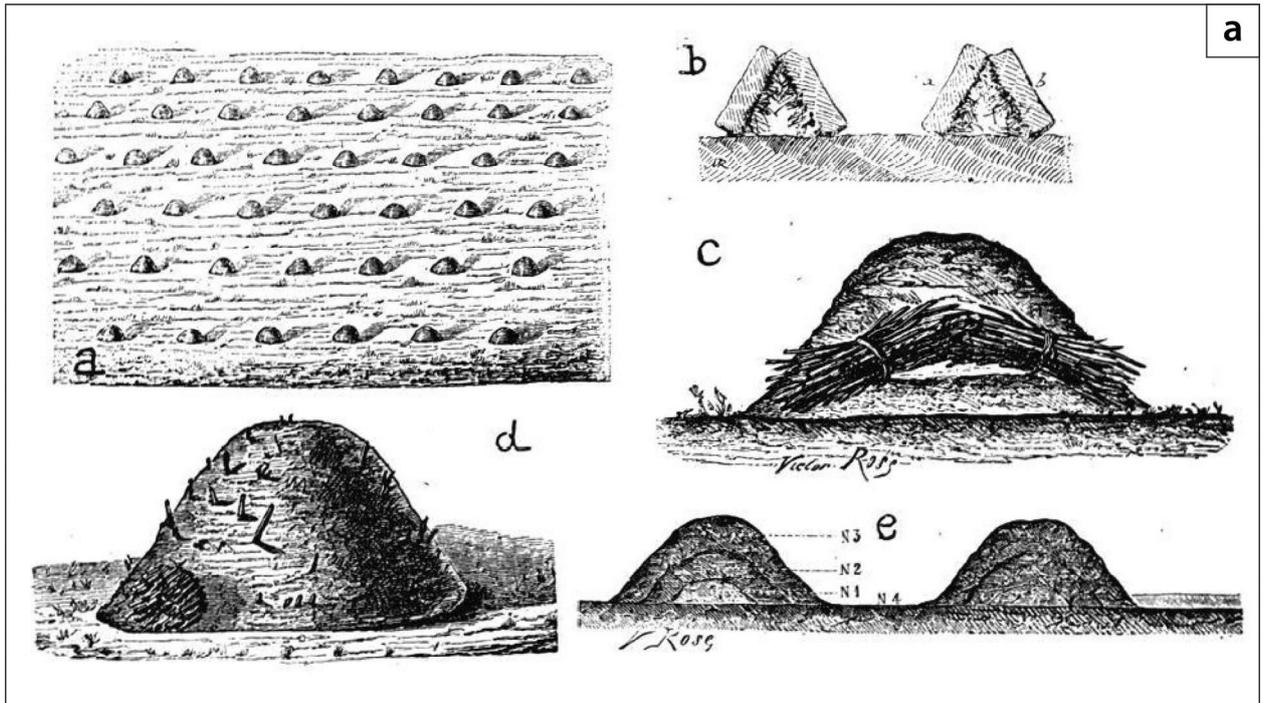
(b) d'après Girardin et du Breuil (1885).

(c) d'après Duhamel Du Monceau (1762). Noter la forme des gazons en briques cubiques allongées. Elle correspond peu avec les descriptions et les dimensions données par l'auteur. Les gazons devraient avoir une forme plus plane.

Présentement, la largeur de la paroi de la tour cylindrique devrait être nettement plus large

(d) d'après Poiré et Perrier (1924-1925).

(e) d'après Augé (1922).



Enfin, il faut mentionner un dernier point qui n'est pas négligeable, celui du coût important de l'écobuage (investissement en temps et/ou en main-d'œuvre, et également parfois en bois). C'est un point souligné par de nombreux auteurs, et qui paraît tout à fait compréhensible après en avoir décrit les modalités (Serre-Duhem, 1995 ; dans/et Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007 ; Fairhead et al., 2017). À titre d'illustration, on peut mentionner les densités de buttes-fourneaux dans des champs écobués. Pülschl et Koch (1990) estiment que le nombre de fourneaux dans le *Guie* éthiopien est compris entre 800 et 1600 par hectare (structures de hauteur/ diamètre entre 0,8 et 1,6 m). Lasteyrie (1827) mentionne pour sa technique de Catalogne (voir Partie 2-3.4.5, p. 86), « environ 500 monceaux sur un arpent de terre » ce qui est certainement du même ordre de grandeur (au moins 1000 structures par hectares ?)⁴⁷. Ceci est une chose, mais il faut considérer que le travail le plus laborieux était sans aucun doute celui de l'écorchage du sol. C'est pourquoi l'écobuage est considéré comme une technique résolument de main-d'œuvre. Il y aurait beaucoup à dire sur ces aspects et sur son coût en comparaison d'autres techniques, nous renvoyons ici le lecteur à la thèse de Sigaut (1975, Chapitre IV).

3.4.3. Des effets antinomiques des écobuages sur la terre ? Du point de vue des textes modernes à la documentation ethnographique et technique contemporaine

Quelle est l'importance des modifications engendrées avec de tels fourneaux ? Pour F. Sigaut, les auteurs classiques « insistent sur la nécessité d'un feu lent et couvert, laissant des cendres noires ou grises plutôt que rouges ou blanches » (Sigaut, 1975, p. 14). Bien qu'il reconnaisse ensuite que les minéraux argileux puissent être modifiés et qu'une certaine partie de la terre, celle-ci la plus exposée au feu, soit plus ou moins chauffé en brique, il semble considérer que cela n'est qu'un phénomène assez mineur, qui ne concernerait pas vraiment l'écobuage classique. Lisons Dombasle (1862) :

« Si l'opération a bien été conduite, la terre qui formait les fourneaux reste grise ou noirâtre, par le mélange des substances charbonneuses produites par la combustion. Si la terre avait pris une couleur rouge, on reconnaîtrait que la chaleur a été beaucoup trop forte, et l'opération serait complètement défectueuse, car il faut que les matières organiques contenues dans les gazons soient converties en charbon, et non réduites en cendres »⁴⁸.

Mais bien avant lui, Duhamel (1762) notait à propos du problème des fourneaux trop volumineux :

« Parce que les parois étant proportionnellement plus épaisses, la terre du dehors ne ferait pas assez cuite, lorsque celle du dedans le ferait trop ; car si on la cuisait comme de la brique, elle ne ferait plus propre à la végétation ».

Il ne faudrait donc pas que la terre se cuise ? Du moins pas au-delà d'un certain point. C'est ce qu'il faut croire, puisque plusieurs des auteurs que nous avons cités jusque-là, évoquent que les effets du feu sur la terre ne sont pas négligeables :

⁴⁷ Il existe évidemment des contres exemples où le nombre de structures d'écobuages pouvait être très faible, comme un des exemples mentionné par B. Guillot (1973, p. 53), au Congo, où environ une trentaine de buttes par hectare sont réalisées.

⁴⁸ On trouve les mêmes propos ailleurs, p. ex dans Gras (1870) ; tous deux sont dans des termes similaires au propos (traduits) de Thaer (1811-1814, T.3, p. 122). Compte tenu de l'influence historique des *Principes raisonnés d'agriculture* de Thaer, il est assez probable qu'il s'agisse là de recopies (voir : « Albrecht Thaër » dans *Les mots de l'agronomie. Histoire et critique*)

« Ils font brusler le bois au dessouz desdittes mottes, en telle sorte que les racines des herbes qui sont en ladite terre sont bruslées, et quand laditte terre et racines ont souffert grand feu, ils l'espendent par le champ comme fumier » (Palissy, 1580).

« Chaque tas devient partie cendre et partie terre cuite » (Réaumur, 1723).

Le fait que, dans les textes historiques, les effets de l'écobuage ne soient pas très explicites (voire peuvent sembler contradictoire), peut en partie s'expliquer par l'imprécision du terme employé pour désigner ces produits : celui de « cendres ». En effet, dans un sens historique et même dans un certain sens commun actuel, le terme ne désigne pas seulement des cendres végétales : la cendre est le « *résidu pulvérulent d'une matière consumée* » (TLFi). Les cendres sont « *ce qui reste* » du feu. Le mot ne présume aucunement de leur constitution, et donc s'il s'agit de matériaux organiques ou minéraux. Cela nous invite à rester prudents sur son sens dans les textes historiques.

Parallèlement, R. Portères (1972) et F. Sigaut (1975) rapportent en détail une pratique, ayant eu un succès particulièrement important en Angleterre au XVIII^{ème} s., avant de se diffuser en France au début du XIX^{ème} s., celle de *la calcination de l'argile*. C'était d'ailleurs à cette même période que l'écobuage avait en France de nombreux et farouches détracteurs (principalement entre 1780 et 1840 ; *ibid.*). L'argile calcinée était considérée comme un engrais comparable à la chaux et la marne. L'argile était alors cuite de façon « *quasiment industrielle* », dans des fours spécifiques de très grandes dimensions, puis distribuée aux champs (Sigaut, 1975). « *Mais les novateurs anglais ne l'étaient que chez eux* » (Portères, 1972). En fait, ce phénomène était observé dans certains écobuages, simplement qu'ils étaient là, menés dans des terrains plus argileux. Pictet (1808), à propos de ces observations en Angleterre :

« Ceux qui condamnent l'écobuage ont objecté contre cette pratique dans les terres argileuses, qu'il en résulte que l'argile se trouve convertie en fragmens de briques. Il y a en effet parmi les monceaux de cendres après l'écobuage, dans les terrains argileux, un grand nombre de fragmens de briques ; mais si on considère que la ténacité de la glaise est son plus grand inconvénient, on trouvera que le mélange de la brique en petits fragmens est une addition très-utile pour rompre l'adhérence des molécules de l'argile. En écobuant les terrains argileux, on a donc 1.° l'engrais des cendres végétales, 2.° une substance qui agit mécaniquement et d'une manière utile » (p. 471).

D'autre part, si l'on regarde la littérature plus récente, et notamment dans les études agronomiques et ethnographiques de cultivateurs pratiquant l'écobuage hors d'Europe :

« La terre se calcine lentement en fumant..., les billons... se signalent par leur coloration rouge, qui subsiste des années après l'abandon du champ » (chez les Ba-Kamba de la Vallée du Niari au Gabon ; voir Sautter, 1955 ; dans Portères, 1972).

« On obtient ainsi un mélange de terre et d'herbes brûlées, de couleur rougeâtre en général » (écobuage en billon sur sols limoneux bordant la rivière Logone, au Tchad ; Bezot, 1966, p. 7).

« Quand on ouvre un andain à ce stade on ne trouve que quelques tiges d'herbes à demi brûlées et des mottes de terre rougies par le feu au contact immédiat des herbes » (en cours de combustion, encore dans la région du Logone ; Bouteyre, 1958).

« Une parcelle abandonnée est parsemée de menus fragments rouges qui ressemblent à des débris de poterie » (chez les Kongo, écobuages en buttes *Mazala* sur plateaux et versants, dans la région de Luozi, au Bas-Congo ; Nicolaï, 1961, p. 39).



Figure 27 : illustrations de différents types d'écobuages et de leurs produits en contexte extra-européen.

(a) à (e) Déroulé d'un écobuage procédant par tranchées recouvertes, à Madagascar (d'après Husson et al., 2009).

De haut en bas : tranchées préparées pour l'écobuage (Photographie ANAE) ; recouvrement des tranchées et confection des cheminées pour l'allumage, mise à feu et combustion (Photographies N. Moussa) ; parcelle après combustion (Photographie T. Raharison).

(f) Champs avec buttes d'écobuage « mazala » au Congo (d'après Nicolaï, 1961)

(g) Buttes d'écobuages avant la mise à feu, dans le massif du Fouta-Djalon en Guinée (d'après Portères, 1972)

(h) Résultat d'un écobuage « guie » sur les Hauts plateaux d'Éthiopie (d'après Amare, Yitaferu et Hurni, 2013)

(i) Résultat d'un écobuage dans la cordillère de Cochabamba en Bolivie (d'après Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007)

Le reste de la documentation ethnographique et technique extra-européenne ne fait que conforter ces observations (Pias, 1962 ; Guillot, 1973 ; Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975 ; Dzaba, 1987 ; Roorda, 1988 ; Nzila, 1992 ; Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007 ; Husson et al., 2009 ; Amare, Yitaferu et Hurni, 2013). La trop rare documentation visuelle (en couleurs) sur ce type de pratique le confirme également (voir Figure 27). À partir de cela, trois affirmations peuvent d'ores et déjà être énoncées à propos de leurs effets sur les sols. Premièrement, le développement de modifications thermiques très visibles, sous la forme d'une rubéfaction de la terre, fait partie intégrante de certains types d'écobuage. Deuxièmement, ces modifications ne constituent en aucune sorte un quelconque échec de l'opération. Troisièmement, les modifications engendrées peuvent concerner un volume de terre très important.

Avant de revenir sur la question de ces apparentes contradictions entre écrits historiques et données expérimentales actuelles, nous allons maintenant regarder plus en détail ces dernières, et préciser quelques aspects agronomiques des techniques de cuisson à couvert.

3.4.4. Quelques aspects agronomiques : produits et effets de l'écobuage d'après les pratiques et les expérimentations récentes

Outre, ce que nous apprennent les textes modernes, nous ne disposons pas d'informations précises sur l'écobuage classique des gazons. Par contre, depuis les années 50, des études scientifiques menées dans quelques contextes, nous renseignent plus précisément sur certains phénomènes se produisant lors de ces cuissons à couvert. Les écobuages qui sont documentés concernent des structures en andains ou en tranchées creusées, pour lesquelles les volumes de sols traités sont relativement faibles, et des écobuages avec des structures en buttes. Il existe visiblement une variabilité des produits physiques des écobuages entre ces deux méthodes, qui peut s'expliquer de manière logique vis-à-vis de leurs modalités opératoires. Outre ces différences, les résultats semblent plutôt cohérents par rapport aux bonifications chimiques offertes par l'emploi du feu en général. En fait, il semble que les quelques observations contradictoires qui apparaissent s'expliquent par la variabilité même des différentes phases ou des résidus analysés (phases carbonisées ou oxydées, matériaux organiques ou minéraux) et donc des méthodes d'échantillonnages (phases ciblées ou échantillons composites), ce qui est en partie confirmé par les expérimentations en laboratoire (contrôlées) sur matériaux ciblés (Roorda, 1988 ; Nzila, 1992 ; Ketterings, van Noordwijk et Bigham, 2002).

Les effets les plus évidents de l'écobuage sont, comme pour tous les feux agricoles : l'enrichissement par l'apport de cendres et le nettoyage du terrain, la destruction des mauvaises herbes, parasites, etc. Cependant, l'écobuage a pour particularité que ce nettoyage est assez radical, et peut concerner un volume important du sol (à hauteur de la quantité de terre employée et affectée par la chauffe). C'est sans aucun doute ce qui explique que les plantes à tubercules et autres plantes à racines qui sont plus susceptibles aux ravageurs souterrains s'y trouvent bien adaptées.

L'importance des modifications des matériaux minéraux et organiques est principalement liée aux températures atteintes, à leur durée et aux conditions d'oxygénation globale au sein des structures. Certaines publications nous donnent quelques exemples de températures mesurées en cours de chauffe. Nzila (1992) indique pour une pratique en billons *Maala*, de dimensions très modestes, des températures ne dépassant pas les 420°C. Cela paraît cohérent avec les coupes des billons écobués qui montrent que les sédiments rubéfiés se limitent à certaines petites mottes, qui sont incluses dans une strate de sédiments d'aspect noirâtre, carbonisés (Nzila, 2017 ; Moreau, Nzila et Nyete, 1998). La couverture de terre très fine a visiblement nettement limité l'apport en oxygène dans la structure. Des observations comparables sont faites dans un fourneau expérimental où la couverture en terre a empêché toute chauffe rubéfiante et favorisé la carbonisation (ce qui était attendu : Olarieta et al., 2011)⁴⁹. Mais les températures n'y ont pas été mesurées. Dans une autre expérience, les températures ont été mesurées à différents intervalles de temps et différentes parties d'un écobuage en andain (Soto et al., 1995). Dans la butte, les températures ont atteint entre 400°C et 600°C, trente minutes après la mise à feu. Après 2 h 30 et encore jusqu'à 7 h de brûlage, les températures restent comprises entre 300°C et 400°C. Par contre, en surface du sol, elles ne dépassent pas 250°C, mais elles restent proches de 200°C pendant très longtemps, à savoir un peu plus de 24 h après l'allumage.

Dans le seul cas que nous connaissons pour des structures en buttes, les auteurs notent seulement que les températures peuvent monter jusqu'à 650°C en leur centre⁵⁰ (Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975). Il s'agit d'écobuages menés en contexte de plateaux très argileux et saisonnièrement engorgés (le « *Guie* » des hauts plateaux d'Éthiopie ; voir dans le même contexte la Figure 27.h). Les auteurs accompagnent leur propos d'une coupe schématique qui distingue quatre différents degrés d'altération au sein d'un fourneau, avec depuis le centre vers l'extérieur une couche brûlée, carbonisée, chauffée et la dernière non modifiée. On en trouve un autre modèle (même contexte) qui paraît assez théorique (voir Legesse, 1974, et Sahlemedhin, 1987, dans Pülschln et Koch, 1990). La malheureusement trop rare documentation visuelle des effets physiques du feu ne semble toutefois pas correspondre à ce

⁴⁹ L'expérimentation de cette référence correspond encore à une variante particulière, dont les procédés opératoires (et les objectifs ?) s'éloignent un peu du reste de la documentation sur l'écobuage. Les auteurs de l'expérimentation se réfèrent à une pratique historique en Catalogne dite « formiguer » (par analogie avec les techniques de châtrage et de brûlage des fourmilières ? d'après Bal et Métaillé, 2005). Les agriculteurs indiquent que les couvertures en terre doivent être humide. L'expérimentation a été menée sur un seul fourneau de dimension assez réduite et les températures sont vraisemblablement restées très basses (inférieures à 300°C ?). Il nous semblait que cette pratique se distinguait assez du déchaumage à la Catalane que nous évoquerons (par rapport aux informations historiques), mais cela nous paraît aujourd'hui moins clair. Ce point sera à éclaircir.

⁵⁰ Malheureusement, d'un point de vue technologique, la température maximum n'est en elle-même pas une information très pertinente, car très variable dans le temps et à l'échelle d'une même structure de chauffe (Pernot et Frerebeau, 2018).

modèle, en particulier celui d'une couche carbonisée⁵¹ périphérique au centre cuit (Figure 28). Elles montrent des mottes très largement cuites, de teintes rosées, rubéfiées, et à l'extérieur, des mottes non brûlées ou insuffisamment. L'étude d'une butte résiduelle d'un ancien *Guie* n'a pas permis de confirmer la zonation décrite par les précédents auteurs (Mertens, 2013).

Les effets généraux du feu sur la terre peuvent donc relativement varier à l'échelle d'une unique structure, ainsi que selon leur agencement, mais nous manquons clairement de précisions sur un certain nombre d'aspects, qui permettrait de généraliser les situations (quantité de combustible, de matériaux affectés, etc.). En tout cas, il apparaît bien, comme nous l'avons déjà dit, que la cuisson peut concerner un volume notable de matériaux. Un autre fait à considérer est que les altérations du terrain sous-jacent semblent assez limitées, voire négligeables (Moreau, Nzila et Nyete, 1998 ; Soto et al., 1995 ; Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975). Cela peut être comparé à ce qui se produit pour les charbonnières en meule, où l'élévation des températures se propage préférentiellement vers le sommet de la structure (Paradis-Grenouillet, 2012, p. 143). Dans les fourneaux écobués, qui ne sont pas conçus afin d'obtenir un calfeutrage optimal, ce phénomène de circulation est même possiblement facilité.

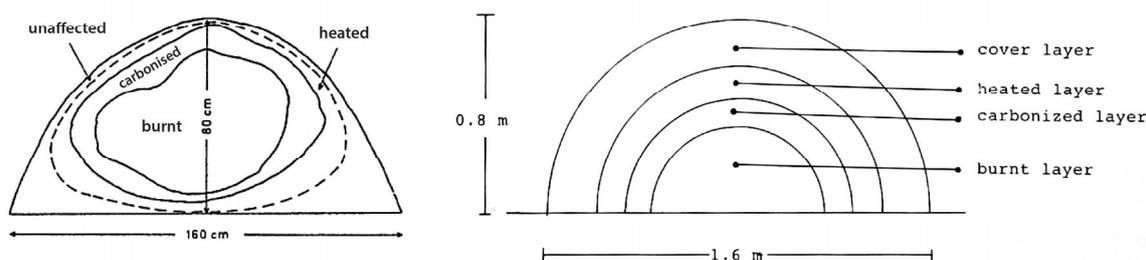


Figure 28 : Coupes schématiques de buttes *Guie* écobuées, avec leurs altérations thermiques.

À gauche : traduit d'après Wolde-Yohannes et Wehrmann (1975).

À droite : tiré de Pülschln et Koch (1990), d'après Sahlemedhin (1987).

Parmi les observations qui reviennent fréquemment, on trouve celle de l'amélioration structurale des sols, et en particulier pour ceux qui sont argileux (Nzila, 1992 ; Mboukou-Kimbatsa, 1997 ; Sertsu et Sánchez, 1978). Ceci s'explique principalement par la destruction de certains minéraux argileux et conjointement de leur agrégation en particules de plus grosses dimensions et relativement plus résistantes à la dispersion (Bétrémieux, Le Borgne et Monnier, 1960 ; Giovannini, Lucchesi et Giachetti, 1988). Il s'agit de pseudo-particules ou pseudo-sables, vraisemblablement cimentés par l'intermédiaire du fer et de l'aluminium, dont les formes se sont réorganisées au cours de la chauffe (ibid.). Ces modifications interviennent à des seuils de températures variables selon les minéraux concernés, mais elles sont susceptibles de commencer à se développer aux environs de 300-400°C. Par ce phénomène, la texture (taille des particules élémentaires) et la structure (leur agencement) du sol

⁵¹ Nous nous demandons s'il ne s'agirait pas d'un simple problème de traduction du terme carbonisé. Dans ce cas, les schémas présentés par ces auteurs illustreraient en fait seulement l'existence d'un gradient de température décroissant, depuis le centre du fourneau vers l'extérieur (ce qui nous paraîtrait plus cohérent). Encore un point qui sera à approfondir.

sont nettement modifiées. La terre n'est cependant jamais décrite comme indurée, mais pulvérulente, friable. Concrètement, cela se traduit généralement par une amélioration de la perméabilité et de l'aération, ce qui, dans le cas de sols à propriétés gonflantes, est une amélioration très significative (la rétention d'eau par les pseudo-sables est abaissée par rapport aux argiles). Ces changements physiques ne concernent néanmoins que les sols avec une certaine proportion d'argile (> 30 % environ ?), et seront théoriquement d'autant plus marqués que cette proportion sera élevée. Dans le cas des écobuages de gazons, où moins de terre est employée, ces changements devraient donc être moindres, au moins d'un point de vue quantitatif.

La combustion à couvert, permet certainement de limiter en partie la pyrolyse des matériaux organiques, et de favoriser la production de charbons et de résidus carbonisés (carbone pyrogénique ; Fairhead et al., 2017 ; Mertens et al., 2015). Toutefois, il n'est pas toujours très clair, de savoir si le combustible produit plutôt des cendres ou plutôt divers « carbonisats ». De même que de savoir s'il existe une relation entre le rapport carbonisation/comburant et les modifications affectant la couverture en terre. D'un point de vue processuel théorique, et en considérant qualitativement la documentation consultée, nous pouvons néanmoins faire l'hypothèse de deux situations générales opposées. Quand les structures permettent une oxygénation suffisante, ou que les matériaux organiques dominent, les cendres devraient être assez abondantes ou constituer le principal résidu (voir Pl. II dans Portères, 1972). Lorsque les températures restent basses (environ < 500°C), ou que la couverture en terre freine ou interrompt la circulation en oxygène, la carbonisation sera favorisée (Moreau, Nzila et Nyete, 1998 ; Prokop et al., 2018). Dans tous les cas, la minéralisation des matières organiques est toujours notable, comme l'illustrent les bénéfices chimiques des écobuages (§ ci-après). Wolde-Yohannes et Wehrmann (1975) estiment qu'à l'échelle totale des surfaces traitées, la perte de matières organiques est d'environ 50 %. Michellon et al. (2002), qui ont comparé plusieurs méthodes culturales, montrent néanmoins que la baisse en matières organiques est fugace, et qu'elle peut être moindre que dans le cas de pratiques culturales n'employant pas le feu. D'après les températures données dans la littérature (> 200-250°C), ces pratiques devraient engendrer une destruction drastique des micro-organismes et de la faune du sol. Toutefois, Mboukou-Kimbatsa (1997) démontre que l'écobuage peut ensuite stimuler de manière notable l'activité des macro-invertébrés, et en particulier des vers de terre. La production de matériaux partiellement carbonisés semble également améliorer la porosité et l'aération des sols écobués (Mertens et al., 2015).

Il se produit généralement un net enrichissement en cations échangeables basiques, ou au moins de l'un d'entre eux (calcium, magnésium, potassium ; Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975 ; Soto et al., 1995 ; Moreau, Nzila et Nyete, 1998 ; Mertens et al., 2015). Le phénomène varie selon les contextes, mais aussi à l'échelle des différentes phases d'altération d'une structure écobuée. La quantité de certains cations échangeables peut cependant parfois diminuer, mais selon un ordre de grandeur négligeable par rapport aux gains enregistrés pour les autres cations (ibid.). Leur accroissement est pour une partie liée à la minéralisation des matières organiques, mais elle s'explique aussi par une libération de ces éléments depuis les minéraux argileux (Bouteyre, 1958). Ces modifications engendrent une remontée du pH qui peut atteindre une à deux unités (Edje, Semoka et Haule, 1988 ; Soto et al., 1995). Les résultats d'analyses divergent concernant les effets sur la capacité d'échange cationique (CEC) des sols, celle-ci est tantôt améliorée, tantôt diminuée, ce qui dépend certainement du type de sols concernés, et en particulier de la quantité et de la nature des minéraux argileux (sinon de différences de protocoles ; voir

en particulier Mertens et al., 2015 ; et : Michellon et al., 2002 ; Nzila, 1992). Pour les sols riches en argiles, elle décroît normalement au-delà de 200°C, conjointement à l'agrégation des particules fines, puis à plus haute température, suite à la déstabilisation de leur réseau cristallin (Nishita et Haug, 1972). Quand cette CEC est principalement assurée par les complexes organiques, elle tend naturellement à se réduire avec l'avancée de la combustion (Certini, 2005). De plus, la chauffe va entraîner des pertes en azote (N) – en général surtout présent sous forme organique – dont la volatilisation démarre à des températures faibles (dès 200°C ; Neary et al., 1999 ; Hébert, 1979). Il y aurait par contre, une augmentation en N minéral via la décomposition de certains acides organiques (Juste et Dureau, 1967 ; dans Moreau, Nzila et Nyete, 1998). Il semble cependant que la chauffe à couvert limite relativement ces pertes, au dépend du carbone (au contraire des feux à courant ; Bouteyre, 1958 ; Mertens et al., 2015). Plusieurs travaux indiquent ainsi une baisse du rapport C/N après la combustion, ce qui illustrerait que la reprise de la minéralisation et de l'activité biologique soit stimulée (Mertens et al., 2015 ; Pias, 1962). Un autre effet important relevé pour la croissance des cultures est celui de l'augmentation en phosphore assimilable (Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975 ; Roorda, 1988 ; Gautheyrou et al., 1990 ; Soto et al., 1995). Enfin, l'intérêt de l'écobuage a été souligné pour atténuer la phytotoxicité aluminique et manganique à l'égard des cultures (Moreau, Nzila et Nyete, 1998 ; Prokop et al., 2018). Celle de l'aluminium peut être inhibée par la réduction de l'acidité, et celle du manganèse par la création de conditions moins réductrices, deux modifications auxquelles l'écobuage peut effectivement mener (Coppenet et Juste, 1979)

L'écobuage par la chauffe du sol et des végétaux à couvert permet donc une fertilisation notable et rapide par l'augmentation des nutriments disponibles pour les plantes, mais également par des modifications physiques du terrain, en particulier dans les cas où les fourneaux concernent un volume de terre important par rapport aux matières combustibles. Ces phénomènes semblent largement compenser les pertes en matières organiques et les réductions de l'activité biologique, toutes deux temporaires. Tant qu'il n'est pas pratiqué à des intervalles trop courts (bisannuel à plusieurs années selon les contextes), l'emploi de l'écobuage n'est aucunement dépréciatif (Michellon et al., 2002). Les bonifications d'ordre chimique ne dépasseraient guère une voir deux années après la pratique (Soto et al., 1995 ; Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975). Pour certains auteurs, les transformations physiques engendrées, notamment les pseudo-particules indurées, seraient à l'échelle de quelques années, réversibles (Fairhead et al., 2017). Cette observation est aussi mise en rapport avec l'usage postérieur des terrains : les travaux aratoires et surtout le pâturage favoriseraient leur disparition (Wolde-Yohannes et Wehrmann, 1975). En l'état, l'analyse des effets des écobuages à moyen et long terme reste largement à faire, mais au vu de l'importance potentielle des modifications générées, la question de la durabilité et de l'évolution de ces modifications peut être posée (Fairhead et al., 2017 ; McKey, 2021).

3.4.5. Des types d'écobuage à leurs produits : une question de point de vue ?

R. Portères (1972) distingue trois principaux types d'écobuage : l'**écobuage de dégazonnement**, l'**écobuage de la croûte terreuse et argileuse** et l'**écobuage de la tourbe**. Reprenons donc ces catégories en schématisant les informations que nous avons précédemment compilées.

Pour les écobuages de la tourbe, compte tenu de la nature même de leur milieu d'application – quasi intégralement ou très largement constitués de matériaux organiques – ceux-ci ne devraient produire presque que des cendres. Dans les tourbières, il semble que le pelage du sol n'était que très superficiel, il était même parfois uniquement réalisé sur certaines zones les plus hautes de la tourbière. De plus, il semble que le brûlage pouvait souvent se faire à feu courant sur les mottes décapées, non mises en tas (Sigaut, 1975, p. 16 & 114). Il s'agit donc d'un cas tout à fait particulier, qui dans le sens où nous l'entendons, ne peut pas vraiment être considéré comme un écobuage puisqu'il manque une couverture de matériaux permettant de procéder selon un feu proprement à couvert.

L'écobuage de dégazonnement, dit « classique », est celui qui est principalement décrit dans les textes historiques français. Il ne concerne souvent qu'une mince croûte de la surface du sol, qui inclut pour une majeure partie le mat racinaire des pelouses : « *l'épaisseur des gazons est habituellement la plus faible possible* » (Sigaut, 1975, p. 15). Théoriquement, les produits obtenus devraient varier entre une majorité de cendres, dans le cas où le dégazonnement est le plus strict, à un mélange de cendres et de produits organo-minéraux carbonisés.

Enfin, pour les écobuages des croûtes dites terreuses et argileuses, la situation serait notablement différente, puisque la proportion de matériaux inorganiques y sera largement plus importante. Comme nous venons de le voir d'après les exemples subcontemporains, selon leurs modalités de combustion, ils peuvent mener plutôt à une majorité de matériaux organiques et minéraux nettement carbonisés (andains couverts) ou plutôt à une cuisson oxydante d'un volume très important de matériau minéral (battes-fourneaux). Il apparaît clairement les différences que cela peut induire en termes d'archivage pédo-sédimentaire (voir Partie 2-3.8, p. 95).

Finalement, bien que l'écobuage soit une pratique qui se déroule selon une technique de cuisson bien précise (un feu à couvert), hors de l'écobuage classique, il apparaît une relative variété des procédés de mise en œuvre. Son application dans des contextes de différentes natures (sol et milieu végétal), va logiquement engendrer des produits différents. En effet, son emploi peut permettre de répondre par une même méthode à différents problèmes (sols trop organiques, trop acides, trop argileux, trop hydromorphes). Ainsi, le seul fait que les techniques d'écobuage soient menées par différents groupes de cultivateurs, dans des terroirs aux caractéristiques édaphiques propres, permet d'expliquer que, du point de vue d'un observateur extérieur, les effets ordinaires de l'une (la rubéfaction de la terre pour les écobuages en contexte argileux) soient considérés comme inappropriés, et donc néfastes pour l'autre (fourneaux de vrais gazons). C'est selon nous, au moins en partie, ce qui explique les observations contradictoires relevées dans les écrits historiques français (dont certaines sont de surcroît doublées de considérations péjoratives à leur propos). L'écobuage, perçu hors du groupe où il était d'usage, devait probablement apparaître comme une pratique aux « effets paradoxaux » (Sigaut, 2003b). Cela peut être

mis en parallèle avec le caractère de l'écobuage que R. Portères (1972) décrit comme « ethnique », pour signifier son lien étroit avec certaines sociétés en particulier.

Dans sa thèse, F. Sigaut met de côté la pratique du brûlage de l'argile, qu'il dissocie d'ailleurs très clairement de l'écobuage classique (et en fait de l'écobuage tout court). Cela s'explique du fait que les sources qu'il utilise traitent en majorité de l'écobuage des pelouses. En France, à l'époque moderne, il n'identifie des pratiques qui nous évoquent clairement les écobuages de croûtes terreuses, que dans certaines plaines alluviales et côtières du Midi (précisément dans les environs de Toulon et d'Avignon ; voir Laure, 1837, p. 515-516 et Gasparin 1843). Pour lui, il s'agit d'ailleurs plutôt d'une technique de déchaumage, celle dite « à la catalane » (Lasteyrie, 1827, dans Sigaut, 1975), car le procédé n'intervient pas sur une prairie ou une friche, mais entre deux cultures, ou entre deux cycles cultureux. Cependant, il s'agissait bien là de combustions en fourneaux. Les chaumes ne fournissant pas suffisamment de matière végétale pour cuire la terre, et les plaines n'étant alors que peu boisées, les cultivateurs devaient s'approvisionner en combustible sur les côteaux éloignés. Bien que la place de ces pratiques dans les cycles cultureux ne soit pas les mêmes que celles des écobuages classiques (en tant que techniques de défrichement), elles visent pareillement à amender et préparer le champ pour une nouvelle culture. Ainsi, il nous semble que ces mentions attribuées à des déchaumages à la catalane peuvent tout à fait être considérées (sinon apparentées) aux écobuages des croûtes terreuses. Néanmoins, mis à part cela, est-ce à dire que, historiquement, l'écobuage des terres argileuses n'était que très rarement d'usage dans nos contrées d'Europe ? Ou sinon, surtout cantonné aux plaines continentales de Méditerranée ? Notons que, hors de France, ces pratiques auraient vraisemblablement été courantes dans les plaines argileuses des pays méditerranéens (Espagne, Sicile, Grèce, Algérie ; d'après Millot, 1891 (?) dans Sigaut, 1975).



Figure 29 : Illustration du « déchaumage à la catalane » d'après Lasteyrie (1827, tiré de Sigaut, 1975).

Les données renseignées par Lasteyrie, sont néanmoins incompatibles avec l'illustration en question (à laquelle il renvoie explicitement, p. 42), puisqu'il écrit : « On leur donne 1 mètre de base sur 3 ou 4 d'élévation, et on ramène avec un râteau la terre qu'il range autour des fagots » (sic). Nous supposons que la mesure indiquée serait plutôt en pieds (une trentaine de centimètres), ce qui reste néanmoins incohérent avec cette illustration.

3.5. Le feu agricole « sous toutes ses formes » : techniques mixtes, variantes et antagonismes des feux courants et couvrants

Comme certainement dans toutes les classifications, il existe effectivement des cas intermédiaires. Cela est vraisemblablement le cas au sein même de la seule pratique de l'écobuage, par le seul fait de la variabilité édaphique potentielle des terrains cultivés (plus ou moins argileux, organiques, gazonnés, etc.), mais aussi entre différents types de feux couverts : « *toutes les transitions sont possibles entre l'essartage proprement dit (à feu courant), et l'écobuage* » (Sigaut, 1975).

Nous avons déjà évoqué le cas du **déchaumage à la catalane**, qui pourrait être considéré comme une technique intermédiaire entre l'écobuage des terres argileuses et un déchaumage. Aussi celui que F. Sigaut désigne comme le **brûlot**, qui consiste en un brûlage à feu courant sur un terrain déjà labouré (1975, p. 40 et 28). Le combustible provenant d'autres terrains, ou ayant été réservé au moment du défrichement, si le terrain n'était pas déjà en culture. Bien que ces types de feu ne concernent pas les boisements, mais les landes et autres buissonnaies, il donne l'impression d'une technique qui dérive de l'essartage à feu courant, intermédiaire avec les techniques de jachère.

Nous pouvons également citer une technique originale de préparation culturale, renseignée dans le canton de Besse-en-Chandesse (Puy-de-Dôme) : le **parrat** (Baudet-Lafarge, 1860, p. 72-76). Dans cette pratique, les vieilles prairies dont la fertilité baisse au bout de quelques années et qui sont envahies par les mousses sont défrichées par un dégazonnement très superficiel (« *égratignées* » ; il est d'ailleurs notable que le travail y soit fait à l'araire, un outil, nous l'avons dit, peu adapté à ce type de terrain). Les mottes herbeuses sont ensuite manuellement travaillées (« *fossoyées* ») et secouées pour en séparer au mieux la terre des racines. Ces dernières sont mises en tas ou alignées puis sont brûlées. Le terrain est de surcroît, fumé, et le semis qui suit est enfoui par un labour léger. Cette méthode, bien qu'elle concerne les herbages, n'est effectivement pas un écobuage au sens où nous l'employons, « *puisque l'on s'efforce de séparer le plus possible la terre des herbes et des racines* » (Sigaut, 1975, p. 73), mais aussi, car il ne s'agit pas de fourneaux, mais d'amoncellements des matériaux. F. Sigaut la rapproche de formes de déchaumage (brûlage en tas ?), elle nous évoque aussi les méthodes dites d'écobuage, mais à feu courant, en tourbières. Autre point remarquable de cette pratique : « *l'herbe repousse en même temps que la céréale, et, après l'enlèvement de cette dernière, si on ne laboure pas, on a un pré pour l'année suivante* » (Baudet-Lafarge, 1860). Observation qui illustre bien l'intrication entre pâtures et cultures, nécessaire au renouvellement de la fertilité des terrains.

De plus, il y a effectivement des formes qui peuvent être considérées comme intermédiaires, voire conjuguées, entre essartage à feu courant (abattis-brûlis) et écobuage :

« En Courlande, où l'on exécute souvent de tels défrichements, et où le bois est surabondant, on dispose des bûches en croix les unes sur les autres, on ajoute les gazons sur cet échafaudage, et cette méthode très usuelle est appelée Kitten » (Thaer, 1809 (?), d'après Sigaut, 1975, p. 22)

À propos du « sartage à couvert » des Ardennes : « sont en usage, de prendre du bois de futaie qu'ils transportent sur le terrain dont ils ont renversé le gazon, y mettent le feu et fument ainsi les essarts » (Boissier, 1723 (?), d'après : Gadoud, 1917 ; Blache, 1923).

Ces procédés ne diffèrent sur le fond pas beaucoup des pratiques de l'écobuage, mais il semble qu'ils s'appliquent ici à des boisements relativement mûres et bien développés. Le fait que le bois soit apporté depuis un autre terrain est aussi notable. Selon Blache (1932, p. 207-210), il s'agit en fait d'une adaptation de l'essartage à feu courant, en réponse à l'interdiction des propriétaires forestiers de cultiver dans leurs bois. Il se pratique alors dans des prairies et clairières. Lisons enfin Palissy (1580) :

« En certaines contrées des Ardennes ils coupent du bois en grande quantité, le couchent et arrangent en terre, en sorte qu'il puisse avoir air par dessous : apres ils mettent vn grand nombre de mottes de terre sur ledit bois, sçavoir est de la terre herbeuse en forme de gasons, puis ils font brusler le bois au dessous desdites mottes »

Faut-il croire que dans ce procédé il y a des aménagements en terre (creusements directement sous les troncs ?), ou simplement une disposition du bois adéquate pour assurer la ventilation ? En tous cas, il semble bien que les cultivateurs, aient au sens propre, fait feu de tout bois dans leurs opérations de brûlage à couvert. Le combustible pouvait donc quasiment se limiter au seul gazon et aux herbes des mottes, jusqu'à concerner du bois de futaie, en passant par fagots de taillis et toutes les broussailles et résidus végétaux à disposition.

Il n'est pas vraiment possible de savoir à quel point ces pratiques ont pu être courantes. Néanmoins, il en est une qui semble l'avoir été, ou qui du moins constituait dans certaines localités un système propre, et du reste encore renseigné dans les Ardennes, c'est celui de l'écobuage mené dans des taillis engazonnés. La technique de préparation ne diffère là pas grandement de l'écobuage, si ce n'est que le sol est seulement pelé entre les taillis, toujours pour préserver leurs souches, qui fournissent directement le combustible. Il n'y a toutefois pas d'indications concernant la densité ligneuse de ces boisements. La pratique est indiquée pour des taillis de chêne (Noirfalise et Thill, 1960), de bouleau (Boutry, 1920), et c'est vraisemblablement une pratique tout à fait similaire qui est documentée en Ligurie (Italie) dans des taillis d'aulne, dite **alnoculture** (Moreno et al., 1998 ; Beltrametti et al., 2014). Dans ce dernier exemple, le cycle de rotation culturale est très court, inférieur à 10-15 ans. Cela est suffisamment rare pour être précisé, celle-ci a été confirmée par des analyses palynologiques, qui mettent en évidence une diminution des pollens d'*Alnus* sp., corrélatifs à une nette augmentation des pollens de Poaceae, *Cerealia* et des micro-charbons. D'après les diagrammes palynologiques, il a été proposé que cette pratique remonterait au XI^{ème} s. (Molinari et Montanari, 2016). Cela étant, on peut se demander si d'autres mentions médiévales, qui évoquent des fourneaux en contexte boisés ne pourraient pas correspondre à des systèmes apparentés (Mouthon, 2007).

D'autre part, il existe quelques mentions de différents types de feux menés successivement, sur une même parcelle, avec en ouverture un feu courant (Sigaut, 1975 ; Guillot, 1973). Pour certains de ces cas, cela pourrait s'expliquer par une abondance de combustible disponible, mais dans d'autres, la raison ne nous est pas connue. On pourrait imaginer que de tels procédés seraient adaptés dans des milieux où la densité de végétation (broussailleuse ?) limiterait grandement toute autre opération préalable, mais nous manquons de renseignements pour en discuter. Ceci nous permet néanmoins d'évoquer rapidement le cas des exploitations opportuniste de terrains incendiés, mentionné à propos du modèle archéologique des souches brûlées (Goldberg et Macphail, 2006 ; Partie 1-5.3, p. 26). De telles exploitations ne sont pas propres aux sociétés de cultivateurs, et divers exemples ethnographiques l'illustreraient, mais nous n'avons pas fait de bibliographie spécifique à ce sujet (comm. pers. Thierry

Gé). Par contre, pour ce qui est de l'agriculture, il est maintenant clair – si cela ne l'était pas avant – qu'une zone naturellement incendiée est loin d'être préparée de manière adéquate pour une mise en culture, de même qu'un incendie ne crée pas de lui-même une prairie... (Métailié, 1978 ; Dumez, 2010). Laure (1837), dans son Manuel du cultivateur provençal à propos des Maures :

« Dans les forêts nouvellement incendiées, on coupe également rez-terre tous les arbres qui ont péri par le feu, et on ébranche ceux qui ont survécu. Cette opération se fait, lorsque le pied des arbrisseaux n'excède pas quatre à cinq pouces de diamètre. [...] On nomme taillados le terrain ainsi préparé. Dans le mois d'août, durant la nuit et par un temps très calme, on brûle sur place ces bois abattus, et en automne on jette quelques grains de froment entre les souches des arbrisseaux coupés que l'on recouvre en grattant un peu la terre avec une petite pioche » (p. 174).

L'incendie facilite donc probablement la tâche des agriculteurs, mais il ne dispense pas de mettre en œuvre toute la chaîne opératoire de l'essartage à feu courant (ou le cas échéant, d'une autre méthode). Peut-être qu'il offre l'avantage d'opérer le semis la même année que l'évènement, en dispensant d'un séchage préalable, dans le cas où l'incendie aurait été assez intense, mais cela n'est pas explicite.

Ces différentes techniques, bien que sommairement décrites, montrent la diversité potentielle des usages agricoles du feu et des situations réelles. Les cas intermédiaires et les adaptations du feu courant, qui apparaissent *a priori* comme des « dérives » des deux principales pratiques de feu que sont l'abattis-brûlis et l'écobuage, démontre la constance de ses avantages : le feu nettoie et enrichit la terre. Ces pratiques soulèvent diverses questions techniques et historiques, notamment sur la perméabilité des savoir-faire liés au feu et de l'apparition et l'évolution de ces différentes pratiques. Sont-elles des techniques très locales ? Pour les techniques d'essartage à couvert qui devaient demander une somme de travail particulièrement grande, c'est fort probable. L'alnoculture ou le parrat ne semblent eux pas avoir été ponctuels. Quelle était donc la réelle importance historique de ces pratiques ? Nous n'avons pas la réponse. On peut seulement considérer, au regard de la littérature dépouillée sur le sujet, qu'elles n'étaient pas aussi « ordinaires » que l'abattis-brûlis ou les écobuages pris dans leurs formes les plus générales (que nous avons présentées), et assurément pour la courte période de quelques siècles considérée.

Ces réserves ayant été formulées, compte tenu des procédés opératoires spécifiques aux écobuages et aux abattis-brûlis dans leurs formes les plus « classiques », il est raisonnable de les considérer comme deux méthodes de préparation du champ opposées. Méthodes qui d'ailleurs, en tant que systèmes de culture, sont considérées comme « *absolument indépendant* » (Portères, 1972). Écobuages et abattis-brûlis se distinguent donc principalement sur les aspects suivants :

- L'écobuage s'attaque à un couvert herbacé ou broussailleux (défrichement) alors que l'abattis-brûlis concerne les milieux forestiers (déboisement)
- L'abattis-brûlis se réalise à feu courant maîtrisé, tandis que pour l'écobuage la combustion se déroule dans des structures délimitées avec un feu couvert.
- Le travail de la terre, qui est presque totalement absent de l'abattis-brûlis (se limitant à la couverture des semis), peut être vu comme maximum pour l'écobuage, où le sol est écorché, retourné, séché, brûlé puis épandu.
- L'abattis-brûlis se déroule en majorité selon des cycles cultureux de longue durée (décennaux) alors que l'écobuage peut s'inscrire dans des cycles de courte durée (pluriannuels).

3.6. La carbonisation en meule

Il est difficile d'évoquer les pratiques de feu agro-sylvicoles sans dire un mot sur le charbonnage, dont l'importance historique n'est plus à démontrer. La production de charbon n'a en elle-même rien à voir avec l'agriculture, néanmoins, il est évident que sa chaîne opératoire possède des points communs avec les techniques de feu à couvert du type écobuage, mais surtout de certains essartages à couvert. Nous rappelons ici succinctement les points essentiels du procédé et leurs vestiges archéologiques (les cas des charbonnières en fosses ne seront pas évoqués compte tenu de leurs spécificités structurales, voir : Froeliger, Pernot et Wiethold, 2018 ; Durand, Duval et Vaschalde, 2009 ; Durand et al., 2018).

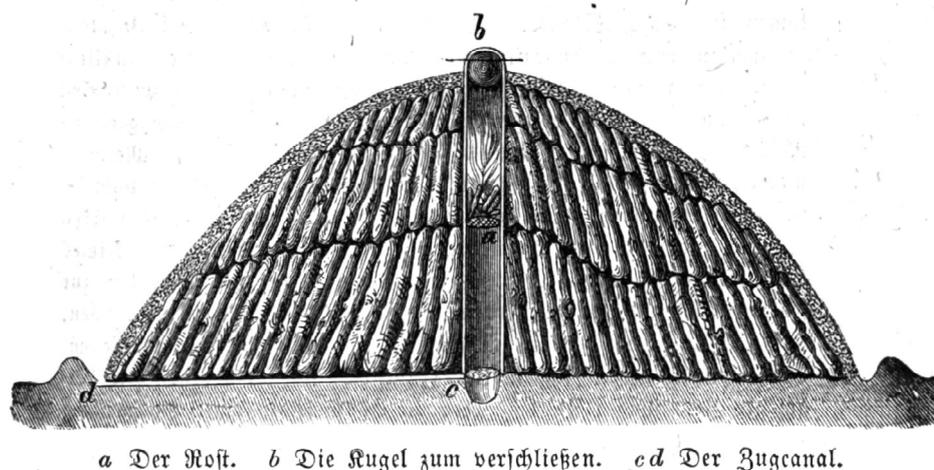


Figure 30 : Schéma d'une meule de carbonisation vue en coupe, d'après von Berg (1860).

Le plus couramment, le charbonnage en meule procède par un empilement de bûches, généralement disposées verticalement et très serrées, de manière concentrique autour d'une cheminée centrale, elle-même en bois (voir aussi d'autres procédés dans : Gerber, Portmann et Kündig, 2002 ; Hirsch et al., 2020). Le tout est ensuite recouvert d'une couverture en terre relativement peu épaisse, en comparaison du volume de bois. Afin d'obtenir des conditions de chauffe réductrices, et donc d'éviter toute inflammation lors de la combustion, le façonnage du couvert vise à obtenir un calfeutrage optimal de la meule. Pour cela, la terre est généralement travaillée, arrangée, par tassement, et parfois avec un mouillage. Il est d'ailleurs souvent fait mention du réemploi de la terre carbonneuse qui se trouve directement sur d'anciennes plateformes (ou celle-là même ; souvent dénommée « fraisil »), en raison de ces caractéristiques très adaptées à cet usage⁵². Bien que la couverture finale semble ordinairement réalisée en terre, dans certains cas, ce sont d'assez fines plaques de gazons qui sont employées en recouvrement (total ou partiel), surface herbeuse plaquée vers le bois (Gerber, Portmann et Kündig, 2002). Elles peuvent également être recouvertes d'une couche de fraisil. Le tapis herbeux ainsi disposé viserait à limiter la percolation de la terre de la couverture à l'intérieur des meules, et restreindre la

⁵² Matériau meuble, pouvant être facilement travaillé, donc à fort potentiel isolant (Battesti, 1992 ; Bonhôte et al., 2000). Nous supposons que cela s'explique aussi par leur acquisition, suite à la chauffe, de propriétés hydrophobes.

formation d'ouvertures accidentelles qui pourraient causer l'inflammation des charbons. Généralement, des trous sont aménagés à la base des meules pour la ventilation. Dans certains cas, c'est toute la structure de la meule qui est rehaussée sur un plancher pour permettre la circulation de l'air (Ludemann, 2010). Par ailleurs, un des points importants qui concerne l'architecture des meules est la nécessité de les construire sur une base plane et relativement uniforme, ce qui peut se traduire selon les cas par une installation directement en surface d'un sol « intact », ou au contraire, à la suite d'un terrassement (Hirsch et al., 2020 ; Izard, 1992). Quant à leurs dimensions, elles sont très variables, de quelques mètres de diamètre, jusqu'à environ une dizaine.

Ainsi, les vestiges de ces charbonnières correspondent le plus souvent aux plateformes sur lesquelles elles reposaient (« aires de faulde »), constituées des résidus remaniés des carbonisations (uniques ou répétées). Il s'agit donc d'anciennes surfaces d'activités, qui se présentent généralement sous la forme de couches noirâtres et très nettement charbonneuses (Bonhôte et Vernet, 1988 ; Dubois, Métaillé et Izard, 1996 ; Dupin et al., 2019 ; Hirsch et al., 2018 ; Paradis-Grenouillet, 2012 ; Rutkiewicz et al., 2019). Bien que mentionnée dans certains contextes (sols sableux ?), l'observation d'une rubéfaction thermique des unités pédo-sédimentaires sous-jacentes aux charbonnières semble plutôt rare (Fabre et Gervet, 1992 ; Hirsch et al., 2018 ; Raab et al., 2017). Ceci peut d'un point de vue général s'expliquer par l'agencement des structures, qui crée des conditions de chauffe peu propice à l'oxygénation des surfaces de fondation, mais aussi par le fait que les zones à la base des meules sont exposées à des températures relativement moins élevées que dans le reste des structures (hormis la partie centrale correspondant le cas échéant à la cheminée ; Paradis-Grenouillet, 2012, p. 142-143 ; Gebhardt, 2007 ; Tintner et al., 2020). Les expérimentations montrent que les températures varient nettement au cours d'une cuisson, et selon les endroits des meules (ibid.). Les températures maximum peuvent atteindre 700-800°C et se maintenir pendant plusieurs heures au-delà de 600°C (Paradis-Grenouillet, 2012). Du fait que les meules sont couvertes de terre et des travaux de préparation des plateformes, les agrégats de sol brûlés peuvent être abondants au sein de ces couches. Les caractérisations micromorphologiques effectuées sur d'anciennes places à charbons confirment les évidences macroscopiques, à savoir que les transformations thermiques de la terre sont globalement peu rubéfiantes (Dupin et al., 2019 ; Fouédjeu et al., 2020 ; Gebhardt, 2007). Suite à la cuisson prolongée et au processus de collecte du charbon produit, la couverture en terre va être largement remaniée, ce qui entrainera logiquement la disparition complète de l'organisation antérieure à la carbonisation (Battesti, 1992 ; Hardy et Dufey, 2015 ; Rouaud, 2013, part. 1.4.3). Ajoutons que, les plateformes de charbonnage archéologiques, montrent usuellement une morphologie de plan circulaire, en adéquation avec l'architecture originale de ces meules (même si les dimensions de ces dernières sont souvent inférieures à celles des plateformes). En outre, il est bon de noter que certains auteurs indiquent que les anciens emplacements des meules de charbonnage peuvent avoir été sciemment cultivés (voir Peuchet, 1808-1814, dans Sigaut, 1975).

On voit donc bien que si le processus de cuisson ressemble d'un point de vue conceptuel à celui des pratiques agricoles de fournelage, le charbonnage en meule se distingue par la nécessité d'obtenir une cuisson totalement réductrice, et en conséquence des produits tout à fait particuliers. Il est néanmoins intéressant de remarquer que l'usage des mottes de gazon, mentionné pour le charbonnage (nous renvoyons aux sources historiques indiquées dans la littérature susmentionnée), ne paraît pas si anecdotique, puisque en fait on le retrouve dans d'autres pratiques de feu, mais qui s'éloignent largement de notre sujet (voir Figure 31).

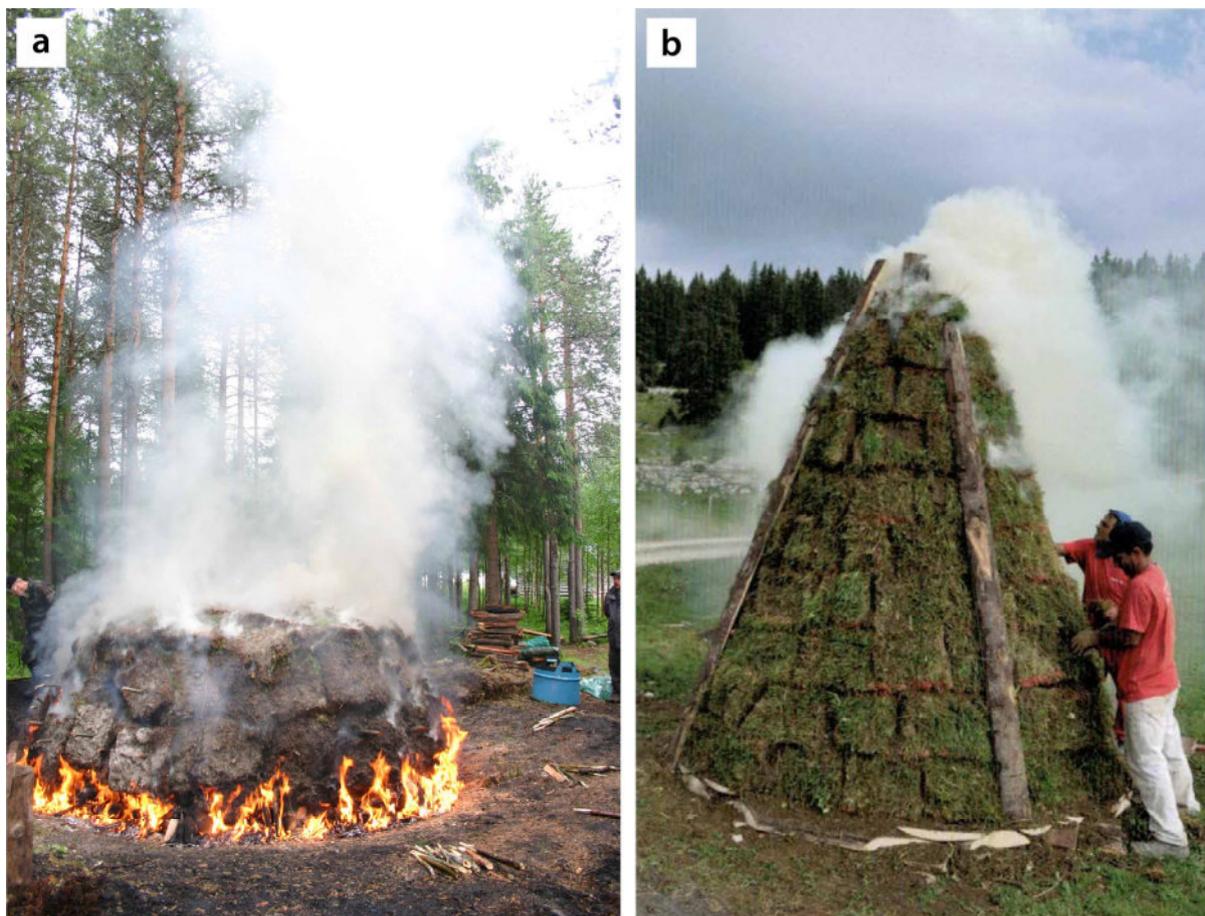


Figure 31 : Exemples d'emplois de plaques de gazon dans des structures de combustion artisanales
(a) Expérimentation d'un four à goudron de pin en Finlande, herbes tournées vers l'intérieur de la meule (crédits : Matkailuneuvonta, « Terva palaa », 2005 ; Wikimedia Commons).
(b) Reconstitution d'une meule pour la fabrication de sable rouge pour la fabrication d'enduit à la chaux, dans le Jura neuchâtelais (Marc Forestier, 2015 ; référence transmise par Vincent Bichet). L'intérieur de la meule est entièrement composé de billes de bois fendues et dressées. Une seule couche de mottes de terre, épaisses d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur clôture le tout, herbes à l'extérieur.

3.7. Le brûlage des souches

Nous avons vu à travers les précédentes techniques agricoles basées sur l'emploi du feu que celles-ci ne concernent pas les souches des arbres. Pour l'abattis-brûlis, l'enlèvement des souches s'oppose tout simplement à sa logique technique. Quant aux écobuages, ces derniers concernent principalement des terrains non boisés, et même si cela est le cas, l'écobuage est alors présenté comme plus adapté que l'essartage à feu courant pour éviter que les racines des arbres ne soient accidentellement atteintes (essartage à feu couvert des taillis). Disons-le d'emblée, nous avons peiné à trouver des renseignements relatifs à l'emploi du feu pour l'élimination des souches d'arbres (hormis ce qui relève du cadre de méthodes forestières actuelles). Au cours de notre recherche, on nous a signalé l'existence d'une pratique de destruction des souches par le feu par des exploitants forestiers (comm. pers. Marie-Claude Bakkal-Lagarde, INRAP ; renseignée dans une forêt des Deux-Sèvres, courant du XX^{ème} s.). Nous avons questionné le service des archives de l'Office National des Forêts à ce sujet. Mr Yvon Bornier, après avoir effectué des recherches en différentes directions, dont auprès des personnels anciens, n'a pas pu nous confirmer une telle pratique sylvicole. Il s'agirait peut-être possiblement de pratiques très locales. Cela étant, il faut bien dire que nous concevons mal comment des souches d'arbres pourraient être détruites par le feu en terre, sans avoir été arrachées et longuement séchées.

Dans presque tous les textes modernes où il est fait mention de l'extraction des souches, il est noté la pénibilité et la difficulté de l'opération (voir p. ex. Séguin, 1974 ; Plaisance, 1962). De façon récurrente, les textes qui indiquent et conseillent l'emploi de poudre explosive l'illustrent bien. Le procédé technique uniquement manuel généralement mentionné est celui de l'abattage dit à *culée noire*. Une tranchée circulaire est creusée tout autour de l'arbre afin d'accéder aux principales racines, qui, coupées, permettront de déchausser l'arbre (Taillardat, 2014 ; Beauverie, 1905). Parfois, la coupe laisse la majeure partie du pivot racinaire en terre, mais elle se fait toujours sous le collet de l'arbre. Une autre possibilité est celle d'un arrachage avec les racines. Une fois la tranchée autour du pivot de l'arbre achevée, elle est prolongée en direction des plus grosses racines, qui pourront alors être soulevées à l'aide de leviers et de cordages. Il est souligné que ce type d'abattage a le bénéfice de récupérer la totalité du fût de l'arbre. Cette méthode était-elle employée dans le cadre de déboisements agricoles ? Peut-être, mais alors on peut se demander quel pouvait être l'avantage de brûler des bois qui auraient pu être valorisés dans de tout autres ouvrages et de bien meilleure manière (voir : Arbois de Jubainville, 1865 ; Ringelmann, 1890). En fait, cela pose la question très vaste des modalités d'apparition des terres de culture permanente et des processus de déboisement définitif. Les exemples historiques nous indiquent d'ailleurs qu'un dessouchage direct du terrain n'était pas toujours la manière la plus pertinente pour opérer un déboisement durable. Le coût d'investissement dans une telle opération pouvait même être contreproductif ; dans certains contextes, il était nettement plus simple de laisser se décomposer progressivement les souches en terres (Plaisance, 1962 ; Ringelmann, 1930, p. 495). Nous ne cherchons pas à réfuter l'existence du brûlage de souches, il est évident que cette opération a été pratiquée, cependant, cette « lacune » documentaire nous incite fortement à penser qu'en la matière de défrichements définitifs d'un terrain, l'usage du feu n'avait certainement rien de systématique.

3.8. Essai de classification et de discrimination des feux agricoles selon leurs produits potentiels

Afin de pouvoir interpréter le plus justement possible les traces de feu qui peuvent être préservées dans les sols, il est indispensable de connaître les effets et traces potentielles d'événements faisant entrer en jeu les mêmes phénomènes physiques, quelle que soit leur origine. C'est ce que nous avons tenté de présenter le plus exhaustivement possible dans les parties précédentes. On voit bien que si sur les questions des modalités et des procédés techniques on dispose d'une certaine abondance d'informations, cela est loin d'être aussi évident pour ce qui est des produits et des vestiges de ces différentes pratiques. La documentation est non seulement très inégale, mais de différente nature selon les techniques considérées. Par exemple, pour l'écobuage classique, nous ne disposons que des textes modernes qui nous éclairent peu sur leurs effets concrets. Au contraire, pour ce qui est des écobuages extra-européens, notre recherche nous a permis de recenser un bon nombre de documents riches d'information. Pour le reste, il nous faut en l'état, inévitablement avancer selon une approche hypothético-déductive. Heureusement pour cela, les connaissances des mécanismes fondamentaux du feu sont suffisamment bien établies pour pouvoir faire quelques propositions, de la même façon que nous l'avons détaillé pour les différents types d'écobuage. Le Tableau 9 présente de manière synthétique les techniques des feux agricoles en fonction de leurs principaux traits fonctionnels et processuels, ainsi que les produits majeurs que chacune est susceptible d'engendrer.

3.8.1. Les types de produits

La confrontation des modalités de combustions et des matériaux concernés permet de proposer une première variable classificatoire qualitative, qui distingue les principales catégories de produits formés. Nous les subdivisons en quatre types : les cendres (végétales), les charbons, les carbonisats et les terres cuites. Nous entendons par **carbonisats** l'ensemble des matériaux végétaux, organiques (voire organo-minéraux) carbonisés. Ils traduisent une chauffe en conditions d'oxygène insuffisantes (cuissons réductrices), et sont plutôt associés à des températures basses, inférieures à 500-600°C. Le processus même de combustion engendre de façon localisée des conditions réductrices par la transformation de l'oxygène en CO₂, mais tant que celui-ci est disponible, même en proportions faibles, les carbonisats organiques continueront à s'oxyder pour être totalement pyrolysés, jusqu'aux cendres (comme cela se produit lors des feux de surface consommant les litières forestières ou dans les feux de tourbe). Les carbonisats peuvent être définis comme un ensemble varié de composés carbonés pyrogéniques. Les **charbons**, qui rentrent tout à fait dans cette définition méritent d'être considérés séparément, au vu de leur importance en tant qu'objet d'étude à part entière dans les domaines archéo-paléo-environnementaux. Les carbonisats sont donc entendus comme des matières amorphes. Ils s'opposent, schématiquement, aux **cendres**, produits d'une pyrolyse complète (combustion) et formées à des températures d'environ 400°C et au-delà. Tout cela est évidemment assez théorique, car en réalité, les matières organiques et végétales affectées par la chauffe peuvent être perçues comme un continuum d'altérations, depuis les matières humifères faiblement chauffées réfractaires aux matériaux graphitiques et autres suies (« black carbon » au sens large ; González-Pérez et al., 2004). De plus, cendres et carbonisats sont aussi susceptibles de se retrouver étroitement mêlés. Ce qui, semble-t-il, serait spécifiquement le cas des produits résultants des écobuages de gazon, dont les fourneaux sont

pour l'essentiel formés des herbes et des mats racinaires, et comparativement, peu de matière minérale. A. Thaer ou vraisemblablement plutôt son traducteur E.-V.-B. Crud (1811-1814, T.3, p. 122 ; note de bas de page) dénomme les produits sombres à bruns noirâtres de ces fourneaux observés en Suisse sous le terme « brulin ». Un autre exemple de carbonisats, hors du domaine agricole, est celui des poussières charbonneuses et terreuses dénommées en certaines localités « fraisil », qui caractérisent les anciennes plateformes de charbonnage (Battesti, 1992 ; Dubois, Métailié et Izard, 1996 ; Hardy et Dufey, 2015). Quoique dans ce cas précis, ces résidus carbonisés dérivent du mélange de sédiments avec quasi uniquement des charbons issus de végétaux ligneux. En tout cas, ces carbonisats s'opposent aussi de plusieurs manières à la dernière catégorie que nous appelons les **terres cuites**. Elle regroupe les matériaux essentiellement minéraux chauffés à différentes intensités, mais dans des conditions globalement non limitées en oxygène (oxydantes). Il est difficile de définir concrètement à partir de quel moment la terre n'est plus seulement chauffée, mais cuite⁵³. En effet, les modifications minéralogiques engendrées par la chauffe sont progressives, très variables selon la nature de ces minéraux et étroitement dépendantes des températures atteintes et de leur durée. On pourrait de manière très simplifiée considérer que la cuisson démarre au moment où l'eau structurale des minéraux argileux commence à être libérée (processus de déshydroxylation), ce qui entraîne une désorganisation de leur structure. Pour certaines argiles, il débute dès 200-400°C environ (Karathanasis, 2008). C'est dans la même gamme de températures que peuvent tout juste apparaître des modifications dans les formes du fer, qui jouent un rôle majeur dans les changements de couleur des matériaux. Sous formes oxydées, le fer donne des teintes vives, souvent dans des gammes rouges, telles que documentées dans les écobuages. Il est évident que nous simplifions grandement les situations, mais c'est faute de mieux, compte tenu de la partialité des données dont nous disposons, dans une approche comparative.

Cela étant, ces quatre catégories de produits permettent de distinguer de façon schématique, d'une part, des conditions de chauffe globalement oxydantes de celles réduites, et de l'autre, des produits d'origine organique de ceux minéraux (Tableau 8). Un tel découpage qui serait inapproprié dans le cas de structures de chauffe plus complexes et aménagées (artisanat céramique ; voir Pernot et Frerebeau, 2018), nous paraît ici justifiable, puisque les aménagements et l'architecture des fourneaux ne requièrent pas de travaux de la terre comparables à ceux des pratiques artisanales. Les mottes et plaques de terres sont employées telles qu'elles ont été décapées, sans malaxage ou autre façonnage. Cette absence pourrait d'ailleurs avoir un rôle positif dans la circulation de l'oxygène à l'intérieur des structures, et des mottes mêmes, par la préservation (le cas échéant) de la porosité structurale naturelle du sol. Nous nous demandons en fait si cela n'interviendrait pas aussi dans l'acquisition aussi marquée (volumineuse) de traits d'oxydation, à des températures de cuisson qui restent tout de même peu élevées⁵⁴. Encore un exemple du manque d'information auquel nous sommes confrontés.

⁵³ Au sens premier, **cuire** : « soumettre une matière à l'action du feu ou d'une source de chaleur correspondante qui modifie cette matière dans sa substance, généralement pour la rendre propre à un certain usage » (TLFi). Ajoutons que dans les techniques potières, des structures fonctionnant à des températures aussi « basse » que 500°C sont mentionnées (Pernot et Frerebeau, 2018 ; Velde et Druc, 1999, p. 250-253).

⁵⁴ Et a contrario de ce qui est souvent observé dans le cas d'éléments en terre préalablement préparés, malaxés, engendrant une perte de porosité « connectée », ce qui peut être un frein au développement d'une rubéfaction thermique (Velde et Druc, 1999 ; Forget et al., 2015).

D'autre part, il faut considérer une spécificité si flagrante qu'elle peut être oubliée : celle que dans les techniques de fourneaux agricoles, et surtout ceux des croûtes terreuses, la terre constitue à la fois le principal composant architectural et l'objet que l'on cherche à transformer. Ces différents éléments illustrent la singularité des pratiques de feux agricoles, et justifient selon nous l'adoption des critères précédemment décrits. Ces critères permettent enfin de concilier les points de vue des domaines technologique (agriculture) et naturaliste (incendies de végétation).

Les deux autres variables de classement que nous proposons sont celles de l'importance des altérations physiques sur le sol et de la production de charbons, selon une échelle relative. La même chose pourrait être proposée pour les carbonisats et les cendres, mais nous y voyons trop d'incertitude. Nous avons également envisagé de proposer des ratios entre certaines de ces catégories, mais nous faisons le même constat d'incertitude.

Tableau 8 : Proposition de classification schématique des principaux types de produits résultants des pratiques feux agro-sylvo-pastorales et des feux de végétation naturels

Atmosphères de cuisson dominantes Types de matériaux concernés	Réductrices	Oxydantes
Végétaux Matériaux organiques	Charbons Carbonisats	Cendres
Matériaux minéraux et organo-minéraux	Carbonisats	Terres cuites

Tableau 9 : Synthèse des principales caractéristiques des différents feux agricoles recensés et de leurs produits potentiels relatifs.

	Milieux d'application	Types de feu	Transfert de fertilité (à l'échelle du terrain traité)	Matériaux traités					Types de produits principaux (présence/absence)				Quantités relatives de charbons produits	Importance relative des modifications physiques du sol	
				végétation ligneuse haute	végétation ligneuse basse	herbe / chaume	litière / mat racinaire / humus	horizon organo-minéral / minéral	Cendres	Charbons	Carbonisats	Terres cuites			
Techniques de préparation du champ <i>sensu stricto</i>	Abattis-brûlis	forêts	courant	non	+		(+)	litière		+	+	(+)	-	++	-
	Écobuage des gazons	herbages	à couvert	Apport de fagots			+	+	(+)	+	(+)	+	-	+	+
	Écobuage des tourbes	herbages buissons	courant ou concentré (à couvert)	non		+	+	+		+	(+)	+	-	(+)	+
	Écobuage des croûtes terreuses	herbages buissons (terres nues)	à couvert	non		(+)	+	+	+	+	(+)	(+)	+	(+)	+++
	Essartage à feu couvert	forêts (buissons) herbages	à couvert	non (apport additionnel possible)	+	(+)	+	+	+	+	+	+	+	+++	+ à +++
	Parrat	herbages	concentré	fumure			+	+		+	-	(+)	-	-	-
Autres techniques agricoles	Déchaumage à la catalane	champs	à couvert	apport combustible		+	chaume (+herbe)	+	(+)	+	(+)	+	+	+	++
	Brûlage des chaumes	champs	courant ou concentré	non (apport additionnel possible)			chaume (+herbe)			+	-	-	-	-	-
	Brûlot	champs	courant	apport combustible		+	+			+	(+)	-	-	(+)	-
	Cherbottage et brûlages en tas divers	indistinct	concentré	non	+	+	+			+	+	(+)	(+)	+	+
Incendies naturels	prairies buissons forêts	courant à « concentré »	-	+	+	+	(+)		+	+	+	(+)	- à +++	- à +	

3.8.2. Quelques réflexions et interrogations générales sur la visibilité archéologique potentielle des techniques agricoles du feu

Ce bilan très synthétique et projectif permet de formaliser le potentiel de production de traces matérielles de chacune de ces pratiques. Mais il s'agit bien là d'un potentiel primaire. Pour en arriver au potentiel de préservation effectif des différents produits, il faudrait prendre en compte une foule de paramètres, qui ne peuvent être définis a priori. Il nous paraît, à ce stade, plus pertinent de chercher à distinguer les techniques dont la visibilité potentielle, du point de vue géoarchéologique, devrait être maximale. Nous nous bornerons donc à quelques remarques très générales.

La présence des cendres ne nous paraît pas être un critère discriminant, car elles sont susceptibles d'être identifiées dans tous les cas de combustion. Elles doivent constituer le produit majoritaire des feux à courant, mais on ignore en fait leur productivité exacte dans les feux à couvert. Par ailleurs, les cendres sont extrêmement peu susceptibles d'être préservées en contexte de plein air, ce qui fait douter de leur pertinence diagnostic dans le cadre de pratiques agricoles (Boissinot et Brochier, 1997). Une exception semble toutefois envisageable, celle où des buttes écobuées ne seraient pas démantelées, les cendres se trouveraient alors enfouies sous la terre cuite, mais nous avons dit que nous ne connaissons pas ce mode opératoire en Europe. Dans l'éventualité de leur préservation, elles pourraient certainement permettre d'apporter quelques informations intéressantes pour avancer sur la nature du combustible ou du milieu d'application des fournelages (Canti et Brochier, 2017)

Les carbonisats doivent théoriquement avoir une certaine importance pour plusieurs des pratiques considérées, et précisément celles à feu couvert où les matériaux organiques sont plus abondants (écobuages des gazons et des tourbes). Ces carbonisats devraient néanmoins être de nature assez variée (humus pyromorphiques dans le cas d'abattis-brûlis, mats racinaires carbonisés pour les fourneaux de gazons, semifusinites dans les incendies, etc.), mais nous ne connaissons pas bien leur potentiel de préservation et les possibilités existantes pour les caractériser et éventuellement les discriminer (les approches moléculaires sur les matières organiques anciennes offriraient des possibilités intéressantes, voir : Kaal et al., 2008 ; voir aussi : Deldicque et al., 2023). Pour les cas des écobuages des croûtes terreuses, présentant des altérations minérales très claires d'oxydation, on se demande si le combustible aurait plutôt tendance à former des cendres que des carbonisats. On peut par contre raisonnablement affirmer que leur résistance mécanique doit être très largement inférieure à celles des charbons, et surtout des charbons de bois (Scott et al., 2000).

Concernant les charbons, on peut s'attendre à ce que leur production soit relativement plus importante dans les pratiques forestières et tout spécialement dans les techniques d'essartage à feu couvert, où des quantités de bois relativement importantes devaient être employées. Cependant, les charbons offrent surtout la possibilité, via l'analyse anthracologique (identification taxonomique, mais également critères dendrologiques), d'essayer de distinguer entre des pratiques en milieu forestier mature, d'autres où le bois est généralement constitué des branchages de quelques années au plus (fagots).

Finalement, le critère qui apparaît comme le plus discriminant est bien celui des terres cuites, qui ne caractérise qu'un nombre réduit de pratiques, celles de fournelage. Mais toutes les techniques de fourneaux ne sont pas à même de cuire la terre dans les mêmes proportions. Les écobuages des croûtes terreuses, en fourneaux, et comprenant une architecture avec un volume de sol tout à fait remarquable, se distinguent grandement. On présume que ce constat doit être similaire pour les essartages à couvert, à moins que ceux-ci ne s'appliquent qu'au strict gazonnement de sous-bois et non à une épaisseur de terre plus importante. Peut-être faudrait-il faire encore des subdivisions au sein même de ces essartages, les différencier selon leurs milieux physiques, s'ils portent sur de véritables prairies boisées ou des taillis non engazonnés (voir Partie 2-3.5, p. 88). Outre cela, il nous semble donc assez clair que les pratiques de feu à couvert sont les plus à même d'engendrer des traces, par leur nature et leur quantité, les plus abondantes. Toutefois, nous avons vu concernant les écobuages extra-européens que l'on ne sait pas grand-chose du devenir de ces résidus. Il a été postulé que les éléments en terre thermo-rubéfiés disparaîtraient complètement à l'échelle de quelques années. Les textes historiques qui déconseillent son emploi dans des contextes dits vitrifiables suggèrent bien que la terre ne doit pas être cuite à un niveau trop important. La terre rougeâtre obtenue doit être friable. Étant donné les indications de températures de chauffe dont on dispose, somme toute modérées (< 600°C), il est très probable qu'avec le temps, certaines argiles ayant été déshydroxylées par la chauffe puissent subir un processus inverse, en développant de nouvelles structures minérales argileuses par l'interaction avec l'eau ambiante (processus de réhydroxylation : formation de nouveaux composés hydroxydes en liaison de feuillets argileux ; Hamilton et Hall, 2012 ; Heller et al., 1962). Mais à quelle vitesse, et dans quels contextes ? Ce phénomène pourrait-il suffire à expliquer l'absence de traces de terres cuites dans des archives pédosédimentaires alors que les charbons de bois peuvent, eux, être très abondants ? Certaines céramiques, cuites à basse température, ou improprement décrites comme « mal cuites » ne sont toutefois pas rares, même hors des gisements archéologiques au sens strict. Nous faisons face à bien plus d'interrogations que de réponses, mais il faut prendre en compte que les pratiques en fourneaux sont celles qui devraient induire les modifications les plus importantes sur les sols, au moins à titre d'hypothèse de travail.

Reste un point essentiel à considérer, c'est que ces techniques concernent des terres cultivées. Ces produits, de quelque événement dont ils résultent, devraient donc être au moins superficiellement remaniés par les travaux aratoires. Les produits des techniques de feu courant, qui sont initialement déjà assez limités, et que l'on retrouve dans des systèmes de cultures quasi permanents (feux de chaumes, brûlot, et autres brûlages en tas ponctuels), voient donc leur potentiel de préservation d'autant plus réduit. Pour ce qui est des fourneaux, dont les résidus sont démantelés, épandus ou enfouis par un labour, cela implique que ces résidus vont presque immédiatement après leur formation se retrouver en position secondaire. Et, si les emplacements des fourneaux mêmes sont effectivement grattés pour qu'il n'en reste aucun résidu, comme plusieurs textes modernes l'indiquent, il ne faut pas espérer retrouver la base de ces structures. De plus, l'écobuage est classiquement une technique de préparation du champ qui amorce un cycle cultural. Plus le nombre d'années de cultures successives sera grand, et plus la fragmentation et la dispersion de ces produits seront accentuées par les labours. Selon ce point de vue, c'est théoriquement dans les secteurs les plus rarement cultivés, ou lorsqu'elles s'inscrivent dans des cycles de friches longues (voir Tableau 7, p. 43) que leur préservation devrait être la meilleure. En cela, les vestiges d'écobuages pratiqués dans des systèmes majoritairement herbagers, devraient être moins érodés que ceux des systèmes où les cultures dominent (cas notamment du déchaumage catalan). Dans le même ordre d'idée, il y aurait aussi les circonstances où les feux viseraient avant tout à établir ou

renouveler le milieu végétal (en l'occurrence plutôt des prairies) et dans lesquelles une seule et unique mise en culture serait réalisée⁵⁵. Ainsi, il ne faudrait pas négliger *a priori* le rôle potentiel des techniques des agricultures temporaires, par rapport à celles répétées et « intensives ».

Mais ce n'est pas tout, pour dresser un état des lieux complets des potentialités de ces différentes pratiques, il serait nécessaire de considérer toutes les altérations post-dépositionnelles (anthropiques ou non) que ces différentes traces pourraient subir. Nous avons d'ailleurs vu par exemple que certains écobuages favoriseraient l'activité de la pédofaune. Même sans cette stimulation, avec le temps, le brassage biologique, d'autant plus fort en surface, peut rapidement faire disparaître toute trace de structuration de matériaux qui s'y sont déposés. Certains auteurs estiment que l'activité lombricienne (vers anéciques), peut selon son intensité, brasser et retourner l'équivalent de 10 cm de sol en l'équivalent d'une décennie à une centaine d'années (Balek, 2002 ; Boissinot et Brochier, 1997, p. 53 ; voir aussi Schwartz et Gebhardt, 2011). Au contraire, en l'absence d'enfouissement rapidement des résidus, en étant soumis aux agents naturels, ils peuvent être très rapidement exportés par le ruissellement de surface, l'érosion éolienne, etc. Cela est tout à fait probable dans le cas d'abattis-brûlis, où le sol n'est souvent que superficiellement hersé après le semis, et si mené dans des contextes topographiques hauts, favorables à l'évacuation (c'est le phénomène proposé pour le néolithique par Gerlach et al., 2012). Ces différents obstacles invitent logiquement à se focaliser sur la recherche de paléosols cultivés, qui bien que rares, existent (voir Partie 1-4, p. 20). Nous avons vu dans la littérature traitant des écobuages africains et méditerranéens (déchaumage à la catalane) qu'ils étaient pertinents dans certaines zones de plaines ou dépressionnaires avec une humidité marquée. Ce sont des secteurs d'accrétion sédimentaire, qui sont parmi les plus propices à la préservation de paléosols par l'enfouissement, et donc a fortiori de paléosols cultivés (Brochier, 1991a ; Boissinot et Brochier, 1997). Ce sont les secteurs sur lesquels nous avons concentré nos recherches.

Nous ne pousserons pas plus loin ces premières pistes de travail. Il faut néanmoins retenir que, certaines de ces pratiques n'ont vraisemblablement aucune, voire très peu de chance d'être mise en évidence dans les archives pédo-sédimentaires (feux de chaumes à courant, brûlots, parrat), tant par leurs modalités de mise en œuvre que leur place dans les cycles culturels. Au contraire, d'autres pratiques, en considération de l'importance de leurs altérations physiques sur le sol, doivent *théoriquement* être tout à fait identifiables (écobuage des croûtes argileuses, essartage à feu couvert). Dernier point, qui ne concerne cependant plus les traces potentielles directes, celui que pour toutes les combustions menées à feu couvert, il ne devrait (quasiment) pas y avoir d'exportations de particules carbonisées dans les colonnes de fumée (combustible en position inférieure et courant de convection restreint). C'est-à-dire que leur participation aux influx micro-charbonneux des séquences de milieux humides devrait être considérée comme nulle, sinon négligeable ou uniquement liée à des apports alluvio-colluvionnés.

⁵⁵ Les textes le mentionnent pour l'abattis-brûlis, et c'est le cas du parrat, on peut donc raisonnablement l'envisager pour l'écobuage.

3.8.3. Essai de modélisation

Nous avons essayé, dans la Figure 32, de schématiser les différences de potentialité de production de traces physiques des feux agro-sylvo-pastoraux que nous avons évoqués, en fonction de leurs chaînes opératoires et de leurs principaux milieux d'application. Le critère de distinction primordial retenu est un gradient simple de complexité des feux, partant des feux de surfaces jusqu'à ceux impliquant une véritable architecture⁵⁶. Plutôt que de chercher à discriminer par leurs produits ces différentes pratiques⁵⁷, dont nous avons vu que certains aspects restent hypothétiques, voire nous sont inconnus, ce modèle centralise et met en exergue les pratiques dont la visibilité archéologique potentielle est maximale. Trois pratiques nous paraissent donc centrales, dont les modalités de mises à feu nous semblent fortement apparentées, mais qui doivent se signaler par des aspects différents. L'une caractérisée par une maximisation de la production de charbon (charbonnage en meule, cuisson réductrice, oxygénation minimale), l'autre par une cuisson d'un large volume de mottes de terre non travaillées (écobuage des croûtes terreuses, cuisson à couvert, mais non complètement réductrice), et la dernière, qui serait finalement quelque peu intermédiaire (essartage à couvert), dont nous supposons que les produits pourraient tantôt se rapprocher de l'une, tantôt de l'autre, selon la nature des éléments en terre (gazons ou terre) et du combustible (bois de taillis ou de futaie). L'expérimentation pourrait éventuellement permettre de préciser ces incertitudes.

Le graphique illustre que d'un point de vue géoarchéologique, la majorité des feux courants anthropiques devraient être confondus avec les traces d'incendies naturels. Les feux courants ou faiblement concentrés appliqués en contexte de champs pourraient a priori être dissociés de ces derniers, sous réserve de contextes suffisamment propices (sols cultivés enfouis), et avec des outils d'analyses géoarchéologiques à fine résolution. Certaines techniques sont ciblées à l'endroit qui nous a paru le plus approprié, néanmoins il faut considérer que leur position n'est pas « figée », mais plutôt un « centroïde ». Par exemple, nous avons dissocié deux cas schématiques de brûlages pastoraux, l'un régulier, visant à un renouvellement fréquent des prairies ou en voie d'embroussaillement

⁵⁶ Si l'on cherchait à catégoriser l'écobuage et l'essartage à couvert, selon une classification archéologiques des modes de combustion, par exemple celle donnée par Carolina Mallol, Susan Mentzer et Christopher Miller (2017), il est indiscutable qu'il faille les considérer comme des structures contenues ou closes (« *contained features* »). Et plus précisément dans le sous type des structures les plus complexes : « *Fire installations* » :

« *Constructed containers that range from partially subterranean to freestanding. Fire installations have prepared substrates, as well as walls and a roof or ceiling (either constructed or temporary, as with the addition of a cooking vessel) that contain the fire in three dimensions and reflect heat. Ventilation systems are also constructed in the substrate, walls, or roof. These systems can include vent covers or flues, and may function passively, as by wind or convection through an opening, or actively, as with bellows* ».

En effet, dans ces pratiques, le sol est largement préparé puisqu'il a été préalablement pelé, puis la combustion se déroule sous une chape de gazons ou de mottes de terres, plus ou moins architecturées, et de manière à obtenir une ventilation adéquate. Cette affirmation n'est pas anecdotique, car comme l'illustre la classification de ces auteurs, les feux agricoles sont presque toujours exclusivement considérés comme des feux courants, non clos. De plus, ces feux anthropiques ne sont pas clairement dissociés des incendies naturels, ce qui peut néanmoins se justifier au vu de leur caractère discret. Cependant, avec la considération de ces pratiques en fourneaux, les techniques agricoles sortent de la catégorie typologique la plus simple (« *uncontained natural fire* ») pour se retrouver dans la plus complexe.

⁵⁷ Ce que nous avons dans un premier temps tenté de faire, mais la proposition ne prenait pas en compte autant de critères, tant vis-à-vis des possibilités techniques que de la variété des produits du feu (voir la Figure 4 dans Menbrivès et al., 2019). La Figure 32, qui ne discrimine pas les pratiques de fourneaux entre elles, nous paraît néanmoins plus juste.

(infradécennal), de ceux visant à « ouvrir » une forêt. En réalité, il serait peut-être plus juste de les considérer comme un continuum de pratiques qui se confondraient plus ou moins avec la ceinture tracée pour les feux naturels (depuis les feux annuels de prairie au déboisement de forêt « primaire »). La même remarque est probablement vraie pour ce qui est des feux à vocation cynégétique, mais nous n'avons pas étudié ces pratiques en détail. D'autres points de ce schéma pourraient encore être commentés (p. ex. que faire des milieux de type prés-bois ?), nous insisterons seulement sur le fait qu'il faille le considérer comme une formalisation d'hypothèses de travail, qu'il faut maintenant confronter aux découvertes géoarchéologiques.

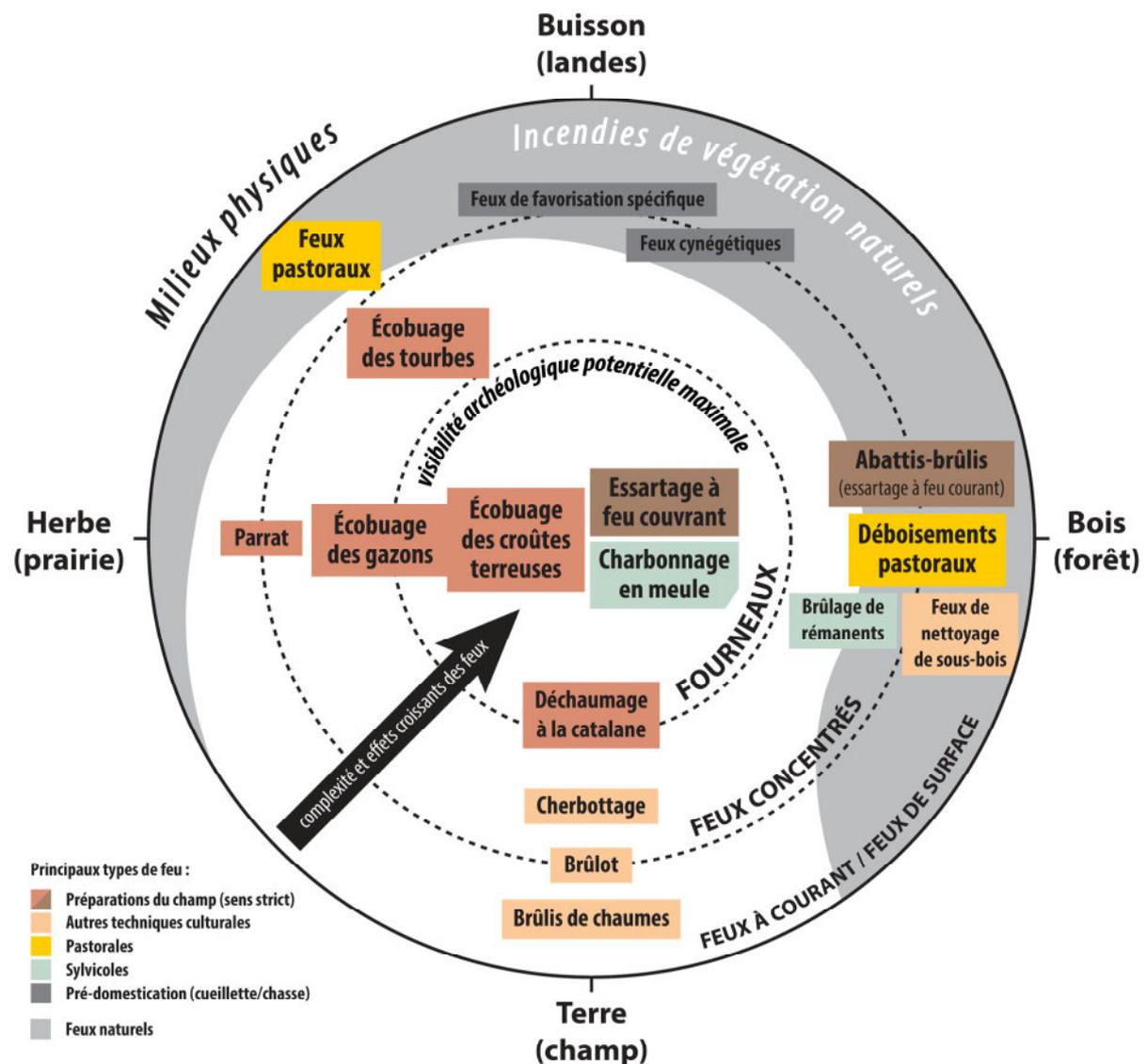


Figure 32 : Modélisation de la visibilité géoarchéologique potentielle des feux agro-sylvo-pastoraux et naturels.

Partie 3 :
Démarche et méthodes d'étude

1. Un premier inventaire issu de l'analyse de la littérature grise

Les vestiges décrits comme des foyers d'essartages, se manifestant sous la forme de traces plus ou moins étendues de sédiments rubéfiés, nous sont apparus comme les structures les plus pertinentes à confronter à notre modèle théorique. Une recherche documentaire portant sur ce type de phénomènes dans la documentation archéologique grise a été entamée (rapports de diagnostics et de fouilles pour la plupart préventives). L'objectif était d'établir un premier état des lieux, d'entreprendre la mise en place d'une base de données, et de cibler des secteurs dont le potentiel serait a priori plus pertinent pour l'étude de telles structures.

Cette recherche a été réalisée sur la base de ressources documentaires Dolia de l'INRAP, complétée par des recherches annexes. Étant donné la récurrence des phénomènes liés au feu dans les archives archéologiques préventives, les recherches ont été effectuées, en prenant principalement comme point de départ des mentions relatives à des interprétations archéologiques des faits rencontrés, afin de limiter le nombre de références hors de nos recherches (Tableau 10). La recherche de ces mots-clés a été réalisée dans les notices et les pleins textes, excepté pour certains beaucoup trop généraux, livrant un nombre de résultats impossible à traiter. Plus de 1100 références d'opération ont été recensées (à ce jour 1165). Pour 182 opérations, seuls la notice et le thésaurus étaient accessibles. 983 rapports d'opérations ont été consultés. Un nombre notable de rapports nous ont été aimablement transmis par les responsables des opérations concernées, avec parfois de la documentation complémentaire (surtout photographique).

Les phénomènes que nous avons recherchés dans ces rapports sont toutes les structures enregistrées comme foyers d'essartages, chablis brûlés ou apparentés (sans a priori vis-à-vis de leur structuration effective ni de leur fonction précise). Nous avons également retenu toutes les traces de combustion hors-sites archéologiques sensu stricto (occupations, sites funéraires et artisanaux) et non « archéologiquement structurées », autrement dit, les structures liées au feu indubitablement excavées (fosses de combustion) ont été exclues. Certaines structures en creux, possédant dans leur remplissage, des produits de chauffe, mais dont le lien entre les deux n'était pas certain ont néanmoins été retenues.

Ainsi, 646 sites ont été exclus, ce qui laisse 509 sites possédant des mentions de structures jugées potentiellement pertinentes (à divers degrés). Nous avons commencé à incrémenter ces sites et leurs découvertes dans une base de données. Néanmoins, il nous est rapidement apparu à quel point la diversité des méthodes d'enregistrement et de la documentation rendait complexe cette base de données. En outre, les phénomènes recensés dans cet inventaire n'ayant pas été analysés (hors cas rares), leur interprétation ne peut reposer que sur des comparaisons morphologiques a posteriori, avec des phénomènes qui eux sont étudiés et expliqués. En outre, compte tenu du caractère ubiquiste des produits du feu, la prudence s'impose notamment eu égard à la possibilité d'une convergence de faciès entre des phénomènes de différentes origines. Pour ces différentes raisons, nous avons préféré d'abord nous concentrer sur l'analyse approfondie de cas d'étude. Les premiers résultats de ce travail seront présentés après.

Tableau 10 : Liste des termes recherchés dans la base de données documentaire Dolia.

Recherche	Notice	Texte	Recherche	Notice	Texte
paléo(-)incendie(s)	oui	oui	bûcheronnage(s)	oui	
incendie(s) naturel(s)	oui	oui	foyer agricole	oui	oui
incendie(s) agricole(s)	oui	oui	foyer(s) d'essartage(s)	oui	oui
brûlis	oui	oui	branche(s) brûlé(e-s)	oui	oui
brûlage(s)	oui	oui	branche(s) calciné(e-s)	oui	oui
essartage(s)	oui	oui	branche(s) carbonisé(e-s)	oui	oui
écobuage(s)	oui	oui	racine(s) brûlé(e-s)	oui	oui
feu(x) agricole(s)	oui	oui	racine(s) calciné(e-s)	oui	oui
feu(x) sylvicole(s)	oui	oui	racine(s) carbonisé(e-s)	oui	oui
feu(x) courant(s)	oui	oui	souche(s) brûlé(e-s)	oui	oui
feu(x) souche(s)	oui	oui	souche(s) calciné(e-s)	oui	oui
feu(x) forêt(s)	oui	oui	souche(s) carbonisé(e-s)	oui	oui
feu(x) bûcheronnage(s)	oui	oui	châblis brûlé(s)	oui	oui
feu(x) déboisement(s)	oui	oui	châblis calciné(s)	oui	oui
feu(x) déforestation(s)	oui	oui	châblis carbonisé(e-s)	oui	oui
feu(x) défrichement(s)	oui	oui	châblis rubéfié(e-s)	oui	oui
feu(x) dessouchage(s)	oui	oui	charbonnière(s) rubéfaction(s)	oui	oui
essarter	oui	oui	charbonnière(s) rubéfié(e-s)	oui	oui
déboisement(s)	oui		trace(s) déboisement(s)		oui
déforestation(s)	oui		trace(s) déforestation(s)		oui
défrichement(s)	oui		trace(s) défrichement(s)		oui
dessouchage(s)	oui		trace(s) dessouchage(s)		oui

2. Les sites d'étude

Nous présentons dans ce mémoire, les résultats d'analyses obtenus pour quatre sites d'étude (Vaudes, Lac de Chalain, Marais de Limagne, Sommet du Puy de Dôme ; Figure 33), ainsi qu'un autre, pour lequel nous n'avons pas encore réalisé de caractérisation avancée en laboratoire, mais dont les premières observations de terrains se sont révélées très intéressantes pour notre problématique (site des Marais de Saint-Gond).

Les phénomènes que nous avons étudiés, bien qu'ils se montrent relativement variés, possèdent tous des caractères morphologiquement proches de certains des faits enregistrés comme foyers d'essartages ou de déforestation, dans la littérature grise. Les traces du site de Vaudes sont tout à fait semblables avec celles que nous avons présentées de Pagny-sur-Moselle. Pour les sites de Chalain et de Saint-Gond, nous avons également relevé des mentions de tels phénomènes dans des opérations antérieures. Les phénomènes de Limagne s'en écartent quelque peu, mais ils ressemblent à des découvertes faites sur d'autres sites, interprétés de la même manière. Ce sont les raisons qui ont suscité notre intérêt.

Le Tableau 11 présente synthétiquement les analyses que nous avons réalisées, dont les méthodes sont détaillées dans la partie suivante. Les contextes de chaque site seront présentés dans leur partie respective.

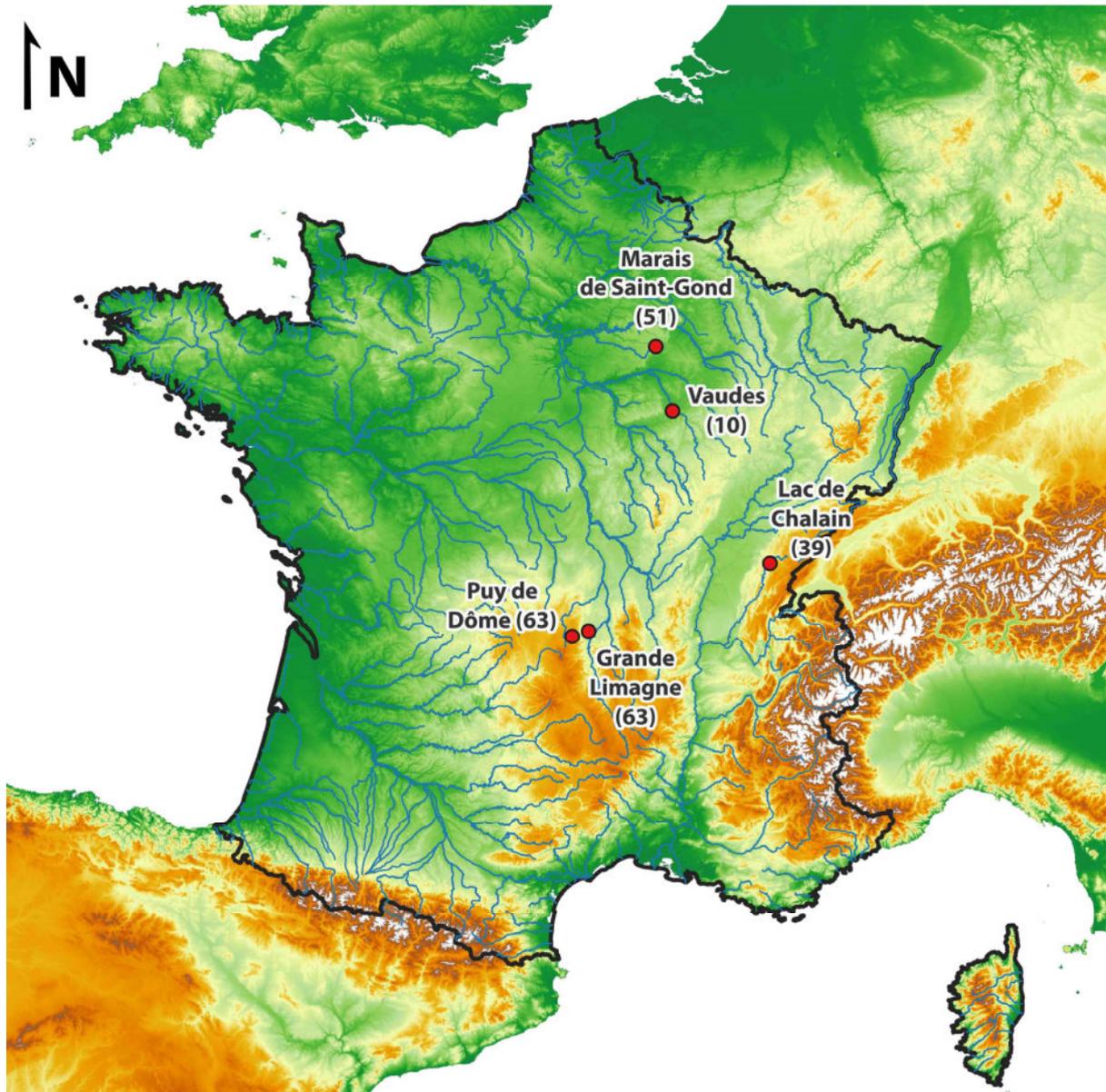


Figure 33 : Carte des sites d'études.

Tableau 11 : Bilan des analyses réalisées et présentées dans ce travail.

Site	Vaudes "Les Trappes" (Aube)	Lac de Chalain (Jura)	Marais de Grande Limagne (Puy-de-Dôme)	Sommet du Puy de Dôme (Puy-de-Dôme)	Marais de Saint-Gond (Marne)
Contexte de la recherche	Collaboration analytique et interprétative suite à une fouille préventive programmée (Resp. Arthur Guiblais-Starck, INRAP, 2017)	Opération géo-archéologique et paléo-environnementale programmée (Resp. Christophe Petit et Hervé Richard, 2021-2022-en cours)	Collaboration analytique et interprétative de matériaux provenant de plusieurs anciennes opérations (Coll. Gérard Vernet, INRAP)	Collaboration analytique et interprétative de matériaux prélevés à la suite d'un aménagement hors prescription archéologique (Coll. Didier Miallier)	Opération géo-archéologique et paléo-environnementale programmée (Resp. Rémi Martineau, opération 2022-en cours)
Nature du site	Traces de combustion en contexte de plaine alluviale	Unités pédo-sédimentaires ocre-rubéfiées en contexte hydromorphe de bordure de lac	Unité pédo-sédimentaire rubéfiée en contexte de vaste dépression humide	Anomalie pédo-sédimentaire rubéfiée dans un Andosol	Traces de combustion en bordure de marais
Nature/particularités du matériel étudié	échantillons en vrac de sédiments rubéfiés et encaissants	échantillons en vrac par unité pédo-sédimentaire et micro-prélèvements ciblés sur coupe	échantillons en vrac de petits volumes (≈100 mL)	échantillons en vrac de sédiments encaissants avec agrégats rubéfiés, petit volume (≈100 mL)	échantillons en vrac par unité pédo-sédimentaire
Analyse élémentaire (p-XRF)	(pour analyses extractives)	oui	sur micro-agrégats	oui	-
Analyse minéralogique (DRX)	encaissants (n=2), rubéfiés (n=2) et substrat (n=1)	encaissants (n=4), rubéfiés (n=5), substrat (n=1) et profil de comparaison (n=2)	encaissants (n=3) et rubéfiés (n=4)	encaissant (n=1) et rubéfié (n=1)	-
Analyse extractives (INRAE d'Arras)	encaissants (n=2) et rubéfiés (n=2)	encaissantes (n=3) et ocrée (n=1)	rubéfiés (n=3)	-	-
Spectrocolorimétrie	oui	oui	oui	(pour cuissons expérimentales)	-
Cuissons expérimentales (nombre de séries)	encaissants (n=4) et rubéfiés (n=3)	encaissants (n=3) et ocre-rubéfiés (n=1)	-	Sédiments encaissants (n=1)	-
Micromorphologie	3 lames minces moyen format	3 lames minces grand format	5 lames minces grand format	-	-
MEB-EDS	-	oui (+ microscopie corrélative)	oui	oui	-
Autres	Susceptibilité magnétique de terrain (hors opération préventive)	Susceptibilité magnétique de terrain ; anthracologie	Susceptibilité magnétique		Tamisage et anthracologie préliminaire pour ¹⁴ C
Analyses de collaborateurs	Autres intervenants dans le cadre de l'opération préventive	Palynologie (H. Richard), SPIR des Matières organiques (D. Ertlen), Granulométrie (V. Bichet) Phytolithaires (A. Garnier) Géophysique (C. Camerlynck)	-	-	Malacologie (S. Granai) Phytolithaires (A. Garnier)

Le site de la bordure du lac de Chalain est le seul pour lequel nous sommes intervenus à toutes les étapes des opérations, et en particulier lors de la phase de terrain, ce qui nous a permis de tester une stratégie d'échantillonnage fine. Sur ce site, nous avons concentré nos efforts sur l'analyse d'un des faits identifiés, avec une approche à l'échelle de la fosse pédologique. Ce choix visait à comprendre le plus finement les processus intervenants dans sa formation. Les autres découvertes de ce site (dont les fouilles se poursuivent) peuvent ensuite être comparées avec celui-ci. Pour les autres opérations, ce sont des chercheurs qui nous ont volontiers partagés leurs prélèvements. Il nous a donc fallu adapter nos stratégies et nos protocoles en fonction. Le site de Vaudes « les Trappes » a fait l'objet d'une fouille de prescription, où l'accent a été mis sur l'approche spatiale du phénomène. Nous avons repris les résultats et la documentation acquise, et nous en proposons une nouvelle lecture, tout en enrichissant les résultats de nouvelles analyses géo-archéologiques. Pour le site de Grande Limagne, la quantité d'échantillons était plutôt réduite, mais nous avons pu développer plus précisément l'approche micromorphologique. Quant au site du sommet du Puy de Dôme, la quantité de matériaux était encore plus réduite, les résultats sont donc succincts, mais compte tenu de sa datation, il nous a paru évident de l'intégrer. Nous ne cachons pas que nous avons fait preuve d'opportunisme et de persévérance, car l'acquisition de matériel à étudier a été au départ, somme toute compliquée.

Il nous faut tout de même mentionner que, plus nous avons cherché et plus nous avons trouvé d'interprétations variées à propos de traces qui semblent de prime abord, similaires : depuis le « simple » brûlis à l'explosion cosmique, en passant par des phénomènes d'auto-combustion ou d'incendies de tourbe ou encore d'oxydation pédologique. Cela étant, à travers les analyses réalisées, nous avons cherché à savoir si les traces mises en évidence résultaient effectivement d'une chauffe, et le cas échéant, si celle-ci était d'une « intensité » forte, et de manière générale, à comprendre le mieux possible leurs modalités de formation.

3. Méthodes d'analyses

3.1. Préparation des échantillons

Dans un premier temps, les échantillons ont été préparés en « terre fine », après séchage à l'air libre pendant deux semaines, puis tamisage à 2 mm (Baize, 2000 ; Baize et Jabiol, 1995). Les analyses réalisées nécessitaient pour certaines des préparations à maille plus fine. L'analyse colorimétrique est en particulier assez sensible à la granulométrie des échantillons et surtout aux différences entre fonds matriciels et certains traits pédologiques (en particulier revêtements d'agrégats ; Baize et Jabiol, 1995 ; Sánchez-Marañón et al., 2004). D'autre part, les mesures au spectrorimètre se font sur des surfaces relativement réduites (également pour le p-XRF). Les dosages d'extractions du fer nécessitaient quant à eux une préparation à 200 µm (limite sables grossiers/sables fins). Pour limiter les hétérogénéités des échantillons et éviter de procéder à de récurrents répliques de mesures, nous avons dans la plupart des cas travaillé sur les échantillons préparés à la maille de 200 µm. Les échantillons sont préparés sur colonne de tamisage (2-1-0,5-0,2 mm et passage au rotap) puis progressivement et broyés avec ménagement, afin d'isoler les sables, les micro-écofacts et artefacts parfois très finement intégrés dans les masses des agrégats (entre autres, charbons pour les datations), ainsi que de possibles autres éléments exogènes ou à déterminer. Pour les échantillons très argileux, ce protocole a été assez chronophage, un

répartiteur de chute a parfois été employé pour sous-échantillonner la terre fine. Pour le site de Limagne, pour lequel nous disposons seulement des prélèvements d'unités rubéfiées et de faible volume, un effort important a été réalisé afin d'extraire au mieux les micro-agrégats et les particules de sédiments encaissants (non rubéfiés) qui y étaient mélangés. Cela nous a permis de récolter assez de matériaux pour quelques analyses, ce qui nous a permis d'avoir un point de comparaison.

3.2. Perte au feu

La méthode de la perte au feu a été employée pour estimer les taux de matières organiques (MO) et des carbonates de calcium et de magnésium. Les méthodes indiquées dans la littérature varient plus ou moins, en ce qui concerne les seuils adéquats de températures et de durées de chauffe (Dean, 1974 ; Baize, 2000 ; Heiri, Lotter et Lemcke, 2001 ; Santisteban et al., 2004 ; Hoogsteen et al., 2015). Les matériaux fortement argileux peuvent influencer la perte au feu par la perte de leur eau structurale, de même que ceux très organiques (tourbes ou litières) nécessitent généralement des chauffés plus longues ou à seuils plus élevés pour éliminer complètement les MO. La nature des échantillons étudiés est très variée, mais nous avons préféré conserver un protocole unique. Cela doit être considéré dans l'interprétation des résultats. Les échantillons sont passés à l'étuve à 105°C pendant 48 h, puis ils sont passés au four à moufle à 550°C pendant 4 h et ensuite à 950°C pendant 2 h. À chaque étape, les échantillons sont immédiatement pesés. Les différences des masses permettent d'estimer respectivement les taux d'humidité résiduelle, de matières organiques (MO) et des carbonates calcimagnésien.

3.3. Analyses élémentaires (p-XRF)

Les analyses élémentaires visent à obtenir la composition totale en éléments majeurs et en éléments traces des échantillons de sols, indépendamment de leur forme chimique (oxydes, phyllosilicates, liés aux matières organiques). Elles permettent d'obtenir, en quelque sorte, la signature géochimique générale des échantillons, qui peuvent ensuite être comparés par analyses multivariées pour discuter des phénomènes d'évolutions pédo-sédimentaires ou de la provenance des échantillons (Bajard, Poulénard, Sabatier, Etienne, et al., 2017 ; Delbey, 2018 ; Holmqvist, 2016 ; Lubos, Dreibrodt et Bahr, 2016 ; Mayoral et al., 2020). L'analyse est adaptée pour détecter des enrichissements relatifs, en particulier en fer, qui résulteraient d'une migration liée à des processus d'oxydo-réduction (Baize, 2000). La chauffe peut également mener à une modification de certains éléments (p. ex. volatilisation ou enrichissement relatif par destructions des composés organiques) qui peuvent être discutés.

Les analyses ont été réalisées au laboratoire de géoarchéologie de la MSH Mondes (UMR 7041 ArScAn - Archéologies Environnementales, Nanterre). Les mesures sont réalisées avec un appareil XRF portable Bruker Tracer 5i (Projet soutenu par la Région Île-de-France - Domaine d'intérêt majeur « Matériaux anciens et patrimoniaux »). L'appareil est employé en mode station, avec un collimateur de 8 mm, sans filtre, et un temps d'acquisition total de 360 secondes pour deux phases de mesure (15 kV et 40 kV). La calibration employée est le standard « mudrock » fourni par le fabricant, qui permet la quantification de 30 éléments chimiques majeurs et traces (Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn,

Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba, Pb, Th, U). Les résultats sont exprimés sous la forme élémentaire. Considérant les incertitudes potentielles des formes du fer, mais également de l'aluminium dans les échantillons, les valeurs n'ont pas été transformées sous leur forme d'oxydes (Baize, 2000, chap. 16). D'autre part, on notera que parmi les éléments majeurs, le sodium (Na) n'est pas mesurable. Aussi, tous les éléments ne sont pas toujours mesurés avec le même degré de précision, du fait de chevauchement ou de la superposition de pics de quantification entre différents éléments (Hunt et Speakman, 2015). Ceci sera, le cas échéant, discuté par rapport à la composition des échantillons.

Les analyses ont été effectuées sur les poudres préparées à 200 μm (ou précisé si autre), montées en coupelles. Néanmoins, dans les cas où les sédiments étaient en trop faibles proportions, les mesures ont été prises directement sur des micro-agrégats. La quantification élémentaire étant sensible à la densité et la porosité des échantillons, il peut en résulter une certaine variabilité, comme l'illustre le Tableau 12. Il faut de plus y ajouter la variabilité liée à l'hétérogénéité propre aux agrégats (effet pépite) et à la variabilité des traits pédologiques (p. ex. revêtements). Toutes ces raisons justifient, dans le cas de mesures sur agrégats, de ne travailler que sur le signal géochimique général, en particulier avec les analyses multivariées.

Tableau 12 : Statistiques descriptives relatives aux totaux élémentaires mesurés au p-XRF pour des sédiments préparés et des agrégats pédologiques bruts.

Site de Châtillon-sur-Seine, non présenté dans ce travail ; les totaux plus élevés des agrégats peuvent s'expliquer par la perte en matières organiques du fait de la chauffe, mais elle ne permet pas d'expliquer les valeurs minimums et les plus forts écarts-types

	Sédiments Prélèvements pédologiques préparés à <250 μm , montés en coupelles	Agrégats pédologiques chauffés Sans préparation, 3-4 mesures en différents points de chaque agrégat, résultat moyenné
Effectif	234	106
Minimum	18,57	14,16
Maximum	28,83	39,33
Moyenne	26,36	28,28
Écart-type	1,52	4,34
Écart-type relatif (RSD)	5,8	15,4

3.4. Analyses minéralogiques (DRX)

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X permettent l'identification des minéraux sous forme cristalline, dont notamment les silicates (dont les phyllosilicates : argiles minéralogiques), carbonates, oxydes et hydroxydes (notamment du fer). Elle offre la possibilité de discuter de l'origine des formations pédo-sédimentaires (autochtonie/allochtonie) et des processus pédologiques (altération et transformations des minéraux, lessivage, etc.) (Wilson, 1999 ; Van Ranst et al., 2011 ; Martignier, 2013). Les minéraux amorphes ou possédant une organisation structurale faiblement ordonnée ne peuvent cependant pas être identifiés (ou difficilement). La chauffe peut également avoir une influence

sur la composition minéralogique, par exemple en causant l'effondrement ou la formation de nouvelles structures cristallines (Karathanasis, 2008 ; Reynard-Callanan et al., 2010 ; El Ouahabi et al., 2015 ; Delbey, 2018 ; Cultrone et Carrillo Rosua, 2020).

Les analyses minéralogiques ont été réalisées au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP, UMR 7193), avec l'accompagnement scientifique et technique de Laurence Le Callonec (Sorbonne Université, ISTeP, UMR 7193). Les mesures sont réalisées avec un appareil de diffraction des rayons X Bruker D2 Phaser (radiation Cu-K α ; pas de mesure de 0,04°2 θ). Les échantillons préalablement préparés (200 μ m) sont broyés au mortier et les poudres obtenues sont étalées sur lames pour les mesures. Les rayons X diffusés vers l'échantillon, selon un angle d'incidence qui augmente progressivement, sont diffractés en fonction de l'organisation atomique des cristallites de l'échantillon. Le diffractogramme produit, présente ainsi des pics de diffraction de plus forte intensité à des angles précis, qui permet leur identification. Les diffractogrammes ont été analysés avec le logiciel HighScore Plus (Malvern Panalytical) et la base de données Crystallography Open Database (COD 2021 ; 466505 références). L'identification des minéraux a été réalisée en s'appuyant sur la bibliographie géologique ou pédologique locale. Nous avons également utilisé la table d'identification des minéraux de Brindley et Brown (1980). Dans le texte, sauf précisions en angström (Å), la position des pics est indiquée en degrés 2 θ . Pour chaque site d'étude, les diffractogrammes sont comparés ensemble et par paire. L'observation en échelle racine carrée ou logarithmique des intensités permet également une identification de pics mineurs, parfois difficile à observer sur les échelles linéaires (voir les graphiques). Une interprétation qualitative des constituants a été proposée pour chaque série d'analyse (par site), sur la base de la hauteur et de la plus ou moins bonne définition des pics.

3.5. Extractions et dosages des formes du fer, de l'aluminium, et du silicium

Des analyses élémentaires extractives ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols de l'INRAE d'Arras. Il s'agit d'analyses qui procèdent par une mise en solution sous des conditions opératoires et des réactifs bien précis, permettent l'extraction du fer, de l'aluminium et du silicium sous différentes formes, qui pour l'essentiel ne sont pas inclus dans les réseaux des silicates : ce sont les formes dites « libres » au sens large. Pour le fer, elles comprennent des formes oxydées et bien cristallisées, d'autres de structures amorphes ou complexées aux matières organiques, ce qui inclut diverses formes intermédiaires plus ou moins cristallisées (cryptocristalline). Leur dosage permet d'apporter des renseignements quant à l'évolution des sols, mais également sur les modalités d'expression de la rubéfaction (Gobat et Guenat, 2019 ; Cornell et Schwertmann, 2003 ; Havlicek, 1999 ; Jouaffre, 1989 ; Guillet et Souchier, 1979 ; Fey et Le Roux, 1977 ; Lamouroux, 1972). Deux protocoles d'extraction ont été retenus, la méthode Mehra et Jackson ou CBD (LAS-SOL-0906), et la méthode de Tamm en obscurité (LAS-SOL-0901). Dans les deux cas, les dosages élémentaires s'effectuent par spectrométrie d'émission optique en plasma induit d'argon (ICP-AES). Les résultats des dosages sont respectivement codés CBD et OX (par rapport à leurs réactifs).

3.6. Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique (SM) représente la capacité d'un matériau à s'aimanter lorsqu'il est soumis à un champ magnétique externe (Thompson et Oldfield, 1986). Cette propriété est reliée aux particules d'oxydes de fer, à leur nature et leur comportement, leur abondance et la dimension des minéraux. La chauffe, du fait qu'elle engendre des modifications des oxydes de fer, influence fortement cette capacité. En fonction des précurseurs magnétiques présents et des conditions de chauffe (températures et conditions d'oxydo-réduction) qui dirigent ces transformations, la susceptibilité peut s'accroître ou au contraire s'amoinrir (Brodard, 2013 ; Torrent, Barrón et Liu, 2006 ; Cornell et Schwertmann, 2003 ; Marmet, Aubry et Best, 2002 ; Linford et Canti, 2001 ; Maher, 1986 ; Tite et Mullins, 1971). La pédogenèse peut également faire évoluer la SM par la cristallisation progressive des oxydes de fer (Maher, 1986 ; Mullins, 1977), mais la chauffe est réputée pour engendrer des accroissements (le cas échéant) dans des proportions nettement plus importantes.

Les mesures de SM ont été réalisées avec un appareil portatif Bartington MS2 équipé d'un capteur MS2E (résolution annoncée à $0,2 \times 10^{-5}$ uSI). La SM est sans dimension dans le système international (SI). Les résultats sont strictement exprimés en 10^{-5} uSI. L'acquisition est très rapide (quelques secondes) et permet une répliquabilité importante. Des mesures ont été réalisées sur le terrain, directement sur les coupes, mais également en laboratoire, sur les échantillons préparés ainsi que sur quelques échantillons expérimentaux.

3.7. Spectrocolorimétrie

La couleur des sols est une propriété importante, car elle est étroitement liée à certains constituants du sol, leur proportion et leur état (Baize et Jabiol, 1995). Le fer joue en particulier un rôle important, car il peut conférer des couleurs très vives ou très sombres, selon son état d'oxydation : sous forme réduite Fe^{2+} il peut donner des teintes bleuâtre ou verdâtre ; et sous forme oxydée Fe^{3+} des teintes brun-jaune-orange-rouge. La nature des oxydes (magnétite, maghémite, hématite) ou des hydroxydes (goethite, lépidocrocite) présents confèrent des teintes différentes qui s'expriment plus ou moins selon leur abondance et leur plus ou moins bonne cristallisation. La dynamique de l'eau, par les engorgements, le drainage et les cycles d'humectation-dessiccation participent grandement dans l'évolution de ces caractères. Par ailleurs, la combustion peut faire varier notablement les couleurs des sols, avec des altérations réductrices et la carbonisation favorisant le noircissement, ou au contraire engendrant une cristallisation rapide d'oxydes de fer, dont en particulier la formation d'hématite rouge-sang (Cornell et Schwertmann, 2003). Sa présence, hors chauffe, est dans la plupart des cas le fait d'un héritage. En climat tempéré humide, sa formation est généralement inhibée, elle est donc soit liée à un héritage d'une pédogenèse très ancienne ou le fait de la chauffe. La caractérisation des couleurs des sols à l'aide de méthodes quantitatives peut fournir des indications sur ces aspects (Torrent et al., 1983 ; Deaton et Balsam, 1991 ; Terefe et al., 2005, 2008).

Les analyses ont été réalisées au laboratoire de géoarchéologie de la MSH Mondes (UMR 7041 ArScAn - Archéologies Environnementales, Nanterre). Les mesures ont été réalisées avec un spectrocolorimètre Techkon SpectroDens (illuminant D65, équivalent d'une lumière moyenne de jour ; angle

d'observation de 10°). Une aliquote est placée sur une plaque de mesure, la surface lissée avec une plaque de verre, et la mesure est prise directement sur cette surface, sans aucun intermédiaire. Le collimateur de l'appareil est de 3 mm, il peut donc aisément permettre de travailler à très fine échelle, sur des micro-agrégats, mais toujours avec les risques de variabilité liés à l'organisation des constituants que nous avons évoqués (effet pépite, revêtement). Il vaut mieux mesurer la surface interne des agrégats après cassure, s'il ne s'agit pas déjà de fragments. Des mesures sur des blocs indurés ont aussi été réalisées (site de Chalain). Le système colorimétrique retenu est le système CIE-L*a*b* (Commission Internationale de l'Éclairage), où L* représente la clarté (ou luminance) dont les valeurs s'échelonnent entre le noir absolu (0) et le blanc absolu (100), et les paramètres a* et b* expriment la chrominance (chroma ou teinte) respectivement selon les axes vert-rouge (- a* : vert ; + a* : rouge) et bleu-jaune (- b* : bleu ; + b* : jaune) (Viscarra Rossel et al., 2006). De plus, la réflectance de l'échantillon (proportion de lumière réfléchi par le matériau) dans la gamme des longueurs d'onde du domaine visible (400 à 700 nm) est simultanément enregistrée. Le palier de mesure est de 10 nm, ce qui manque de précision, mais reste suffisant pour potentiellement caractériser les principaux constituants responsables de la teinte, en particulier s'il s'agit d'oxy-hydroxydes de fer. Leur identification se fait sur la première dérivée des spectres de réflexion, c'est-à-dire la courbe des pentes du spectre. L'analyse des spectres dérivés moyennés peut permettre de pallier la résolution limitée des mesures.

3.8. Cuissons expérimentales en laboratoire

Afin de tester l'hypothèse de la chauffe des traces étudiées, et le cas échéant d'essayer de préciser son intensité générale, nous avons réalisé des cuissons de sédiments en conditions contrôlées de laboratoire (laboratoire de géoarchéologie de la MSH Mondes ; UMR 7041 ArScAn - Archéologies Environnementales, Nanterre). Les échantillons sont placés dans des creusets en porcelaine et cuits dans un four à moufle Thermolyne. Ils sont ensuite refroidis à température ambiante. La chauffe est maintenue pendant une durée et à un palier de température définis. Plusieurs variantes ont été testées, avec comme températures 200-400-500-600-800°C et comme durée 1-2-4-8-24 h. Des cuissons à des paliers intermédiaires ont parfois été ajoutées. Les durées de chauffe correspondent à la durée une fois le seuil de température indiqué atteint, elles ne prennent donc pas en compte les temps de montée en température du four, car les échantillons sont placés à température ambiante (voir Figure 34).

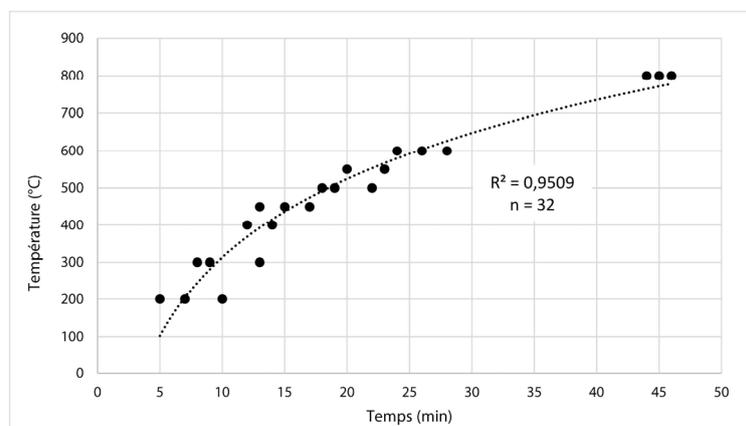


Figure 34 : Durées de montée en chauffe du four à moufle.

Entre chaque série de cuisson, nous avons attendu que la température du four redescende sous les 50°C. Quelques variantes préliminaires de ce protocole ont été testées, avec notamment des recuissons successives des mêmes échantillons, pendant des durées d'une heure, à des paliers de température croissants de 50°C (site de Vaudes). Dans ce dernier cas, il faut prendre en compte que les durées totales de cuisson augmentent graduellement avec les températures. Ce protocole n'est certainement pas le plus pertinent (voir résultats), mais il a permis de tester la méthode avec un nombre réduit d'échantillons. Nous avons analysé les prélèvements des unités encaissantes des traces rubéfiées, préparés à 200 µm, et quelques cuissons ont également été faites sur les échantillons rubéfiés.

Une fois les échantillons refroidis, une mesure est prise au spectrophotomètre, et quand les matériaux étaient en quantité suffisante, également au susceptibilité. Dans ce mémoire, seules les analyses colorimétriques seront présentées. Quelques échantillons cuits ont aussi été analysés en DRX (site de Chalain). Cette démarche expérimentale conduit à observer l'évolution de la couleur des sédiments en fonction des différents paramètres de chauffe (Mirti, 1998 ; Mirti et Davit, 2004 ; Ketterings et Bigham, 2000 ; Terefe et al., 2008 ; Brodard, 2013 ; Cancelo-González et al., 2014 ; De Bonis et al., 2017). Il est ainsi possible de comparer les mesures des traces rubéfiées avec celles réalisées sur leurs unités pédo-sédimentaires encaissantes, qui servent de référentiel. Il est alors possible de proposer des estimations de températures de ces traces.

Néanmoins, il est évident que les conditions sont inévitablement très différentes de combustions en conditions réelles (Pernot et Frerebeau, 2018). Le travail en laboratoire a cependant l'avantage de maîtriser ces paramètres avec une finesse qui n'est pas possible en conditions de terrain, et de permettre un grand nombre de répliques. Cela étant, il faut considérer que cette approche est théoriquement valide pour des cuissons excédentaires en oxygène, a minima pendant la phase de refroidissement (post-cuisson en céramologie ; D'Anna et al., 2003).

3.9. Micromorphologie

L'approche micromorphologique permet l'identification des micro-constituants des sols et des sédiments et surtout, du fait qu'elle est menée sur des échantillons non perturbés, la reconnaissance de leur organisation et de traits pédo-sédimentaires naturels ou anthropiques. C'est une approche pertinente à la fois pour la caractérisation des vestiges de combustion que des traits pédologiques liés à des processus d'oxydo-réduction (Goldberg, Miller et Mentzer, 2017 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017 ; Mentzer, 2017 ; Vepraskas, Lindbo et Stolt, 2018 ; Villagran et al., 2017 ; Watzel, 1992).

Les analyses ont été réalisées à la plateforme ArchéoScopie de la MSH Mondes (USR 3225 CNRS, Nanterre). Les lames minces sont observées au microscope optique polarisant, avec des grossissements allant jusqu'à x 1000, en lumière polarisée normale (PPL) et avec polarisateurs croisés (XPL). Une source lumineuse externe est utilisée pour simuler une lumière incidente oblique (OIL). De plus, les lames minces ont été scannées (à résolution de 1200 dpi) pour permettre une caractérisation en lumière naturelle et à moyenne échelle simultanée à l'observation au microscope. Pour la reconnaissance des faciès et des constituants, nous nous sommes principalement appuyés sur deux référentiels actuels de

détermination et d'interprétation des traits microscopiques (Nicosia et Stoops, 2017 ; Stoops, Marcelino et Mees, 2018). La terminologie utilisée est parfois celle de la pédologie (Baize et Jabiol, 1995).

3.10. Analyses au MEB-EDS

Nous avons réalisé des observations au microscope électronique à balayage Zeiss EVO 10 couplé à un dispositif d'analyse élémentaire spectrale et cartographique (MEB-EDS, « energy dispersive spectroscopy » ; équipement financé par la région Île-de-France dans le cadre du Domaine d'intérêt majeur – Matériaux anciens et patrimoniaux (DIM – MAP), le CNRS et le LabEx Les passés dans le présent). Les analyses ont été réalisées à la plateforme ArchéoScopie de la MSH Mondes (USR 3225 CNRS, Nanterre). Les manipulations des échantillons et le pilotage sont réalisés par Jessica Legendre (Centre de recherche et de restauration des musées de France, C2RMF, Musée du Louvre). La machine réalise une numérisation de la surface d'un échantillon, à partir des particules réémises par celui-ci alors qu'il est bombardé par un faisceau d'électrons. L'observation peut descendre jusqu'à l'échelle nanométrique. Les échantillons doivent être préalablement séchés, mais ils ne sont pas métallisés. Il est ainsi possible de réaliser des observations et une recherche des micro-constituants sur la base d'une image cartographique élémentaire monochrome. Une analyse élémentaire semi-quantitative peut ensuite être effectuée sur une surface ciblée des matériaux. Cette approche a principalement été employée afin de rechercher des éléments de composition singulière par rapport au fond matriciel global des échantillons, et possiblement exogènes ou liés à des phénomènes thermiques de haute intensité. Nous avons réalisé des observations sur des micro-agrégats bruts ainsi que sur les poudres préparées.

Pour le site de Chalain, nous avons également pu avoir accès à un microscope Zeiss AxioImager Z2m motorisé, permettant de travailler en microscopie corrélative conjointement avec le MEB. Il s'agit d'un microscope à lumière transmise et réfléchi, avec lequel les observations faites sur des lames minces (non couvertes) peuvent être spatialement référencées et peuvent ensuite être automatiquement localisées avec le MEB pour procéder à une analyse élémentaire.

3.11. Anthracologie

Les déterminations anthracologiques ont été réalisées au laboratoire d'archéobotanique/plateforme ArchéoScopie de la MSH Mondes Mondes (USR 3225 CNRS, UMR 7041 ArScAn - Archéologies Environnementales, Nanterre). Chaque fragment de charbon de diamètre supérieur à 1 mm est observé au microscope optique à réflexion, des grossissements de x 100 à x 1000, selon les trois plans anatomiques du bois : plan transversal, longitudinal tangentiel et longitudinal radial. Pour cela, les charbons sont fracturés manuellement, voire à l'aide d'une lame tranchante pour initier la fracture. L'identification taxonomique s'appuie sur les ouvrages d'anatomie du bois (Schweingruber, 1990 ; Schweingruber, Börner et Schulze, 2011 ; Schoch, Schweingruber et Kienast, 2004). Les dimensions généralement très réduites des charbons analysés dans ce travail n'ont que ponctuellement permis la description de caractéristiques dendrologiques complémentaires (Marguerie et al., 2010).

3.12. Datations radiocarbone

Les âges bruts, non calibrés, des datations radiocarbone ont été calibrées sur la base de la courbe de calibration IntCal20 (Reimer et al., 2020) avec le logiciel OxCal 4.3/4.4 (Bronk Ramsey, 2009). Pour les datations de la littérature, lorsque les âges bruts étaient indiqués, nous les avons systématiquement recalibrés. Les âges bruts des dates importantes sont généralement indiqués dans le texte ou en notes. Les datations calibrées sont généralement indiquées en années Before Christ/Anno Domini. Sauf mention contraire, les intervalles de probabilité correspondent à 2 sigmas (95,4 % de probabilité), et ils sont arrondis à la dizaine d'années près.

Partie 4 :
Vaudes « Les Trappes » (Aube) :
un « brûlis » médiéval ?

1. Préambule

Les découvertes archéologiques réalisées à Vaudes, lieu-dit « Les Trappes », sont les premières pour lesquelles nous avons pu mettre à l'épreuve nos propositions relatives à la visibilité potentielle des pratiques agricoles liées au feu. Néanmoins, lors de la réalisation des travaux archéologique, nous n'étions pas encore en thèse (juillet-août 2015). Une collaboration au cours des études post-fouilles a pu être mise en place avec le responsable de la fouille, Arthur Guiblais-Starck (2017). Nous renvoyons à ce vaste rapport pour l'ensemble des données brutes que nous présentons. Les premiers résultats que nous avons obtenus ont été intégrés dans ce Rapport final d'opération (RFO), et les principaux résultats des études pluridisciplinaires ont été publiés dans *ArcheoSciences, revue d'archéométrie* (Guiblais-Starck et al., 2020). Nous reprenons dans cette partie, les résultats de cette opération, d'une manière un peu plus détaillée pour ce qui concerne certains aspects géoarchéologiques, mais surtout que nous enrichissons de nouvelles analyses (minéralogie, extractions élémentaires, spectrocolorimétrie). Nous développons aussi une lecture personnelle qui sur plusieurs points s'écarte un peu des conclusions initiales du RFO et de l'article, surtout du fait que nous avons plus de recul sur ces phénomènes qu'au début de notre recherche. Nous proposons également une typologie des structures (ce qui par ailleurs était demandé dans la prescription de fouille). Néanmoins cela ne change pas la conclusion principale, relative à la nature des vestiges découverts. À ce titre, nous ne minimiserons pas que notre contribution a été majeure pour l'interprétation archéologique finale, qui d'ailleurs n'a pas été partagée par tous les intervenants de l'opération, comme cela est très honnêtement retranscrit dans le RFO.

Les faits mis au jour se présentaient sous la forme de traces rubéfiées et noircies d'une dizaine de centimètres d'épaisseur et de formes diverses, souvent circulaires et aux dimensions plutôt variables. Leur morphologie, avec les éléments dont nous disposons, est tout à fait comparable à certains des phénomènes dits de foyers d'essartages que nous avons déjà mentionnés, et notamment l'exemple de Pagny-sur-Moselle (Partie 1-5.2, p. 24). Lors du diagnostic, ces traces ont été assimilées à des vestiges potentiels de défrichement ou de déboisement par le feu (Toussaint et al., 2014). Néanmoins, la possibilité qu'il s'agisse de traces naturelles d'hydromorphie (oxydo-réduction), ou d'une origine thermique et pédologique conjointe, a été envisagée. Pour les archéologues, les caractéristiques physiques des unités sur le terrain ne laissaient cependant pas de doute à l'hypothèse d'une combustion. De plus, la coloration vive, localement assez rouge, a aussi retenu l'attention, suggérant qu'elle pouvait indiquer une cuisson de forte intensité (températures atteintes et durée). Leur attribution chronologique, lors du diagnostic, aux XI-XII^{ème} siècles AD, renvoyait spontanément à l'image des « grands défrichements » du Moyen Âge central (Bloch, 1931). L'état de conservation de ces traces, considéré comme « unique », a justifié la prescription d'une fouille ciblée de ce phénomène, pour la première fois à notre connaissance, sur le territoire métropolitain.

2. Contexte environnemental général

Le site d'étude se place dans la région naturelle de *Champagne humide*, dans la plaine alluviale de la Seine et de son affluent, l'Hozain, à une quinzaine de kilomètres au sud de Troyes. La région est bordée à l'est par les plateaux calcaires du Jurassique, et à l'ouest par la région de la Champagne crayeuse. Dans le secteur étudié, la plaine alluviale montre un élargissement remarquable (5 à 6 km), qui s'explique par le débouché des cours d'eau, depuis les terrains calcaires et perméables, dans le contexte géologique du Crétacé inférieur, constitué de sédiments globalement meubles, argileux, peu perméables et très sensibles à l'érosion (Hatrival et Morfaux, 1974 ; Jamagne, 2011). Néanmoins, dans le détail, les faciès géologiques du Crétacé inférieur montrent une variabilité assez notable, tant au niveau de leur constitution (minéralogie, granulométrie) que leur répartition verticale et latérale (ibid.). D'après la carte géologique, la plaine alluviale est divisée longitudinalement par un très léger bombement (seulement 1-2 m), qui correspond à un bourrelet d'alluvions anciennes de la basse terrasse (Fy1a), qui délimite les lits de l'Hozain, au sud, de celui de la Seine, dans la partie nord (tous deux Fz). Le terrain actuel est en effet globalement très plan, situé aux environs de 125 m d'altitude.

D'après le Référentiel Régional Pédologique (RRP), se développent dans la plaine alluviale, sur les secteurs de basses terrasses calcaires légèrement surélevés, principalement des sols de faible épaisseur et carbonatés (Rendosols, Calcosols), et dans les terrains plus bas des lits des cours d'eau, divers types de sols selon la nature des alluvions, mais plutôt faiblement évolués (Fluviosols divers ; Laroche, Olivier et Moreira, 2013). Sur quelques rares reliefs résiduels des anciennes terrasses au sein de la plaine, mais surtout sur les pieds des versants bordant celle-ci, des sols légèrement plus évolués, avec un degré de décarbonatation de surface variable, sont présents (idem et Calcisols). En remontant sur les plateaux, la diversité pédologique s'accroît nettement, en relation avec la diversité des matériaux parentaux (sables glauconieux, marno-calcaires, limons lœssiques, etc.). La pédogenèse est ainsi diversement dirigée par la teneur en calcaire, la granulométrie, les dynamiques d'engorgements, etc.

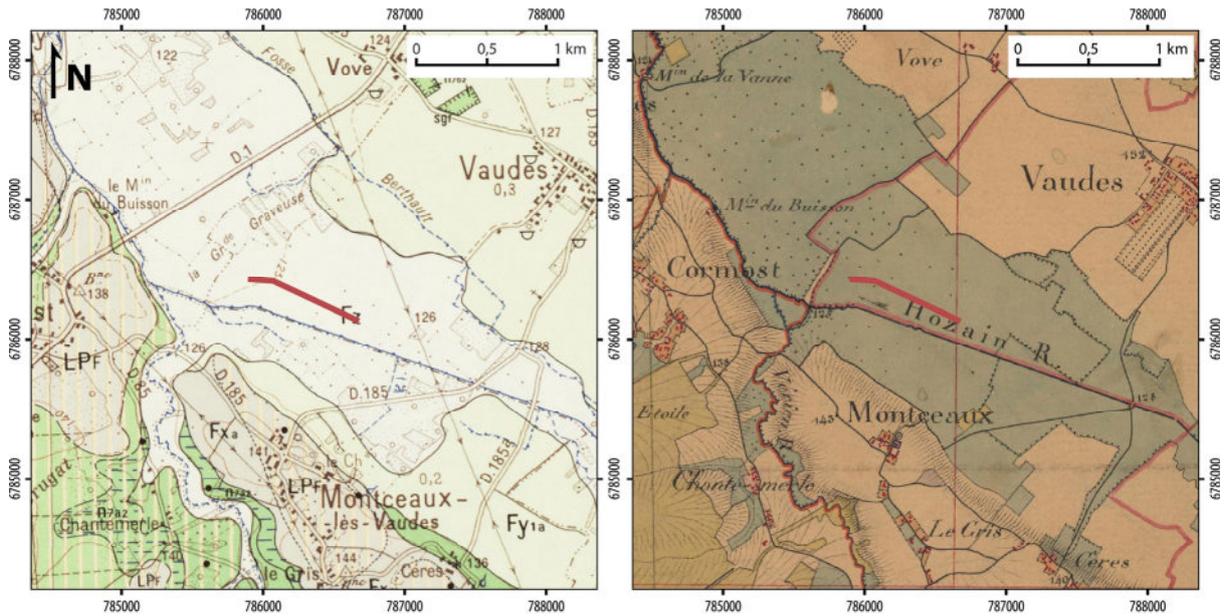
Compte tenu de la nature du chantier d'aménagement (gazoduc), l'emprise de fouille se présente sous une forme linéaire d'environ une dizaine de mètres de large. La surface prescrite est longue de 800 m, ce qui représente une surface de fouille d'un peu plus de 8 000 m². La totalité de l'emprise se situe dans la plaine de l'Hozain, qu'elle traverse longitudinalement (orientation globale SE-NO). L'altitude des terrains est de 125,6 m NGF à l'extrémité sud-est, et de 124,6 m NGF à celle nord-ouest.

L'Hozain est une petite rivière, dont le cours est d'environ 25 km, et qui se jette dans la Seine au niveau de la commune de Bréviandes, juste avant Troyes. De plus, juste en aval de la zone étudiée, un autre petit cours d'eau, le Ru Vérien, rejoint le lit majeur de l'Hozain. Il débouche des plateaux du sud de la plaine à seulement quelques kilomètres de distance. Le cours actuel de l'Hozain, est en grande partie canalisé, et spécifiquement à la hauteur du tronçon étudié. De plus, son régime hydrologique actuel est saisonnièrement très contrasté, avec des débits considérés comme globalement très faibles, mais les crues d'hiver-printemps peuvent être relativement marquées.

Sur les documents cartographiques anciens, il apparaît que le transect fouillé est traversé en son centre, depuis le nord-est, par un ancien cours d'eau, mentionné sur le cadastre napoléonien (1835)⁵⁸ comme le Vieil Hozain (« Ozain »). Ce dernier rejoint le cours canalisé de l'Hozain, tel qu'il existe encore aujourd'hui, juste au sud et parallèle au tronçon de l'opération archéologique (Figure 35). Une étude archivistique initiée dans le cadre de l'opération archéologique de Vaudes (Cédric Roms, INRAP), a permis de retrouver des procès-verbaux d'arpentage de 1759-1760, qui attestent d'un projet de curage, d'élargissement et de rectification de l'ancien ruisseau de l'Hozain, qui correspond vraisemblablement au Vieil Hozain. Sur le cadastre napoléonien et les photographies anciennes des années 1950⁵⁹, on observe que ce dernier possède un tracé globalement très rectiligne, mais faiblement sinueux voir avec des angles abrupts à l'échelle des parcelles. Un tel tracé évoque les travaux décrits en détail dans l'ordonnance historique. Par ailleurs, sur les photographies aériennes les plus anciennes, on observe à partir d'une centaine de mètres en aval de la zone d'étude et se poursuivant sur plus de 2,5 km, les terrains sont totalement bondés de tracés sinueux, formant un maillage très dense sur toute la largeur de la plaine de l'Hozain. Ces morphologies traduisent une instabilité très marquée des écoulements, mais il conviendrait de préciser sur quel pas de temps. Ces tracés se superposent assez largement, aux terrains de pâtures de la carte de l'état-major (1866, Feuille de Troyes) et de même à la localisation des alluvions fluviales récentes Fz de la carte géologique (Figure 35). Enfin, sur les cartographies plus anciennes et peu précises (carte de Cassini et carte des Ponts et Chaussées de Châlons, XVIII^{ème} s. voir Figure 36), on remarque tout de même que le cours principal de l'Hozain a été dessiné complètement au sud-ouest de la plaine, ce qui n'est pas cohérent vis-à-vis de la situation du Vieil Hozain. Ce dernier pourrait donc correspondre à un cours d'eau assez mineur au sein de la plaine, et dont l'ancienneté reste indéterminée.

⁵⁸ Plan de Vaudes, section D dite des prés, feuille n° 5, parcelles n° 750-1126 (1835). Archives départementales de l'Aube.

⁵⁹ Voir notamment le cliché du 01/03/1956 ; Identifiant C2918-0041_1956_F2718-2918_0162



Unités de la carte géologique imprimée 1/50 000 (BRGM)

- Fz : Alluvions modernes : sables, argiles, vase, tourbe Alluvions modernes : sables, argiles, vase, tourbopôts tourbeux (Quaternaire-Holocène)
- Fy1a : Alluvions anciennes, basse terrasse (5-6 m) : gravier calcaire
- Fxa : Alluvions anciennes, moyenne terrasse (10-15 m) : gravier calcaire
- n7a2 : Argiles noires de "l'Armanche" (Albien inférieur)
- n7a1 : "Sables verts" glauconieux (Albien inférieur)
- LPF : Limons fluviatiles
- LPF/n7b2 : Limons fluviatiles sur les argiles du "Gault" (Albien moyen) (épaisseur inférieure à 2 m)

**Emprise de la fouille
de Vaudes « Les Trappes »**

Figure 35 : Contexte géologique et situation sur la carte de l'état-major de la fouille de Vaudes.

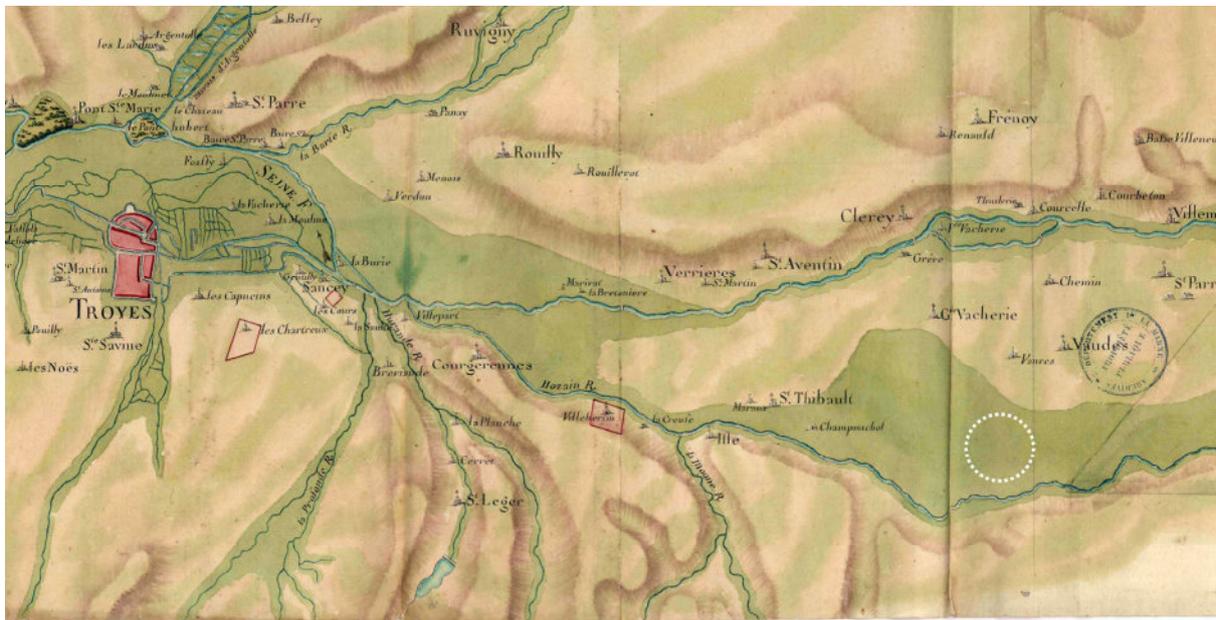


Figure 36 : Extrait de carte du XVIII^{ème} siècle illustrant la plaine de la Seine et de l'Hozain, en amont de Troyes.
Source : Plan général du cours de la Rivière Seine des Ponts et Chaussées de Châlons (daté entre 1752 et 1785).
Archives départementales de la Marne. <https://archives.marne.fr/ark:/86869/2r6wqnmvt7zd>
Le cercle en pointillé figure la localisation approximative du site de Vaudes « Les Trappes ».

3. Résultats de l'opération archéologique de Vaudes

3.1. La séquence pédo-sédimentaire de référence

Les séquences pédo-sédimentaires ont été analysées par Grégory Dandurand, géomorphologue référent de l'opération (INRAP). La base des séquences sédimentaires a permis de différencier des niveaux de grèves alluviales se rapportant au Weichsélien, au Tardiglaciaire et à l'Holocène ancien (Préboréal). Synthétiquement, il s'agit de dépôts graveleux, avec des faciès de texture plus ou moins fine ou grossière, et surtout très riche en matériaux calcaires (codés NG et Ng). Le toit de ces dépôts marque une discontinuité sédimentaire, résultant d'incisions alluviales (crises érosives liées à l'augmentation de l'activité fluviale) datées de la seconde moitié du Subboréal (vers 1800-1000 cal. BC). Les séquences pédo-sédimentaires se développant au-dessus, sont définies de la base au sommet, tel que suit :

- S2T : formation argilo-limoneuse de teinte brun-gris cendreuse et grumeleuse, avec de fréquents débris organiques ou fibres végétales, décrite comme « pseudo-tourbeuse », et à cailloutis et granules calcaires émoussés et oxydés, contenant de très nombreux charbons et imprégnant le toit de la grave sous-jacente. Cette formation colmate les dépressions et les surcreusements des graves inférieures, dans le secteur Sud-Est, en rive gauche du Vieil Hozain. Un charbon provenant de la base de cette formation a donné pour résultat 540-390 cal. BC⁶⁰, c'est-à-dire rapporté au début du Subatlantique (transition Hallstatt / La Tène). Cette unité est interprétée comme un paléosol. La limite avec l'unité supérieure S2g est diffuse.
- S2g : unité argilo-limoneuse ou limoneuse fine, brun à gris, parfois avec une petite charge grossière (cailloutis), associée à de nombreux débris de malacofaunes, tantôt des charbons de bois et des pisolithes ferrugineux. Elle moule directement les irrégularités du toit de la terrasse alluviale, dans le secteur Nord-Ouest, en rive droite du Vieil Hozain, ou surmonte les dépôts S2T. Elle mesure en moyenne environ 20 cm. Cette formation correspond à des limons de débordement mêlant : des dépôts issus de l'érosion des formations superficielles des plateaux (LPs), indiqués par la présence de pisolithes de fer, et des dépôts fluviaux à gastéropodes des moyennes terrasses (LPf). La mise en place de cette unité est interprétée comme contemporaine d'une péjoration climatique et attribuée au Subatlantique (Antiquité tardive / haut Moyen Âge). Sur le terrain, cette unité a été regroupée avec S2T, en tant que US 1003.
- Br : unité dite de « brûlis », en moyenne une dizaine de centimètres d'épaisseur, mais jusqu'à un maximum de 25 centimètres. En plan, les traces se présentent sous la forme d'anomalies de sol globalement ovoïdales, irrégulières et discontinues, constituées par des noyaux de matériaux rouge-orangé, légèrement indurés, mais friables, relativement homogènes, ourlés irrégulièrement par une formation brun noirâtre de sol à l'aspect calciné. Dans certaines coupes, elle est surmontée d'une unité argilo-limoneuse, de 7-10 cm d'épaisseur, contenant des granules de craie poreuses altérées et oxydées, des charbons et des billes de fer « flottant » éparses (unité non

⁶⁰ 2370 ± 30 BP ; Beta-435751 ; voir Partie 4-7, p. 171.

- codée) ; interprétée comme un niveau d'abandon anthropique et associé à des conditions climatiques plus humides, remaniant ou décapant localement l'unité Br.
- S1 (US 1001) : unité argileuse brune à tendance verdâtre, compacte et homogène, de structure polyédrique, montrant des tâches rouilles d'oxydation ; localement accompagnée de quelques graviers calcaires émoussés épars, et de rares charbons à sa base. Épaisse au maximum de 30-35 cm, elle recouvre sur la majorité de l'emprise, l'unité Br, S2g ou S2T.
 - S0 : horizon de labour contemporain (subactuel) formé par une argile brune à cailloutis épars, d'environ 20-30 cm d'épaisseur

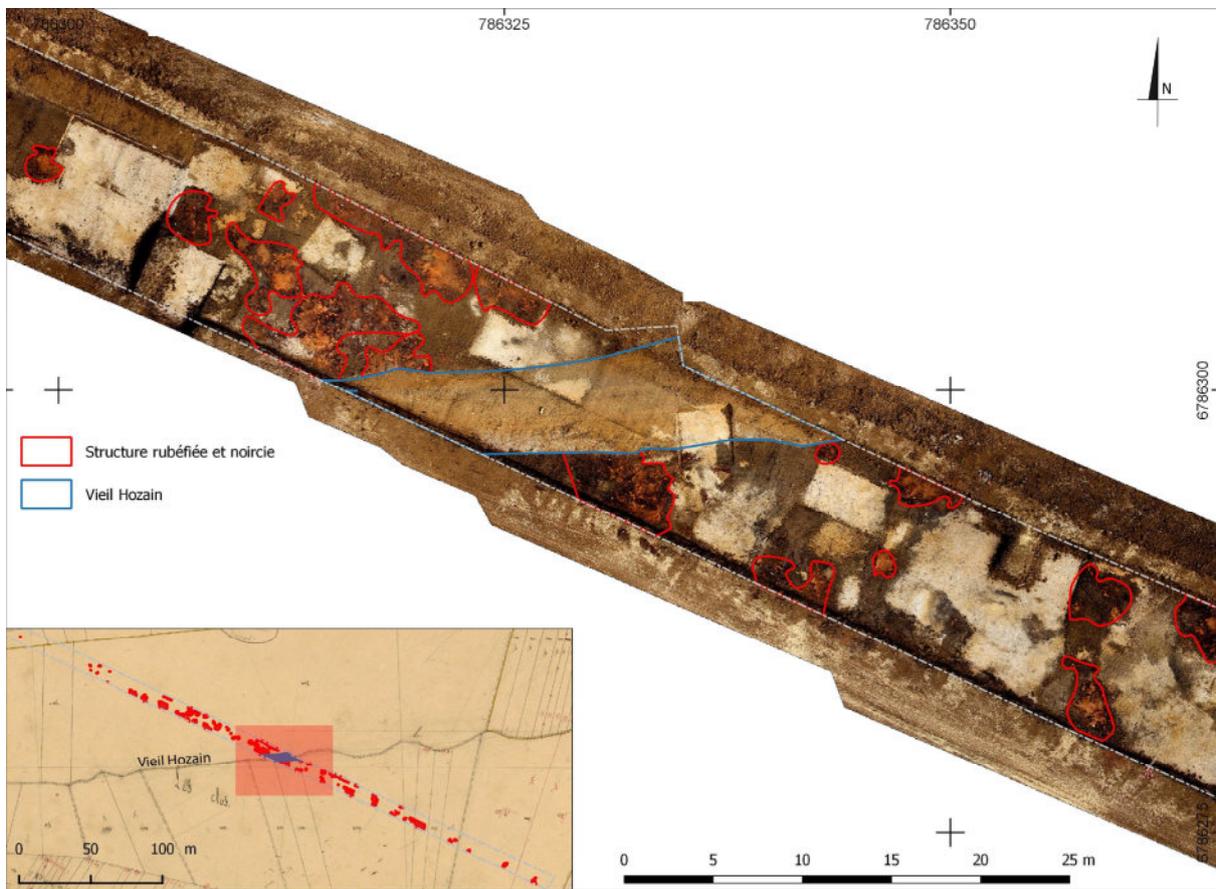


Figure 37 : Vue aérienne des traces rubéfiées de part et d'autre du Vieil Hozain, au centre de l'emprise fouillée, et sur le cadastre napoléonien de 1835 (d'après Guiblais-Starck et al., 2020)

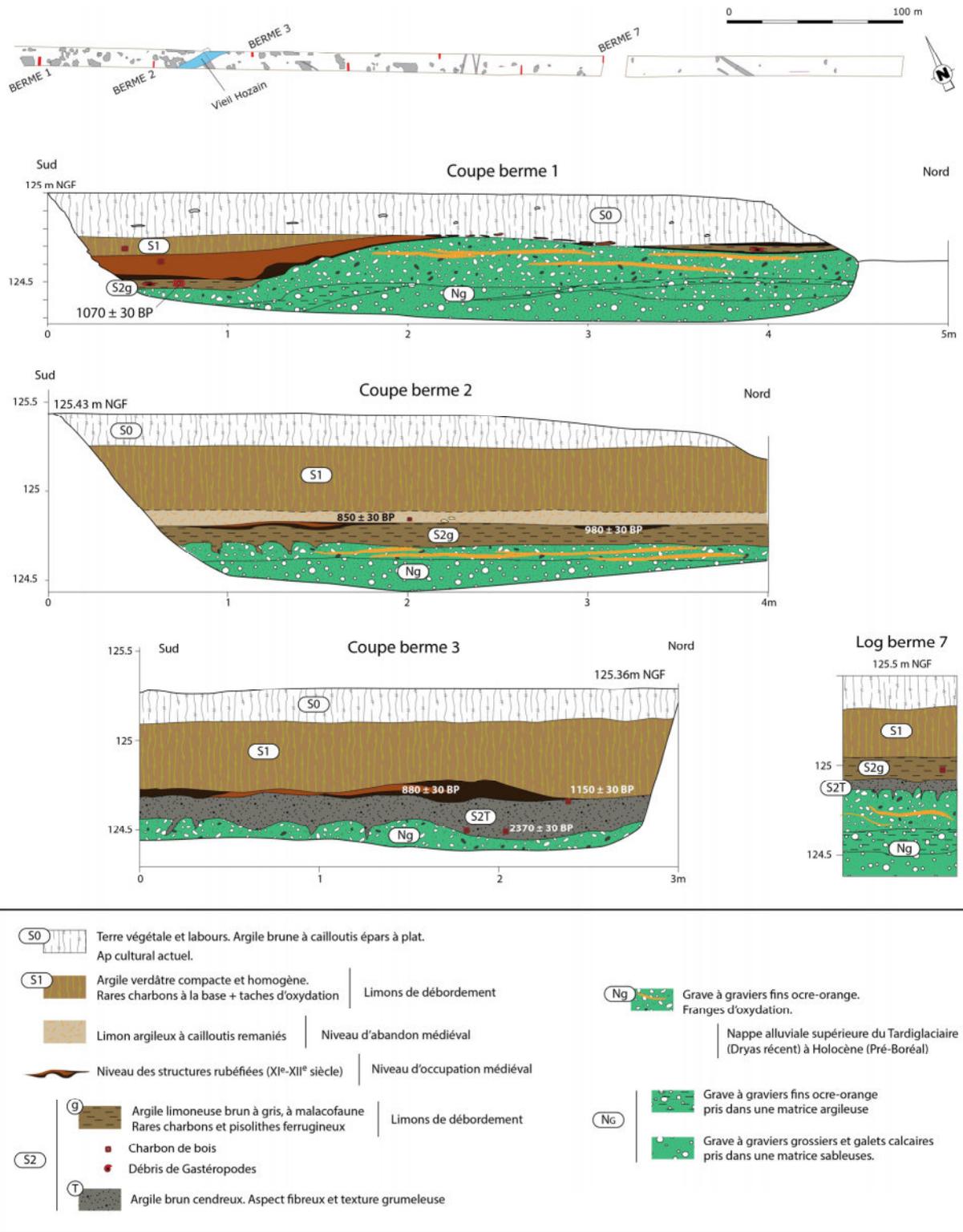
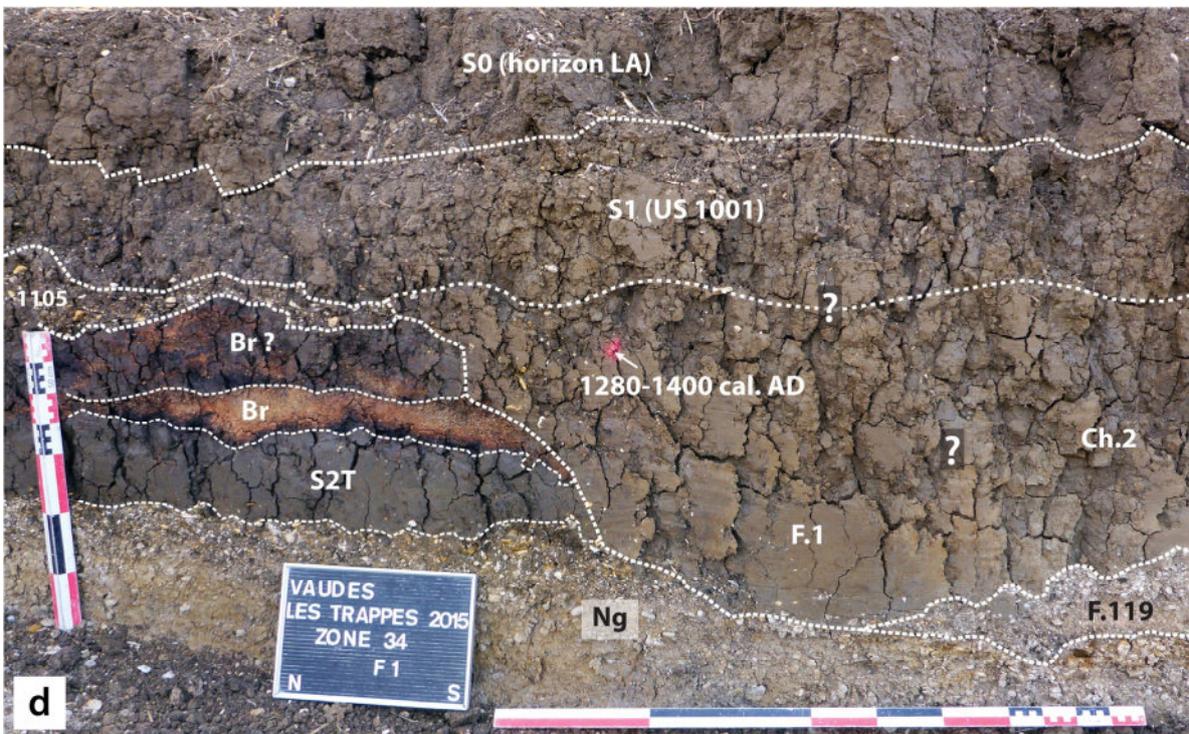


Figure 38 : Sélection de coupes géomorphologiques de l'opération de Vaudes « Les Trappes » (crédits : G. Dandurand ; INRAP ; modifié)



3.2. Résumé des résultats archéologiques de la fouille

L'emplacement de la zone de fouille a été défini pour englober la zone de plus forte densité de traces rubéfiées identifiées lors du diagnostic (Figure 37). Au centre de cette emprise, cette zone de forte densité est traversée par un paléochenal qui correspond à l'emplacement du cours du Vieil Hozain, sur les cartes anciennes. Il est constitué de trois comblements latéraux plus ou moins distincts, qui semblent correspondre à des curages des bordures du cours d'eau. Ces deux recreusements latéraux (F.1, F.3) recoupent très distinctement, de chaque côté, des nappes rubéfiées (Figure 39). Ils empêchent donc d'établir avec certitude la contemporanéité entre ces dernières et le chenal même. Les trois datations radiocarbone réalisées sur des charbons de ces comblements ont livré des dates strictement postérieures aux traces rubéfiées (voir Partie 4-7, p. 156). En revanche, l'unité de gravier à la base du chenal (F.119 ; Figure 39) a livré des datations contemporaines de ces dernières. L'interprétation de F.119 a posé des difficultés de chronologie et d'interprétation (chemin ?), et elle nous pose question. L'hypothèse d'une barre de chenal traduisant des épisodes de crues de plus forte intensité nous paraît la plus vraisemblable. De plus, elle permettrait d'expliquer que sa chronologie soit faussée par la reprise de matériaux anciens. Il n'est pas notre objet d'aborder en détail ce point. Cela étant dit, nous préférons écarter ces derniers résultats radiocarbone (F.119) et renvoyons au RFO.

Les faits enregistrés comme brûlis (n = 65) ainsi que les traces de chablis (n = 28) constituent la majorité des phénomènes documentés (total de 124 faits individualisés). Les autres faits sont des fossés, des fosses et des trous de poteaux isolés et plus ou moins assurés. Les faits antérieurs à Br (hors chablis, voir partie suivante) sont tous apparus au toit des grèves alluviales NG et Ng, et n'ont livré aucun mobilier datant. Ils sont spatialement répartis en marge des secteurs de forte densité de traces rubéfiées, et ne montrent pas de relations cohérentes avec ces dernières.

Page précédente

Figure 39 : Prises de vues générales et coupes de l'unité rubéfiée de Vaudes.

(a) et (b) Prises de vues générales des traces au cours de la fouille (cliché : G. Dandurand, INRAP). Noter la nette différence de teintes entre les deux photographies, qui s'expliquent en partie du fait de leur état, plus (a) ou moins humide (b).

(c) Photographie de coupe de l'unité rubéfiée (cliché : G. Dandurand, INRAP). Noter les différences de teinte et les légères différences de structure entre les « poches » rubéfiées, et l'aspect moulant et irrégulier de l'unité noirâtre

(d) Photographie de coupe au niveau du chenal du Vieil Hozain (cliché : A. Guiblais-Starck, INRAP). Commentée d'après les relevés de fouille. Noter la nette troncature de l'unité rubéfiée (Br) et la présence de matériaux similaires remaniés (?) au sommet (Br ?). La limite entre le chenal (Ch.2) et le fossé de curage (F.1) bien visible en plan est indistincte sur cette coupe.

4. Caractéristiques générales et morphologie des traces rubéfiées

4.1. Protocole général de la fouille des traces rubéfiées

L'analyse de l'unité rubéfiée s'est concentrée sur une approche planimétrique. Il est bon de noter que les conditions de fouilles, en période de sécheresse, ont nettement compliqué l'appréhension de ces traces, du fait de leur décollage en mottes lors du décapage. D'autre part, il a été souligné que leur grande irrégularité pouvait également être problématique pour les individualiser en tant que fait, et pour leur enregistrement précis en général (voir p. ex. Figure 37 et Figure 39.a). Huit faits rubéfiés, choisis de manière répartie sur l'emprise, ont été fouillés manuellement, en plan, spécifiquement pour tenter d'identifier les empreintes racinaires des phénomènes, relative à l'hypothèse archéologique des souches brûlées. Les chablis ont été testés à la pelle mécanique et quelques-uns ont aussi été fouillés manuellement. Ajoutons que la totalité de l'emprise d'étude a été finalement décapée pour identifier de possibles phénomènes sous les nappes rubéfiées. D'autre part, un effort particulièrement important a été mené pour maximiser la quantité de prélèvements en vue des analyses spécialisées (anthracologie, carpologie, phytolithaires, malacologie). Cela s'est révélé être un choix très judicieux, car, comme nous le verrons, les quantités de matériel obtenues pour les études paléo-environnementales restent malgré tout, assez faibles.

Le terme de « brûlis » a été employé pour signifier de manière la plus neutre, l'hypothèse de travail des archéologues, c'est-à-dire qu'il s'agit de traces de feu anthropiques liées à des activités de défrichage ou de déboisement. Brûlis étant entendu volontairement dans un sens non précis. Nous préférons nous même les désigner, par simplification, sous le terme général de traces ou nappes rubéfiées, car c'est bien le phénomène qui attire le plus fortement le regard. De plus, en proportion, les traces rubéfiées dominent largement celles noirâtres, et surtout, les prélèvements et les analyses se sont majoritairement concentrés sur cette partie.

4.2. Caractéristiques spatiales et morphologiques des traces rubéfiées

Les traces rubéfiées sont principalement retrouvées sur une longueur d'environ 350 m. Sur un peu plus de 200 m, répartis de part et d'autre du chenal du Vieil Hozain, elles deviennent particulièrement denses, de telle sorte que chaque fait distingué se trouve systématiquement à moins de 12 m de distance d'un autre. Cependant, au-delà de ces secteurs, quelques traces rubéfiées isolées et de dimensions réduites ont tout de même été identifiées, jusqu'à une distance de 400 m du paléochenal, direction nord-ouest. Leurs dimensions individuelles sont très hétérogènes. Certaines mesurent moins de 1 m², la plus grande 42 m² (sans être strictement continue).

Ces phénomènes sont décrits tel que suit (Guiblais-Starck, 2017, p. 173) :

- Les dimensions en plan ne respectent, dans l'état qui nous est parvenu, aucun module « standard » et sont très variables. [...] Il n'existe pas non plus de module de base dont chaque nappe serait un multiple.

- Le plan individuel ne reproduit pas de forme précise : les contours sont irréguliers, marqués par des angles et des excroissances a priori totalement aléatoires et qui ne semblent pas correspondre à un schéma strict défini. Certaines nappes sont très allongées, d'autres de tendance ovale, mais la plupart sont avant tout de forme totalement irrégulière et difficilement qualifiable.
- D'un point de vue physique, chaque nappe de brûlis est constituée d'un centre de limon argileux rouge-orangé pulvérulent, souvent marbré de noir, qui repose sur une fine couche noire de limon également argileux. En plan, celle-ci forme une couronne autour du centre rouge. La fouille manuelle de huit nappes laisse apparaître un fond rubéfié induré, qui est l'interface avec le limon argileux gris-brun sous-jacent (US 1003). Cette composition ne connaît pas de variation notable selon l'endroit.
- En coupe, le profil obtenu après fouille de la partie pulvérulente jusqu'à la partie indurée est toujours globalement plat, mais irrégulier, avec de légères ondulations et cupules. On observe parfois des surcreusements, mais là encore, ces phénomènes ne semblent obéir à aucun schéma établi. L'épaisseur est toujours très modeste : les nappes qui ont été coupées sont épaisses de 0,05 m à 0,1 m, certains surcreusements atteignant parfois 0,15 m.

La reprise de la documentation photographique zénithale nous amène tout de même à proposer une distinction de plusieurs grands types morphologiques : en étoile, en traînées, en mottes, et concentré (voir la Figure 41). Ces différents faciès ne montrent aucune logique de répartition spatiale, et se retrouvent notamment juxtaposés, voire imbriqués, dans le secteur de forte densité.

D'abord, le plus rare (qui concerne clairement trois-quatre faits), est un faciès en étoile, autrement dit avec des extensions et des traces à tendances linéaires irrégulières, et globalement rayonnantes (Figure 41.a). Cette forme est identifiable sur des extensions d'environ 2 m de diamètre. Par ailleurs, il semble que ce soit cette morphologie qui puisse évoquer l'image d'un système racinaire.

Ensuite, on observe des faciès caractérisés par des tâches rubéfiées légèrement allongées, mais très irrégulières, qui évoquent des « traînées ». Cette morphologie est spatialement mal définie, elle est observée çà et là, et associée aux autres formes. Un de ces faciès concerne néanmoins une surface assez importante (enregistrée comme la nappe la plus étendue), et montre de manière floue, des traînées linéaires plus longues qui semblent traverser, de part et d'autre, les nappes rubéfiées (Figure 41.c). Tantôt, elles sont perceptibles à travers le faciès rubéfié, tantôt à travers l'encaissant. Une des nappes rubéfiées, que nous regroupons dans ce même groupe morphologique, a été interprétée comme d'éventuelles ornières, qui seraient antérieures à la rubéfaction, du fait que leur comblement est constitué des mêmes matériaux rubéfiés. L'une des traces montre cinq traînées parallèles de moins de 10 cm de large chacune, observées sur seulement 1 cm de profondeur en moyenne et distantes de 15-20 cm chacune. Deux des traînées se poursuivent sur une autre nappe plus lointaine. Il est remarquable que ces traces se dirigent quasiment à angle droit en direction du cours de l'Hozain (ce qui pose question quant à leur relation chronologique). Pour nous, ces faciès évoquent fortement ceux de traces aratoires (Gebhardt et Langohr, 2015 ; Thrane, 1989). Étant donné qu'elles traversent des nappes rubéfiées « mieux préservées », elles sont logiquement postérieures. Leur superficialité, si l'on peut dire, ne nous paraît en aucune manière contradictoire avec l'hypothèse de labours. Le regroupement de traînées visible sur la Figure 40, rappelle d'ailleurs, par ses dimensions et leurs espacements, des traces de herse. Cela pourrait expliquer que les traces identifiées sont, à l'échelle de l'emprise fouillée, très ponctuelles,

diffuses et vraisemblablement superficielles. Malheureusement, nous manquons d'exemples de comparaison sur les effets de cet instrument, ce qui est justement lié au fait qu'il travaille de manière superficielle (Lewis, 2012, p. 37). Par contre, les tracés visibles sur la Figure 41.c, assez espacés et plus larges, se rapprochent plutôt de traces d'araïres. Ces deux types observés étant distants d'environ 150 m, les deux possibilités ne s'excluent pas (ce qui serait d'ailleurs aussi bien vrai sur un même espace). Par contre, l'aspect qui pose véritablement question est celui de l'éventuel lien chronologique et fonctionnel entre les nappes rubéfiées et ces traces aratoires. L'absence d'indices de travaux aratoires dans l'unité sus-jacente S1 irait plutôt dans le sens d'une contemporanéité des labours et de la rubéfaction.

Le faciès le plus répandu se présente sous la forme de tâches rubéfiées, irrégulièrement ourlées de sédiments noirâtres (Figure 41.b). Les tâches rubéfiées se distinguent plus ou moins nettement les unes des autres, selon leurs couleurs. Leurs dimensions semblent assez similaires entre les différentes nappes, de l'ordre d'une dizaine à une quinzaine de centimètres. Ces dimensions sont donc comparables à l'épaisseur des nappes. Cette morphologie nous rappelle grandement des formes de mottes de terre, comme cela est le cas sur la coupe de la Figure 39.c.

Enfin, la dernière morphologie relevée prend les traits d'une nappe presque continue de sédiments rubéfiés sur une surface qui ne semble pas excéder un mètre ou deux de diamètre (Figure 41.b). Ces nappes sont souvent suivies, en périphérie, d'un faciès mottelé. La distinction entre le type dit concentré et celui en mottes semble donc s'expliquer, par une différence de densité.

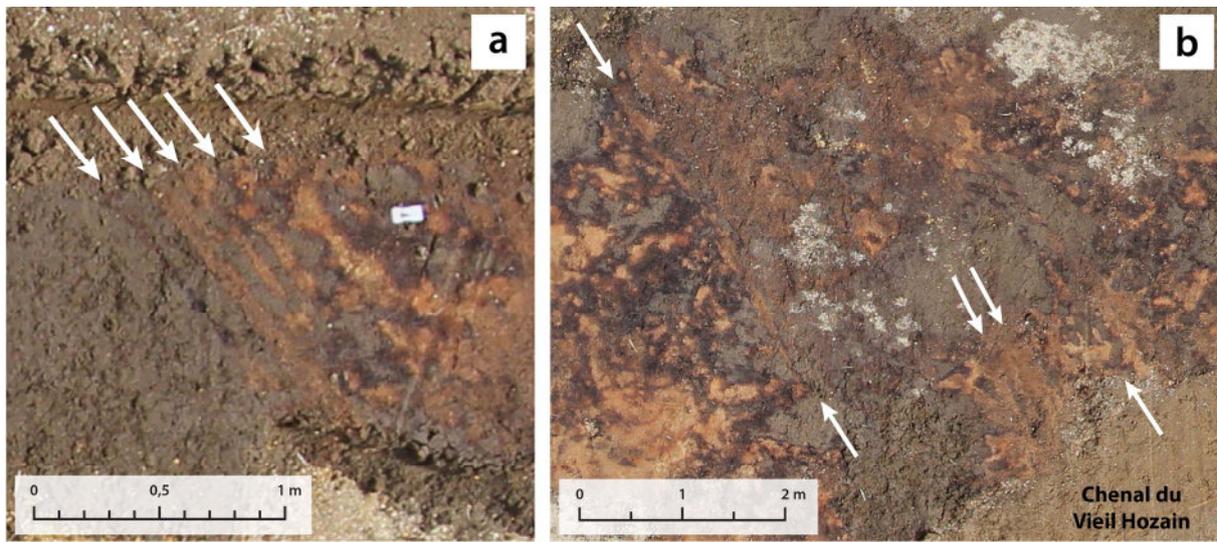
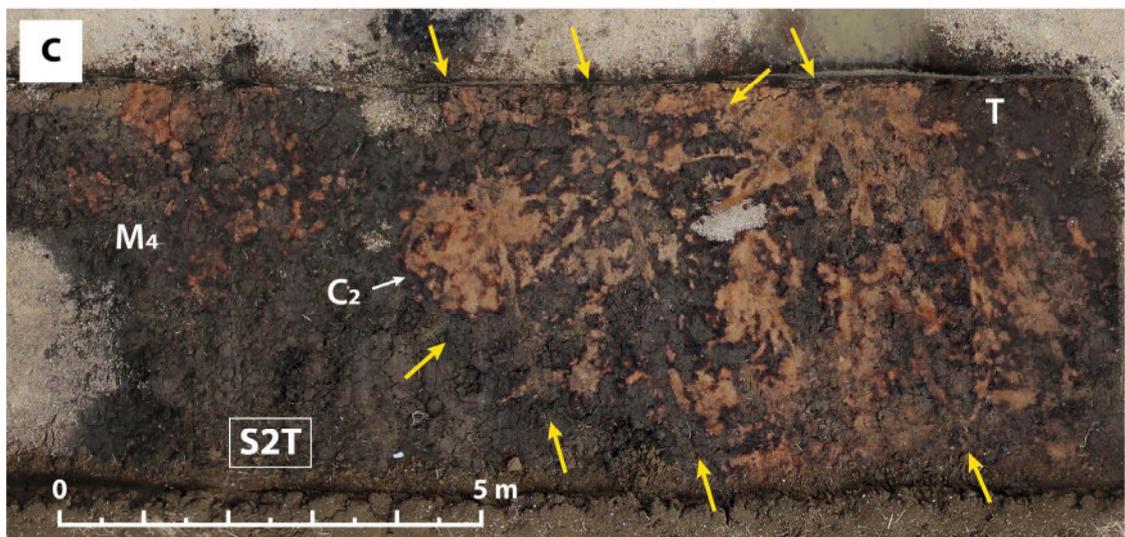
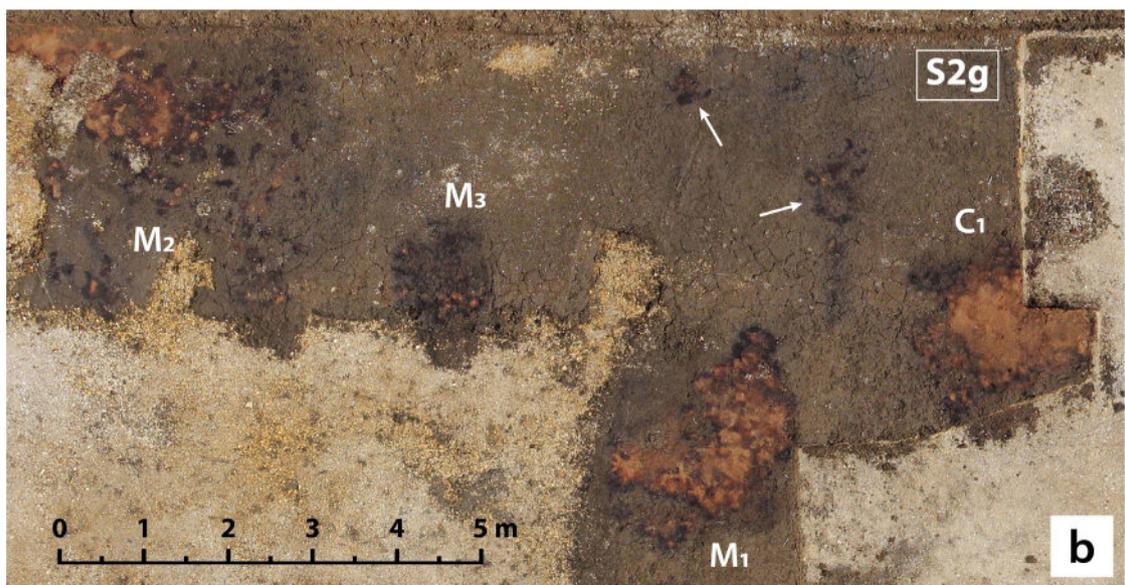
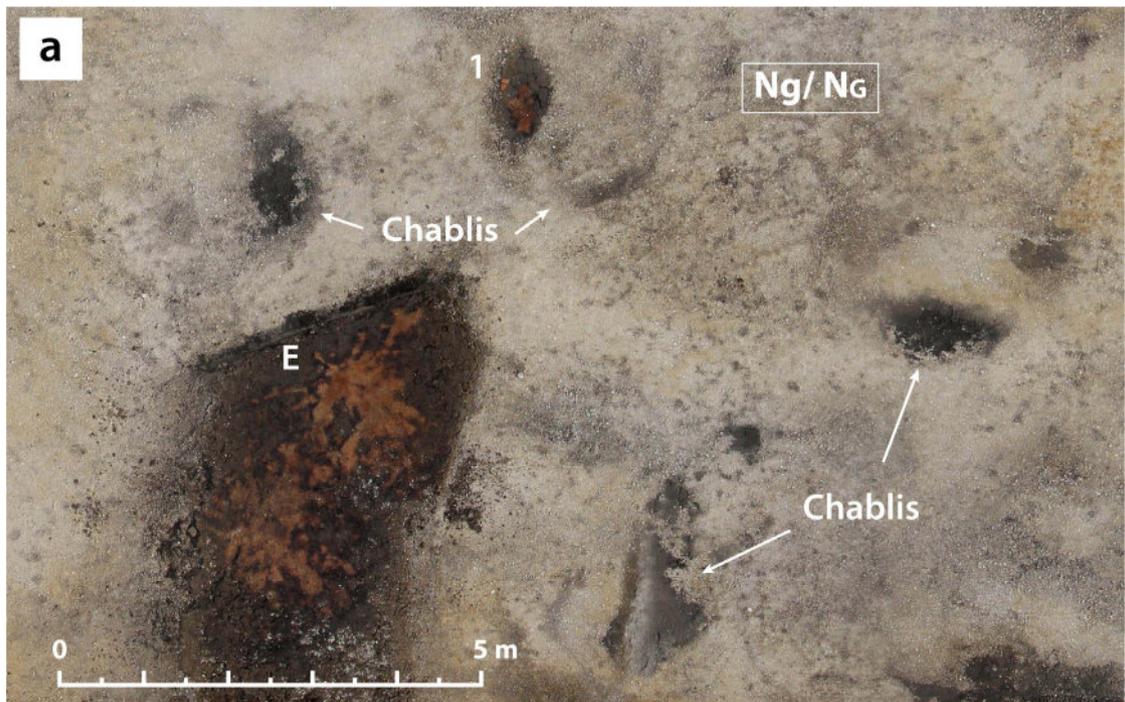


Figure 40 : Exemples de morphologies en plan interprétées comme des traces aratoires d'instruments tractés. Les flèches indiquent les directions générales (pas leur sens) des traces. Attention aux différences d'échelles. La prise de vue (b) s'inscrit dans la continuité, à quatre mètres de distance au sud-est, des traces visibles en (a) Photographies réalisées au ballon aérien par F. Canon (société Vertical Photo), redressées et géoréférencées par P. Huard (INRAP), crédits A. Guiblais-Starck, 2017 (INRAP). Modifiées et mises en forme.



Pour ce qui concerne les chablis, tous sont apparus au sommet des couches NG et Ng. Seulement 5 chablis sur 28 ont été identifiés sous une nappe rubéfiée. Il n'y a donc aucune corrélation spatiale entre les deux types de phénomènes. De plus, le comblement basal des chablis, souvent de même nature que les unités S2T et S2g s'opposent aussi d'un point de vue chronologique à une contemporanéité avec la phase de mise en place de la nappe rubéfiée. Seul un fait donne un indice de relative proximité temporelle, avec une masse de sédiments rubéfiés dans son remplissage intermédiaire (Figure 42). Mais, ce chablis présente aussi un colmatage de fond de type argileux, grisâtre, plastique et homogène (avec quelques graviers), qui indique une période d'alluvionnement de faible énergie, dont la durée n'est pas définie, avant l'évènement rubéfié (voir les faits C.97 et B.96). D'autre part, la couche de comblement supérieure, très riche en graviers calcaires et au caractère meuble, pourrait correspondre aux matériaux adhérents des racines soulevées, qui se sont finalement effondrés. Une telle séquence de comblement réfute complètement l'hypothèse que les sédiments rubéfiés soient liés à la combustion des racines du chablis. Néanmoins, cela suggère que des chablis encore partiellement ouverts aient été présents non loin de l'évènement de rubéfaction (si l'on considère aussi les deux ou trois autres traces identifiées en comblement sommital de chablis, voir p. ex. Figure 41.a). De plus, on mentionnera qu'aucun chablis ne vient non plus, recouper l'unité rubéfiée. Cela ne signifie pas forcément qu'il n'y a pas de chablis postérieurs, car ceux-ci ont pu affecter des zones sans traces rubéfiées.

Ajoutons que le mobilier découvert dans les nappes rubéfiées est très rare. En tout et pour tout, quelques fragments de faune dans trois faits différents, un petit fragment de métal et deux tessons de céramique très abîmés, probablement datables du Moyen Âge central.

Figure 41 : Morphologie planimétrique des traces rubéfiées de Vaudes.

Photographies réalisées au ballon aérien par F. Canon (société Vertical Photo), redressées et géoréférencées par P. Huard (INRAP), crédits A. Guiblais-Starck, 2017 (INRAP). Modifiées et mises en forme.

(a) Extrémité S-E de la fouille. Chablis périphériques dont la morphologie se distingue très clairement des phénomènes rubéfiés. Les deux nappes rubéfiées prennent une morphologie en étoile (E). Noter la présence de traces résiduelles rubéfiées dans le comblement sommital d'un chablis et associés à des TCA (1).

(b) Secteur S-E, phénomènes de morphologie en mottes (M) et concentré (C). Noter la densité décroissante de la rubéfaction entre C1, M1, M2, M3, et les traces résiduelles (flèches) ininterprétables sans la présence des autres nappes rubéfiées.

(c) Secteur N-O. Les nappes rubéfiées prennent des formes de traînées irrégulières (T), dans lesquelles on distingue des linéaires discontinus (flèches jaunes) que nous interprétons comme des traces d'instruments aratoires tractés. Noter également la différence dans les sédiments encaissants avec la photographie b.



Figure 42 : Unique chablis comblé de matériaux rubéfiés découvert à Vaudes, vue en coupe (cliché : A. Guiblais-Starck, INRAP).

5. Résultats des caractérisations physico-chimiques

5.1. Analyse micromorphologique

Une analyse micromorphologique a été menée par G. Dandurand. Huit lames minces de moyen format (environ 5 x 3,5 cm) ont été étudiées, comprenant les unités S2g, S2T, Br et S1. Nous avons également observé ces lames minces. Nous reprenons très succinctement les principaux résultats obtenus par l'auteur, pour les unités encaissantes, que nous corroborons pour l'essentiel. Nous détaillons cependant plus avant les caractéristiques des faciès rubéfiés et noirâtres.

5.1.1. Les unités encaissantes

Les échantillons encaissants inférieurs présentent des faciès avec une dominance de matériaux fins, de teinte générale brun-verdâtre, de texture argilo-silteuse, quartzeuse. De gros grains de quartz ronds usés et remaniés, de rares feldspaths et des fragments de calcaires altérés ont été notés. La structure est assez compacte. La porosité est plutôt faible, elle s'apparente à des vides d'entassements intra- ou inter-agrégats, à tendance planaire. En S2T, une coquille de moule d'eau douce est reconnue, dont les bordures sont recristallisées. Sa présence dans le prélèvement réalisé à plus de 100 m du paléochenal, témoigne d'une présence d'eau courante permanente, au moins de faible énergie. Des biosphéroïdes calcitiques résultant des déjections de lombrics sont relevées (Canti et Pearce, 2003). Elles témoignent d'une certaine activité biologique et d'une bioturbation, quoique ces traits sont minoritaires par rapport à la structure générale plutôt massive des échantillons.

Les échantillons de l'unité supérieure S1 sont d'une composition globalement comparable à celle des encaissants inférieurs. Il n'y a pas de troncature nette au toit de l'unité rubéfiée, mais la distinction entre matériaux rougeâtre-noirâtre et matériaux encaissants est bien distincte, l'unité S1 présente parfois un aspect moulant. Cela est interprété comme traduisant un recouvrement assez rapide. De plus, l'analyse révèle localement un fort compactage du niveau S1 qui recouvre les structures. Ce tassement pourrait s'expliquer par un piétinement de la surface, dont l'origine reste incertaine.

5.1.2. Les faciès de l'unité rubéfiée

Les lames minces des unités rubéfiées permettent d'observer plusieurs types de faciès. Le premier montre un échantillon « stratifié » (Figure 43.a), qui correspond à l'agencement général des nappes rubéfiées, telles qu'observées sur le terrain, avec à la base un mince niveau noirâtre superposé d'une matrice nettement rubéfiée et plus épaisse. Outre cela, aucun litage ni aucune interstratification ne sont relevés. À l'échelle de la lame, la base et le sommet du complexe rubéfié-noirâtre sont relativement bien délimités. Dans les deux cas, des éléments isolés millimétriques se retrouvent dans les unités encaissantes, mais il n'existe pas de gradient progressif de couleur, qui pourrait caractériser une surface chauffée. La partie noirâtre sous-jacente ne présente aucune structure végétale clairement identifiable. Quoique quelques structures alvéolaires posent question. Il semble donc bien qu'il s'agisse principalement de matériaux inorganiques carbonisés en conditions réductrices. La partie rubéfiée

révèle des agrégats rougeâtres de formes polyédriques à polyédrique sub-anguleuses, qui sont disjoints et englobés dans une matrice fine argilo-limoneuse, qui correspond aux faciès des encaissants (organisation à tendance porphyrique). On observe que quelques agrégats noirâtres sont également dispersés dans la partie supérieure de l'unité. À l'échelle des micro-agrégats, il est assez flagrant que les teintes sont le plus souvent homogènes. Quelques agrégats dont le cœur est sombre et la périphérie rougeâtre sont tout de même présents (l'inverse n'est pas observé).

Le second échantillon (Figure 43.b) se présente comme plus hétérogène. Cette fois, les agrégats de teintes intermédiaires (rouges sombres) et mixtes sont abondants. Comme précédemment, ils sont inclus au sein de la matrice fine brun-verdâtre des unités encaissantes. À la base de l'unité, qui montre une limite irrégulière, certains agrégats prennent des formes nettement arrondies. De plus de nombreuses particules rubéfiées et noircies inframillimétriques ponctuent l'unité. Ces observations évoquent une nette bioturbation. On observe également à la base de l'unité noirâtre, un effet de troncature de forme anguleuse avec l'unité encaissante inférieure.

Le troisième échantillon (Figure 43.c) est encore nettement différent. Il montre principalement des résidus carbonisés de formes polyédriques à émoussées, et une structure très peu compacte avec de nombreux vides, d'aspect granulaire, voire émietté (« crumb microstructure »). Outre les agrégats noirs, on observe, juxtaposés, des micro-agrégats (1 à 3 mm) de teintes variées, rubéfiées, brunâtres, verdâtres, et de morphologies très irrégulières. Certains agrégats sont nettement bi- ou multicolores, et cela, avec des limites très franches. De plus, ils sont accompagnés d'agrégats composites, plus grossiers (pluri-millimétriques), formés de particules comme celles décrites précédemment, et englobés dans une matrice brunâtre, elle-même hétérogène. Dans la partie basale, au-dessus de l'unité sous-jacente S2g, les vides inter-agrégats montrent une abondance irrégulièrement répartie, de débris microscopiques (< 500 µm), qui donnent un aspect poussiéreux. Toutes ces observations dénotent des remaniements mécaniques très marqués.

Ces trois différents faciès évoquent tous l'existence de remaniements mécaniques postérieurs à la formation de l'unité rubéfiée-noirâtre. Ceux-ci sont néanmoins d'un degré très variable, avec une graduation croissante de l'intensité entre (a), (b) et (c). Dans le premier cas, l'agencement structural général paraît préservé. Il n'est pas clair s'il s'agit d'une « percolation » progressive des limons-argileux encaissants au sein de la masse des agrégats rubéfiés. Nous n'observons ni revêtements argileux ni revêtements poussiéreux, qui pourraient aller en ce sens. Pour la lame (c), les caractéristiques observées nous évoquent très fortement un brassage mécanique de type labour, et même répétés, comme le montrent les micro-agrégats composites refragmentés (Drees et al., 1994 ; Gebhardt, 1999 ; Lewis, 2012). L'absence de fabriques excrémentielles évidentes au sein de ces faciès s'oppose vraisemblablement à ce qu'ils résultent de l'action de la pédofaune. De plus, cela semblerait cohérent avec le fait que les unités encaissantes sous- et sus-jacentes ne présentent pas une fabrique structurale caractéristique d'une activité biologique très développée (quoique plus marquée en S1 que S2g/S2T). Suivant l'hypothèse de la combustion, on ne peut exclure que les modifications structurales engendrées par celle-ci aient pu favoriser l'activité biologique, spécifiquement au sein des nappes rubéfiées. Cependant, il nous paraît difficilement explicable que cela puisse résulter en un faciès tel que visible en Figure 43.c. En considération des observations de terrains, l'hypothèse de traces aratoires superficielles

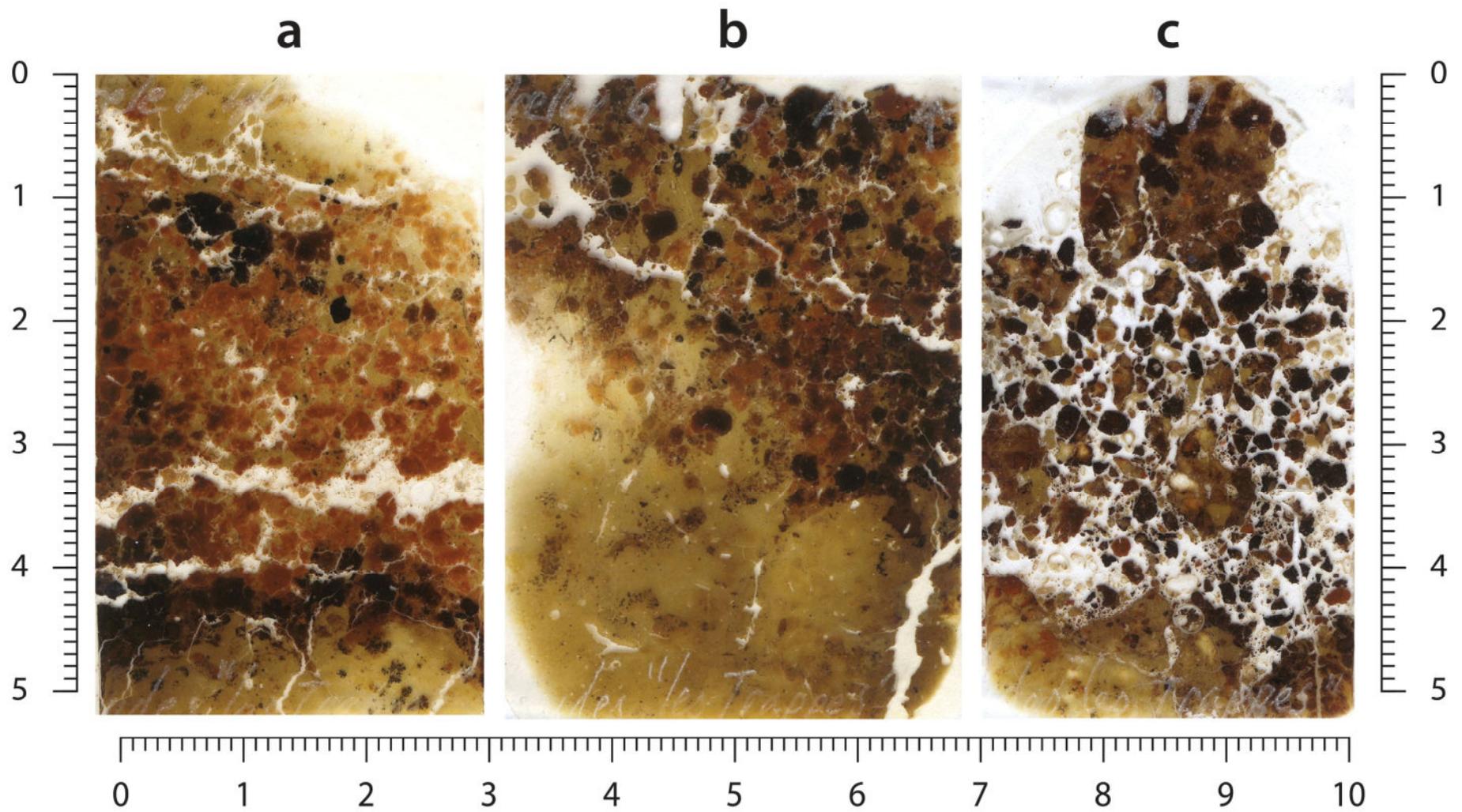


Figure 43 : Scans des lames minces des traces rubéfiées et noirâtres de Vaudes (échelle centimétrique).

est privilégiée. Par comparaison seulement, nous pouvons envisager que le faciès (a) ait lui aussi été travaillé, au moins superficiellement.

5.2. Granulométrie et teneur en carbone organique

Les analyses granulométriques ont porté sur seulement trois fractions, pour six échantillons (Figure 44). Les résultats montrent une relative homogénéité des différentes unités, qui sont toutes de texture très largement limoneuse. Seul l'encaissant S2T se distingue vraiment, par une proportion d'argiles granulométriques nettement plus marquée. Ceci indique que sa formation est liée à des dynamiques hydrologiques de très faible énergie, en cohérence avec l'interprétation de terrain de ce faciès, en tant que dépôt palustre. On note également l'absence de sables dans S2T et l'encaissant supérieur S1, observations qui s'expliquent certainement par la relative variabilité latérale des faciès de ces unités. Cette variabilité s'exprime aussi à travers les différences de carbonate de calcium (calcimétrie). En tous cas, les caractéristiques granulométriques de l'unité rubéfiée ne permettent pas d'expliquer l'acquisition d'une telle teinte, ni par un enrichissement en argile auquel le fer est souvent lié, ni au contraire par une texture plus grossière, pouvant favoriser le ressuyage, et le développement de traits redox.

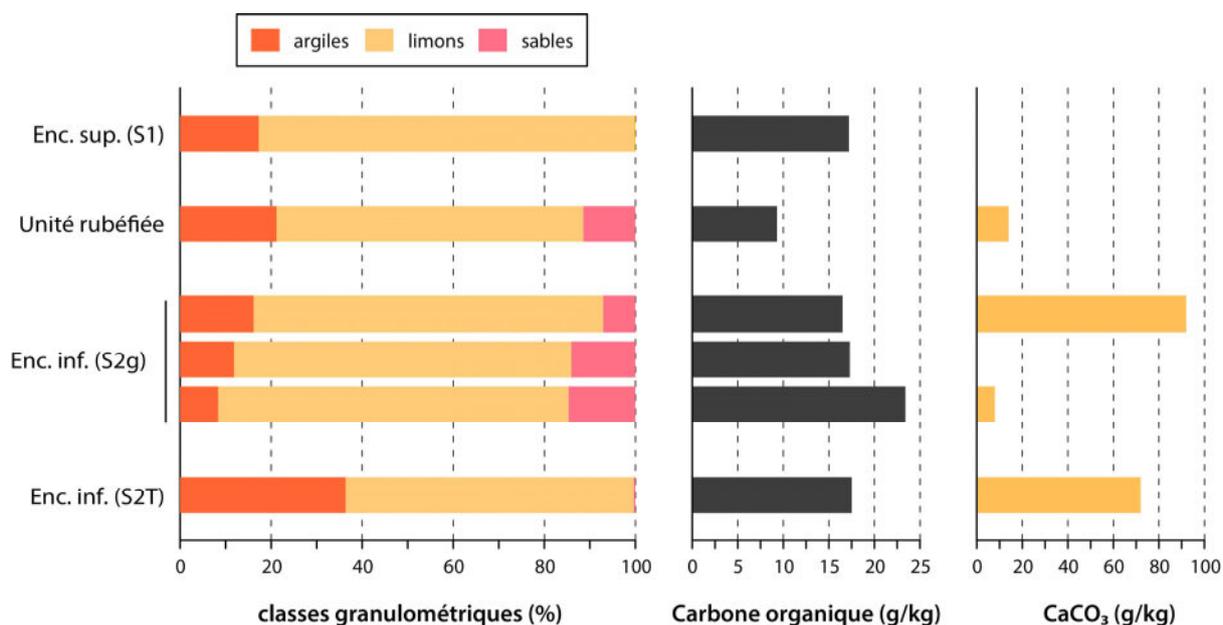


Figure 44 : Résultats granulométriques, taux de carbone organique et de CaCO₃ des prélèvements de Vaudes.

Les quantités de carbone organique total illustrent que les matériaux sont très faiblement organiques (pourcentage pondéral de C_{ORG} < 2,5 %). La terre fine de l'encaissant inférieur S2T, où sont identifiés des débris végétaux fibreux, ne se distingue pas des autres encaissants. La sédimentation détritico-minérale est donc bien largement dominante, et il n'y a pas de dynamique sédimentaire organique à proprement parler. L'unité rubéfiée se distingue néanmoins avec un taux de C_{ORG} environ deux fois

moindre que ces encaissants. S'il y a effectivement eu chauffe, alors celle-ci était incomplète. Il aurait été intéressant d'analyser aussi la mince unité noirâtre.

5.3. Compositions élémentaires totales (XRF)

Les analyses des compositions élémentaires par fluorescence X ont été effectuées par le laboratoire du GEGENAA⁶¹ sur les prélèvements réalisés par G. Dandurand. Précisons que ce ne sont pas les mêmes échantillons que ceux des analyses granulométriques. Un échantillon de terre fine (< 2 mm) de l'unité rubéfiée, un de l'unité noirâtre sous-jacente, et un de l'encaissant inférieur S2g ont été mesurés. L'analyse a porté sur 43 éléments chimiques, et 21 éléments majeurs et traces ont été détectés. Les résultats sont présentés dans la Figure 45.

Très globalement, les compositions élémentaires majeures sont assez homogènes, ce qui va dans le sens d'une filiation génétique des matériaux. Néanmoins, dans le détail, on observe des différences notables pour quelques éléments. L'unité rubéfiée et celle noirâtre sont relativement plus riches en fer (Fe), qui dépasse légèrement 8 %, contre un peu plus de 6 % pour l'encaissant. L'unité rubéfiée possède plus de calcium (Ca), mais moins de potassium (K). L'unité noirâtre possède quant à elle notablement plus de silicium (Si). On pourrait ajouter que le phosphore (P) est très légèrement supérieur dans l'échantillon rubéfié et l'échantillon noirâtre. Pour ce qui concerne les éléments traces, cette dernière unité se distingue très significativement par ses concentrations en manganèse (Mn) et dans une moindre mesure, en chrome (Cr). Par rapport à l'encaissant, l'unité rubéfiée montre aussi une teneur légèrement élevée en Mn, mais la quantification de cet élément manque de précision avec l'appareil ou la calibration employés.

Il n'est pas possible de comparer les teneurs totales du fer à la fraction argile des échantillons pour savoir si les plus fortes teneurs en fer enregistrées pourraient correspondre à un enrichissement absolu, effectivement lié à son accumulation. Néanmoins, le fer total ne constitue généralement pas, en lui-même, un paramètre crucial quant au développement des teintes des sols, si ce n'est un effet limitant, ce qui ici n'est pas le cas puisque le fer total est relativement abondant (> 6 % ; Baize, 2000, p. 130). D'autre part, la teneur en Mn mesurée dans l'unité noirâtre est environ quatre fois supérieure à celle de l'encaissant. Cet ordre de grandeur reste faible, tant par rapport aux teneurs absolues qu'aux enrichissements mesurés dans des concentrations ou des revêtements ferro-manganiques d'origine pédologique, qui de plus, sont souvent associés à un net enrichissement relatif en fer, bien supérieur à ce qui est mesuré ici (Baize et Chrétien, 1994 ; Montagne et al., 2013 ; Baize, 2018).

Nous avons entamé un travail d'analyses élémentaires au XRF pour caractériser directement sur les blocs indurés micromorphologiques ces différents faciès, à une échelle très fine (cible de mesure de 3 millimètres ; données non présentées). Les premiers résultats mettent également en évidence une très forte similitude en éléments majeurs des différents faciès (rubéfié, noirâtre, encaissant). L'analyse des résultats doit être poursuivie. Notons tout de même qu'un taux maximum de 1400 ppm de manganèse

⁶¹ UR 3795 ; Université de Reims Champagne-Ardenne.

a été enregistré sur un agrégat noirâtre, mais que les autres du même type montrent des taux inférieurs à 700 ppm et du reste très variables. Ces premières observations confortent les précédents résultats.

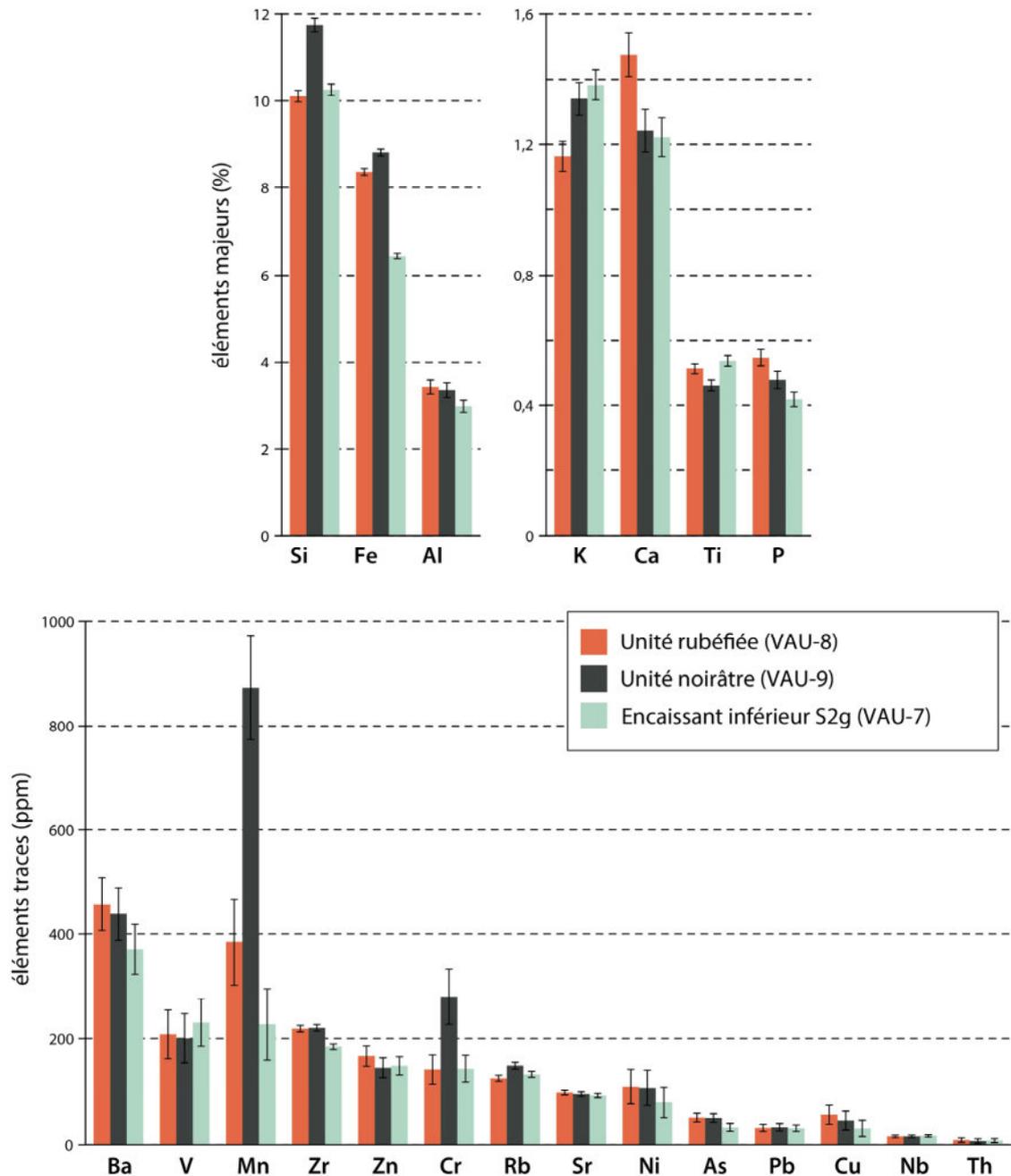


Figure 45 : Compositions élémentaires majeures et traces (XRF) des prélèvements de Vaudes.

5.4. Caractérisation minéralogique (DRX)

Six échantillons ont fait l'objet d'une analyse minéralogique par diffraction des rayons X. Un sur la grève alluviale calcaire Ng, deux sur les unités pédo-sédimentaires sous-jacentes aux traces rubéfiées, S2T et S2g, et trois sur des échantillons rubéfiés distincts. Concernant ces derniers, ce sont ceux avec les teintes les plus marquées qui ont été choisis (voir Partie 4-5.8, p. 148). Toutes les analyses ont été réalisées sur les fractions sédimentaires < 200 µm. La Figure 46 présente les courbes de diffractions interprétées et le Tableau 13 la synthèse qualitative des cortèges minéralogiques.

5.4.1. Les unités encaissantes et le substrat

Les échantillons des unités encaissantes sont tous dominés par le quartz, et présentent également de la calcite. Celle-ci est abondante dans le substrat, mais en proportions nettement inférieures dans les deux encaissants directs. La fraction quartzreuse est relativement plus importante en S2g. Les trois échantillons sont accompagnés en proportion plus faible de phyllosilicates, mais tout de même identifiables. D'abord, la kaolinite, assez bien définie, qui est un minéral très stable en contexte climatique tempéré (Mathieu et Lozet, 2011). Ensuite, de la biotite, moins bien définie, et seulement suspectée pour l'échantillon S2T. La biotite est un minéral primaire du groupe des micas, qui est généralement assez rapidement altéré en conditions superficielles (Wilson, 1999). Un autre pic bien marqué indique la présence d'un ou d'autres phyllosilicates, vers 20,0°. Il a été attribué à un minéral apparenté aux groupes des chlorites, mais cette attribution n'est pas satisfaisante (nous renvoyons à la discussion sur le cas d'étude de Chalain, où ce pic a une importance particulière). Il pourrait s'agir d'édifices intergrades ou interstratifiés de phyllosilicates, comprenant des feuillettes de type chlorite secondaire, mais aussi micacé (illite ?). D'autre part, il est envisageable que ces minéraux soient hérités, puisque le pic correspondant est bien présent dans l'échantillon Ng. Enfin, pour l'échantillon S2T, on observe un épaulement vers 5,8-5,9°, qui est très probablement lié à la présence de vermiculite. Sa position à hauteur des angles d'incidences aiguës ne permet cependant pas de définir son abondance relative (Harris et White, 2008). De plus, les trois diffractogrammes montrent une oscillation assez large, centrée autour de 35,0°, qui correspond à un oxyde de fer, certainement de la magnétite (Fe₃O₄) ou de la titanomagnétite (son dérivé avec des substitutions de Fe³⁺ par Ti). Les raies secondaires de cet oxyde ne sont cependant pas très bien définies. C'est néanmoins un oxyde très courant, dans les roches et les sols (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Maher et Taylor, 1988). Son pic principal étant relativement bien visible en Ng, la (titano)magnétite des unités S2g et S2T est plus probablement un minéral primaire hérité. En outre, pour l'échantillon S2T, nous identifions clairement la présence de goethite (oxyhydroxyde α-FeOOH). Même si ces raies de diffraction principales ont tendance à recouper les raies secondaires d'autres minéraux (kaolinite vers 21,2° et à 36,7° proche du quartz), elle est dans cet échantillon bien visible, car ces derniers ne sont pas trop abondants. Les diffractogrammes suggèrent également la présence faible de feldspaths en Ng mais bien définis pour S2g, avec trois pics entre 27,4° et 27,9°, plutôt des feldspaths potassiques (Harris et White, 2008 ; Delbey, 2018). On pourrait suspecter leur présence en S2T, mais les oscillations sont trop imprécises. Enfin, on note également pour S2g et S2T (voire Ng) une petite oscillation vers 17,8° qui n'est pas clairement attribuée. Il pourrait encore s'agir d'une composante micacée, mais aucun modèle adéquat avec les autres pics identifiés n'a été trouvé dans la base de données utilisée.

Tableau 13 : Synthèse des cortèges minéralogiques des échantillons rubéfiés et encaissants (< 200 µm) de Vaudes.
Interprétation du degré d'abondance relatif : +++ ou ++++ : forte à très forte

++ : moyenne

+ : faible

(+) : assez/très faible (pics potentiels ou mal définis)

- : non identifié

Échantillon		Quartz	Calcite	Kaolinite	Biotite	Type- Chlorite	Vermiculite	(Titano)Magnétite	Goethite	K-Feldspaths
Unité rubéfiée	VAU-59	++++	-	(+)	-	++	-	(+)	(+)	+
	VAU-70	+++	-	+	-	++	-	+	-	+
	VAU-46	+++	(+)	(+)	(+)	++	(+)	+	(+)	(+)
Encaissant inférieur S2g		++++	+	++	+	+	-	(+)	-	+
Encaissant inférieur S2T		+++	+	+	(+)	++	(+)	+	+	(+)
Substrat Ng		+++	+++	++	+	++	-	+	-	(+)

Les cortèges minéralogiques globaux des encaissants sont donc plutôt proches. L'échantillon S2T se distingue néanmoins quelque peu. La présence nette de la goethite, conjointement à la forte suspicion d'une présence de vermiculite et au contraire la très faible représentation (ou l'absence ?) de biotite (et des feldspaths) indique une altération et un développement de minéraux secondaires plus avancé qu'en S2g et Ng. La goethite est en quantité trop faible pour qu'elle puisse visiblement s'exprimer à travers les teintes de l'unité. Sa présence, dans ce contexte pédoclimatique globalement humide, mais non réductique, est tout à fait banale. La biotite, riche en fer et facilement altérable, peut en être le précurseur, de même que pour la formation de vermiculite (Wilson, 1999 ; Malla, 2002 ; Cornell et Schwertmann, 2003). Ces observations sont cohérentes avec l'hypothèse que S2T corresponde à un horizon de paléosol. Néanmoins, des analyses supplémentaires sur la fraction argile seule, avec traitements chimiques et thermiques, s'avèreraient très pertinentes, car les phyllosilicates sont, à cette maille granulométrique, difficilement identifiables.

5.4.2. L'unité rubéfiée

Les échantillons de l'unité rubéfiée sont tous nettement dominés par le quartz. La calcite serait éventuellement présente en quantités infimes dans l'échantillon VAU-46. Parmi les phyllosilicates, on retrouve le type-chlorite assez bien exprimé, et la kaolinite, qui au contraire est plus faible et mal définie, en comparaison des encaissants. De la biotite en très faibles quantités pourrait être présente en VAU-46, de même que de la vermiculite. De plus, on observe des oscillations très fines, mais irrégulières entre environ 6° et 8° que nous n'avons pas pu attribuer. D'autre part, on relève encore la présence de la magnétite, toujours en faibles quantités. La présence de goethite pourrait être envisagée pour VAU-46 et VAU-59, car la kaolinite n'est présente que très légèrement, ce qui amène à penser que le pic vers

21,2° n'est pas lié à cette dernière. Dans les échantillons VAU-70 et VAU-59, un pic bien défini à 27,7° est interprété comme du feldspath. Il est néanmoins notable que sa signature se distingue relativement de celle identifiée dans les encaissants.

La représentation générale des minéraux cristallins est donc légèrement moindre que dans les unités encaissantes. Il n'y a néanmoins pas de nouveaux minéraux qui distingueraient l'unité rubéfiée, comme étant une unité allochtone. L'effacement encore plus marqué de la biotite et celui de la kaolinite ne s'expliquent donc vraisemblablement pas, par la transformation de ces phyllosilicates. La moindre représentation de la kaolinite est remarquable, puisque celle-ci n'est normalement pas altérable dans les conditions climatiques considérées, et de plus, est en général peu mobile (White et Dixon, 2002 ; Mathieu et Lozet, 2011). Si ces résultats sont difficilement interprétables d'un point de vue pédologique, ils peuvent l'être simplement par l'hypothèse d'une chauffe de ces matériaux, qui aurait entraîné la déshydratation puis la déshydroxylation des feuillets argileux, et ainsi leur effondrement structurel. La kaolinite subit une déshydroxylation entre 400 et 600°C (Karathanasis et Hajek, 1982 ; Karathanasis, 2008). La biotite, également à partir de 400°C au moins (Smykatz-Kloss, Heide et Klinke, 2003). Pour les vermiculites, selon que leurs espaces interfoliaires sont plutôt constitués de cations hydratés ou de véritables couches d'hydroxyles, leurs températures de déstructuration varient (Harris et al., 1992 ; Karathanasis, 2008 ; Ma et al., 2019). Dans le premier cas, le phénomène peut s'amorcer dès 250-300°C environ. La chauffe permettrait de plus d'expliquer les irrégularités mineures relevées aux angles de diffractions aiguës, comme l'oscillation diffuse vers 7,8° en VAU-59, en tant que raies d'édifices de vermiculite effondrés. La possibilité que seules les structures feldspathiques les plus résistantes soient conservées est envisageable, mais cela pourrait n'être que le fait d'une variabilité inter-échantillon.

Les diffractogrammes de VAU-46 et VAU-59 suggéreraient donc que ces échantillons sont apparentés à l'unité S2T, la seule où la vermiculite est identifiée. Cela serait cohérent avec la localisation spatiale des structures en question, les deux étant situées dans le secteur Est, où l'horizon S2T se développe. VAU-70 étant situé dans le secteur à l'Ouest de l'Hozain. Selon cette hypothèse, l'absence de goéthite dans les échantillons VAU-46 et VAU-59 (si celle-ci était effectivement déjà présente au moment de l'évènement) pourrait s'expliquer, de manière similaire, du fait de sa déshydroxylation, qui se produit entre environ 250 et 400°C (Norrish et Taylor, 1961 ; Schulze et Schwertmann, 1984 ; Ruan, Frost et Klopogge, 2001 ; Zhou et al., 2010 ; Brodard, 2013). Ce processus mène généralement à la formation d'oxydes d'hématite, or, celle-ci n'est pas identifiable. Cela pourrait s'expliquer soit, parce que l'hématite serait en proportion trop faible (ce qui est envisageable, car des proportions extrêmement faibles d'hématite peuvent engendrer une coloration rouge très vive), soit qu'elle serait présente sous la forme de cristaux pauvrement ordonnés ou de faibles dimensions (cryptocristaux). Cette seconde possibilité peut advenir quand l'hématite se développe à des températures inférieures à 600°C (Wolska et Schwertmann, 1989 ; Gualtieri et Venturelli, 1999 ; Cornell et Schwertmann, 2003, part. 14.2 ; Lamouroux, 1972 ; Peterson et al., 2015). D'autre part, la magnétite peut être oxydée en hématite à partir de températures supérieures à 300-400°C, voire à partir de températures plus hautes (Cornell et Schwertmann, 2003, p. 403). Ainsi, selon l'hypothèse pyrogénique, les températures maximales, et soutenues un certain temps, au sein de l'unité rubéfiée, ne devraient pas avoir dépassé les 600°C et vraisemblablement même moins, pour expliquer la persistance faible de kaolinite et les indices discrets de vermiculite (< 500°C ?). Évidemment, cette interprétation

ne prend pas en compte les éventuels changements post-dépositionnels intervenus dans ces différentes unités.

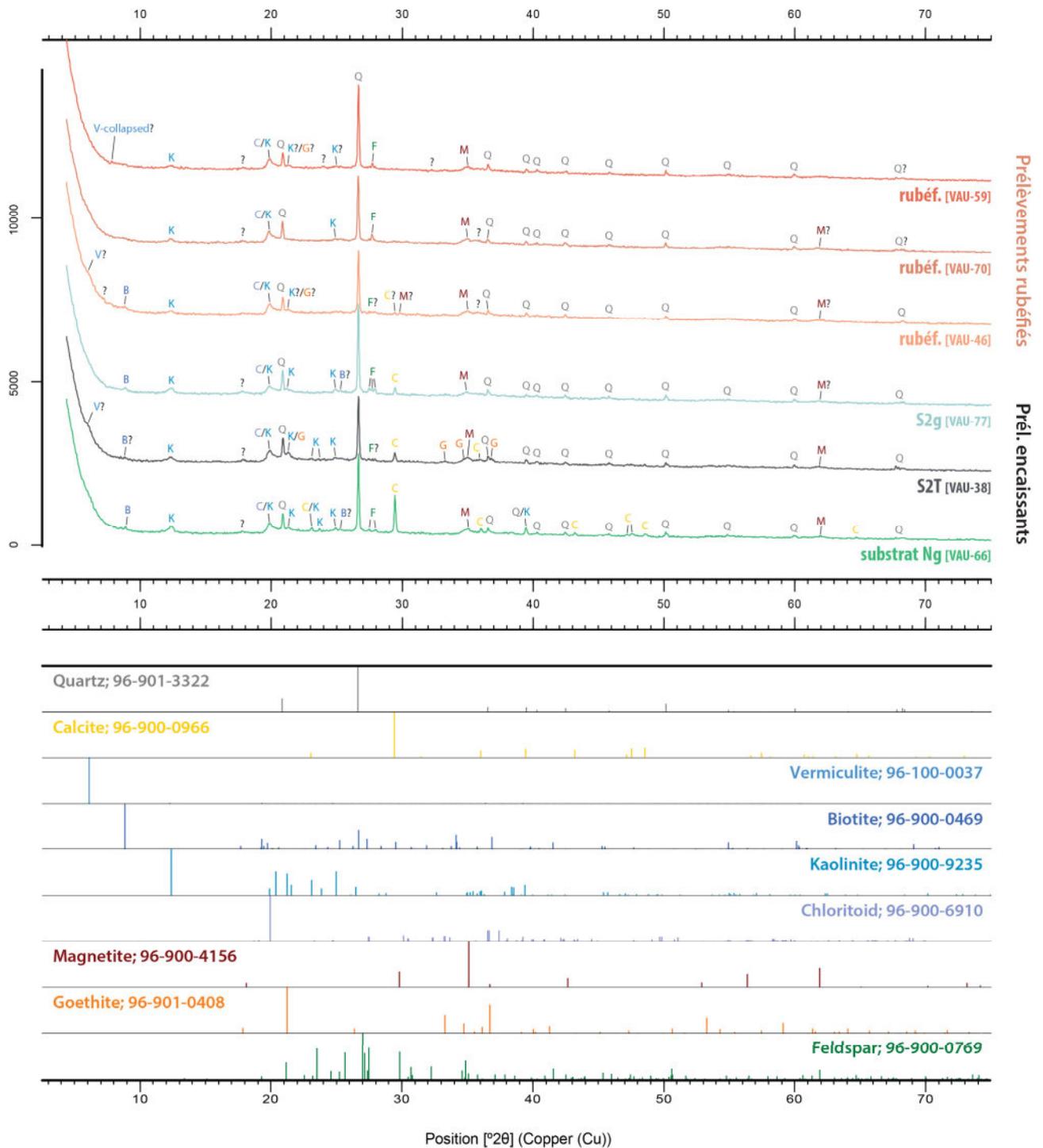


Figure 46 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons de Vaudes et des modèles de référence des minéraux identifiés (base de données COD).

5.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium

Quatre échantillons ont fait l'objet d'analyses d'extraction et de dosage de différentes formes du fer, de l'aluminium et du silicium selon la méthode Tamm en obscurité (extrait codé OX) et Mehra-Jackson (CBD) réalisées par le laboratoire INRAE d'Arras. Le Tableau 14 présente ces résultats, les calculs des différentes formes élémentaires extraites, et quelques rapports entre ces différentes formes qui peuvent apporter des informations relatives aux dynamiques pédologiques (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Baize, 2018).

Tout d'abord, on note qu'il n'apparaît pas de différence significative dans les teneurs en fer total entre les unités rubéfiées et les encaissants, en comparaison des échantillons analysés précédemment. Ni l'appareil de mesure, ni les échantillons, ni les fractions testées (ici $< 200 \mu\text{m}$) n'étant similaires, il n'est pas possible d'en préciser la cause. Il est envisageable que la non-considération de la fraction des sables grossiers ($200 \mu\text{m} - 2 \text{mm}$) élimine une certaine variabilité puisque le fer est souvent associé aux fractions fines. Dans tous les échantillons, la teneur en fer libre par rapport à celle totale est assez élevée ($\text{Fe}_{\text{CBD}}/\text{Fe}_{\text{T}} > 58 \%$) ce qui indique que les matériaux ont déjà connu une relativement longue altération, que cela soit sur place ou non (héritage). Considérés par paire avec leur encaissant respectif, les échantillons rubéfiés ont une teneur relative en fer libre légèrement inférieure. Mais la différence la mieux exprimée est celle du rapport entre l'ensemble du fer libre (Fe_{CBD}) et le fer libre faiblement cristallisé ou amorphe (Fe_{OX}). L'unité rubéfiée montre une fraction de ce Fe_{OX} assez forte, et en particulier pour l'échantillon 59. Cette différence est d'autant plus tranchée par rapport à celle de son encaissant S2T (33 % contre 3 %). On note par ailleurs que cet échantillon 59 est celui qui présente la teinte la plus rouge parmi les échantillons analysés. Étant donné que le taux de C_{ORG} est plus bas dans l'unité rubéfiée, il est peu probable que les taux plus élevés de Fe_{OX} correspondent à du fer amorphe liés aux matières organiques (fer complexé). Ce résultat suppose plutôt que les échantillons rubéfiés possèdent une fraction d'oxydes de fer pauvrement cristallisés (Cornell et Schwertmann, 2003, p. 437-439). Un dernier point remarquable concernant le fer est que la part des oxydes bien cristallisés est inférieure dans les échantillons rubéfiés.

Pour l'aluminium, la fraction élémentaire totale est légèrement supérieure dans les échantillons rubéfiés par rapport aux encaissants. Ce phénomène n'apparaissait pas dans les analyses précédentes. Mais surtout, on remarquera que Al_{T} est plus élevé dans les fractions inférieures à $200 \mu\text{m}$ ($\approx 5-6 \%$) que dans la terre fine totale ($\approx 3-3,5 \%$). Cela est néanmoins cohérent avec le fait que l'aluminium est en général surtout présent comme constituant des réseaux cristallins des minéraux argileux (Guillet et Souchier, 1979). Les différentes fractions extractibles de l'aluminium se distinguent très clairement entre les deux groupes d'unités. Dans les unités encaissantes, l'aluminium estimé des silicates domine nettement ($> 90 \%$) par rapport à celui de la fraction libre. De plus, les deux méthodes d'extractions fournissent des résultats assez équivalents. Au contraire, dans l'unité rubéfiée, l'aluminium libre est nettement plus abondant, même si la part des silicates est toujours majoritaire. De plus, les teneurs de Al_{OX} dépassent maintenant largement celles de Al_{CBD} . Il y a donc dans les échantillons rubéfiés une portion importante d'aluminium qui ne provient pas de la matrice de cristaux bien développés, mais qui est présent sous une forme cryptocristalline ou amorphe (Fey et Le Roux, 1977). En fait, les valeurs de Al_{OX} (et moindrement de Al_{CBD}) mesurées pour l'unité rubéfiée, sont très élevées par rapport à ce que nous connaissons dans la littérature pédologique, elles dépassent les maximums enregistrés dans des

horizons d'accumulation de composés amorphes (horizons spodiques) de sols podzoliques très évolués (dans Souchier, 1971 ; voir aussi : Baize, 2000, p. 138-139 ; Gobat et Guenat, 2019, p. 339), et sont de l'ordre de celles de sols volcaniques (Caner, 2000, p. 164 & 267). Du point de vue du contexte pédologique, ce résultat est totalement incohérent, d'autant que les compositions élémentaires vont dans le sens que les matériaux rubéfiés sont apparentés à ceux encaissants. Par contre, il est tout à fait compatible avec celui d'une chauffe, qui, en désordonnant et détruisant les minéraux argileux, peut entraîner la libération de l'aluminium des feuillettes et la formation de complexes alumineux amorphes (non organiques ; Singh et al., 1991).

On observe des résultats de même tendance pour les extractions du silicium que pour celles de l'aluminium, bien que dans des proportions plus modérées. C'est aussi dans l'échantillon le plus rubéfié (VAU-59) que le silicium extrait à l'oxalate est le plus élevé. Ces résultats peuvent s'interpréter conjointement à ceux de l'aluminium, c'est-à-dire résultant de la déstructuration de minéraux argileux et la formation de composés amorphes alumino-silicatés.

Tableau 14 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si

	Encaissants inférieurs		Unité rubéfiée	
	S2g	S2T	(sur S2g)	(sur S2T)
	VAU-77	VAU-38	VAU-46	VAU-59
Fer total (Fe_T)	9,43	8,46	8,76	9,05
Fer "libre" total (Fe_{CBD})	6,19	5,15	5,29	5,27
Fer "libre" amorphe ou mal cristallisé (Fe_{OX})	1,08	0,14	1,26	1,75
Fer des silicates (Fe_{SI} = Fe_T - Fe_{CBD})	3,24	3,31	3,47	3,78
Fer des oxydes bien cristallisés et/ou fer complexé humique (Fe_{CBD} - Fe_{OX})	5,11	5,01	4,03	3,52
Rapport Fe_{OX} / Fe_{CBD} (%)	17,4	2,8	23,8	33,2
Rapport Fe_{CBD} / Fe_T (%)	65,6	60,9	60,4	58,2
Rapport (Fe_{CBD} - Fe_{OX}) / Fe_T (%)	54,2	59,2	46,0	38,9
Aluminium total (Al_T)	5,45	5,36	5,79	5,88
Aluminium "libre" Al_{CBD}	0,47	0,46	0,95	0,99
Aluminium "libre" Al_{OX}	0,48	0,36	1,58	2,30
Aluminium des silicates (Al_{SI} = Al_T - Al_{OX})	4,97	4,99	4,21	3,58
Rapport Al_{SI} / Al_T (%)	91,1	93,2	72,7	60,9
Rapport Al_{OX} / Al_T (%)	8,9	6,8	27,3	39,1
Silicium total (Si_T)	11,43	10,70	10,47	10,49
Silicium "libre" (Si_{CBD})	0,17	0,12	0,21	0,24
Silicium "libre" (Si_{OX})	0,14	0,07	0,52	0,89
Rapport Si_{OX} / Si_T (%)	1,2	0,7	4,9	8,5

5.6. Spectres de réflectance

Les spectres de réflectances mesurés dans le domaine du visible (400-700 nm) peuvent permettre d'identifier quelques composants qui expliquent la coloration générale des matériaux. La Figure 47 présente les courbes des premières dérivées de ces spectres, moyennes des échantillons encaissants et des échantillons rubéfiés, du prélèvement de l'unité S2T (VAU-38), ainsi que celle du prélèvement ayant la teinte la plus rouge (VAU-59). L'absence de pics marqués au-delà de 600 nm environ montre que les matières organiques ne jouent pas un rôle majeur dans les teintes des échantillons (Balsam et Beeson, 2003 ; Debret et al., 2011), ce qui est en accord avec les précédents résultats. Les moyennes des deux groupes d'échantillons montrent une évolution globalement assez proche, mais se distinguent légèrement entre les longueurs d'onde comprises entre 540 et 600 nm environ. L'augmentation, quoique peu marquée, qui caractérise les échantillons rubéfiés à ces longueurs d'onde, suggère la présence de goethite et d'hématite (Deaton et Balsam, 1991 ; Madeira et al., 1997). La dérivée moyenne des encaissants n'est par contre pas très diagnostique.

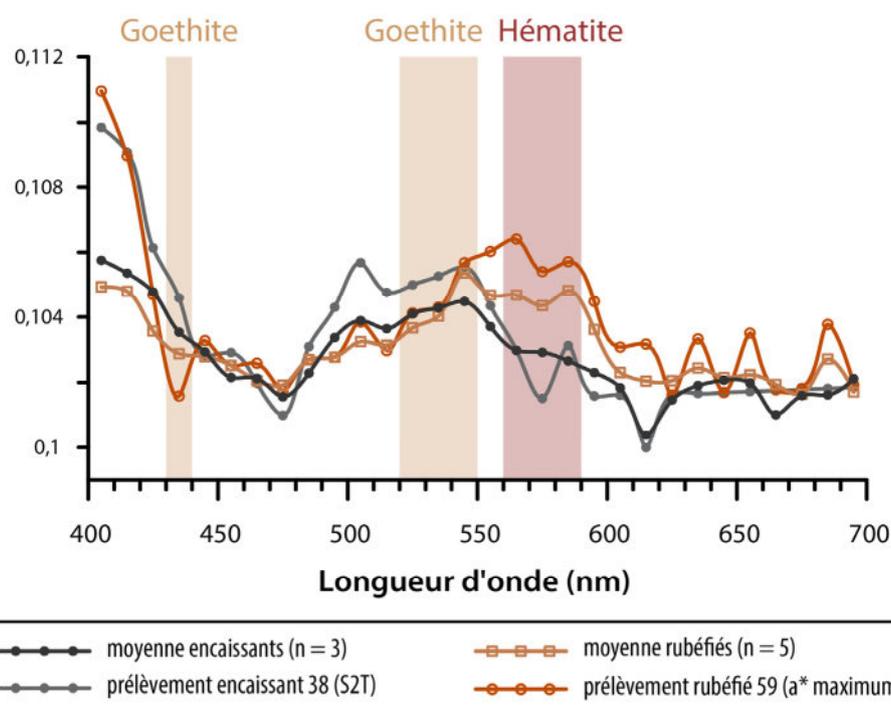


Figure 47 : Courbes des premières dérivées des spectres de réflectance du domaine de lumière visible, des échantillons rubéfiés et encaissants (moyennes) et de l'échantillon VAU-59 de Vaudes.

Les deux courbes dérivées des échantillons individuels sont plus informatives. Celle de S2T permet d'observer un pic à 505 nm et un épaulement qui se prolonge jusqu'à 545 nm, ainsi qu'un autre situé aux basses longueurs d'onde, à 405-435 nm. Ces signatures correspondent certainement à l'influence conjointe de phyllosilicates et de la goethite. Le pic de goethite à 435 nm est en partie masqué par l'épaulement important des basses longueurs d'onde, qui pourrait être relié à des minéraux illitiques (Debret et al., 2011). Le pic à 505 nm pourrait plutôt correspondre à la présence de kaolinite (Balsam et Beeson, 2003). Pour l'échantillon S2T, les résultats minéralogiques sont tout à fait concordants avec

les spectres de réflectance. La courbe dérivée de l'échantillon rubéfié VAU-59 se rapproche de la courbe moyenne de cette unité, tout en étant nettement plus marquée. On observe à nouveau un net épaulement aux faibles longueurs d'onde, mais qui n'est plus visible pour la raie de la goethite à 435 nm. Ensuite, on retrouve la signature identifiée entre 545 et 585 nm sur la moyenne des échantillons rubéfiés, mais plus marquée. Cela confirme la présence d'hématite, dont la teneur absolue est vraisemblablement trop basse, ou l'ordonnement cristallin trop faible, pour qu'elle puisse être identifiée en DRX (Deaton et Balsam, 1991 ; Jouaffre et al., 1991 ; Scheinost et al., 1998 ; Zhou et al., 2010). Par extrapolation, ces résultats semblent confirmer la présence d'hématite en proportion extrêmement faible, accompagnée de goethite, dans les autres échantillons de l'unité rubéfiée.

5.7. Susceptibilité magnétique

Des mesures de la susceptibilité magnétique ont été réalisées sur un profil avec l'unité rubéfiée, ainsi que sur les échantillons de sédiments préparés en laboratoire. Dans les deux cas, les matériaux rubéfiés ont montré des valeurs largement supérieures aux autres unités pédo-sédimentaires : elles s'échelonnent entre un peu moins de 400×10^{-5} uSI, à un maximum de 1017×10^{-5} uSI. Les mesures faites sur les échantillons encaissants sont, à une exception près, toutes inférieures à 50×10^{-5} uSI et dans la majorité des cas ne dépassent pas 10×10^{-5} uSI. Le facteur d'accroissement ($\times 10$ à $\times 100$) entre les matériaux encaissants et rubéfiés est très important, ce qui n'est pas explicable par des processus pédogénétiques. Bien qu'il n'existe pas de seuil strict à partir duquel on puisse attester d'un accroissement d'origine thermique, la comparaison de ces valeurs avec les données de la littérature va clairement dans le sens que les sédiments rubéfiés résultent d'une chauffe (Brodard, 2013 ; Hulin, Broes et Fechner, 2012 ; Hulin, Prilaux et Talon, 2014 ; Marmet, Aubry et Best, 2002).

5.8. Cuissons expérimentales

Des chauffes expérimentales en laboratoire d'échantillons de sédiments ont été menées pour comparer les caractéristiques colorimétriques et la susceptibilité magnétique de l'unité rubéfiée. Pour cela, ce sont les prélèvements des unités sous-jacentes qui servent de référentiel : S2g, S2T et Ng, préparés et homogénéisés à la maille de 200 μm , idem que pour les analyses DRX. Deux protocoles opératoires ont été testés. Dans le premier protocole, les mêmes échantillons sont mis à chauffer successivement durant une heure, à des paliers de température successifs et croissants de 50 °C, compris entre 200 et 1000 °C. Entre chaque cuisson, les échantillons sont refroidis à température ambiante et une prise de mesure est réalisée au spectrophotomètre. Dans le second protocole, des échantillons sont chauffés une fois, à un palier maximum de température fixé (200, 400, 450, 500, 600, 800°C), pendant différentes durées (1, 2, 4 et 8 h).

Ajoutons que des mesures de susceptibilité magnétique ont été effectuées conjointement avec la colorimétrie. Cependant, les échantillons n'ont montré aucune variation significative dans leur susceptibilité magnétique pour pouvoir réaliser des comparaisons. Les traitements préparatoires (broyages, tamisages) et les conditions de chauffes en laboratoire (absence de combustible) s'éloignent vraisemblablement trop des conditions réelles pour que ce paramètre varie significativement. La cause

exacte de l'échec n'est pas définie. Pour la couleur, les deux protocoles livrent globalement des résultats comparables. Pour les 24 appariements d'échantillons possibles, les séries ont pour chaque paramètre, L^* , a^* , b^* , les coefficients de corrélation respectifs : 0,89 ; 0,99 et 0,96.

La Figure 49 présente les résultats colorimétriques des expérimentations de chauffe unique, selon deux représentations graphiques bidimensionnelles complémentaires. La première (a), présente les valeurs de a^* (rouge) en fonction de b^* (jaune), et considère donc uniquement les teintes des échantillons. La seconde montre le rapport a^*/b^* en fonction de la clarté L^* . Concernant l'évolution générale des échantillons au cours de la chauffe, on remarque deux grandes tendances. D'abord, un assombrissement des échantillons et des variations de teintes irrégulières jusqu'à 300°C, puis, au-delà, un éclaircissement très progressif accompagné d'une augmentation des teintes, relativement équilibrée entre rouge et jaune. L'assombrissement s'explique par la carbonisation des composés organiques (déshydratation et décarboxylation) avant que ceux-ci ne soient complètement oxydés à plus hautes températures (Ulery et Graham, 1993 ; Sazawa et al., 2013). On remarque que l'inversement de tendance dans l'évolution de L^* se produit légèrement plus tôt en Ng et S2g. L'unité S2T étant un paléosol, l'assombrissement plus marqué de ces échantillons pourrait s'expliquer par des différences dans la nature ou l'état de ces matières organiques (plus fortement humifiées et liées à la fraction minérale). En outre, S2T se distingue des deux autres unités par l'évolution de ces teintes, qui, à partir de 300°C, croissent nettement plus rapidement. Une cuisson maintenue entre une et deux heures à 400°C permet d'obtenir des colorations plus teintées que pour les échantillons S2g ou Ng chauffés une heure à 500°C. Une telle observation est loin d'être négligeable, puisque si, a fortiori, l'évolution thermique des teintes résulte des modifications physico-chimiques et minéralogiques, alors le seul accroissement des durées de cuisson permettrait d'obtenir des effets comparables à des chauffes courtes, mais d'intensité moins forte. En contrepoint de cette affirmation, on relève toutefois que pour les températures les plus hautes, au-delà de 500°C, les durées de chauffes ne permettent plus d'engendrer des modifications comparables de celles obtenues à des températures plus hautes. Il y a donc vraisemblablement bien des effets de seuils, liés aux températures atteintes. Ainsi, entre environ 300 et 500°C compris, les teintes sont très sensibles tant aux températures, qu'aux durées de chauffe. De plus, les teintes acquises dépendent donc nettement des échantillons, qui pourtant, comme nous l'avons vu, sont globalement très similaires.

La projection des échantillons rubéfiés sur les deux graphiques montre qu'ils ne se superposent pas vraiment aux échantillons de référence. Ils sont caractérisés par des teintes légèrement plus jaunes, comme le montre nettement leur alignement parallèle à l'évolution des référents, sur le graphique (a). Ce phénomène pourrait s'expliquer par le fait que les sédiments rubéfiés, avant leur chauffe, étaient d'une composition légèrement différente de celle, actuelle, des encaissants. Autrement, ce décalage pourrait résulter d'une évolution postérieure à la chauffe. D'autre part, il apparaît que les échantillons rubéfiés se trouvent être très proches de ceux de Ng chauffés. Ce résultat est un peu surprenant, et difficile à interpréter, car cette unité n'est pas directement liée à celle rubéfiée. Néanmoins, il faut considérer que c'est seulement la fraction fine de Ng qui a été chauffée, l'échantillon s'éloigne donc nettement de la composition réelle de l'unité (elle est débarrassée de sa fraction de sables grossiers et de graviers carbonatés). Outre cela, on relève tout de même que l'échantillon le plus faiblement rubéfié (VAU-82) se rapproche fortement de S2T, chauffé à 250°C pendant une heure. La non-superposition des échantillons pédo-sédimentaires et de ceux des cuissons expérimentales rend difficile d'assurer les

températures de cuisson. Néanmoins, pour ce qui est des teintes seules – qui discriminent mieux les évolutions de température que le paramètre L^* – les échantillons rubéfiés se trouvent tout de même clairement à proximité des gammes de températures basses, inférieures à 450°C par rapport à Ng-S2g, et même plutôt inférieures à 400°C par rapport S2T.

La Figure 48 présente les courbes d'évolution de la colorimétrie (distance spatiale entre les points) entre chaque chauffe successive à 50°C. Il permet de visualiser l'importance des modifications des couleurs, indépendamment de leur position effective dans l'espace colorimétrique tridimensionnel. Les augmentations de la courbe indiquent ainsi les gammes de température où les couleurs changent le plus. Nous pouvons en identifier quatre pour les unités encaissantes inférieures : la première à 300°C, la seconde entre 400 et 500°C inclus, la troisième à 850°C, et la dernière à partir de 1000°C. Ces phases de variations principales peuvent être comparées aux résultats obtenus selon la même méthode pour l'unité rubéfiée (recuit). Les deux derniers pics sont tout à fait identifiables (et dans des ordres de grandeur équivalents), de même qu'un pic à 500°C. À 450°C, la moyenne des valeurs est légèrement moindre. Mais, pour les échantillons rubéfiés recuits, aucun changement significatif de couleur n'est enregistré plus tôt. Nous interprétons ces résultats comme le fait que les échantillons rubéfiés ont au moins été chauffés au-delà de 300°C, mais n'ont pas connu de chauffe dépassant les 450°C, sur une durée aussi longue qu'une heure.

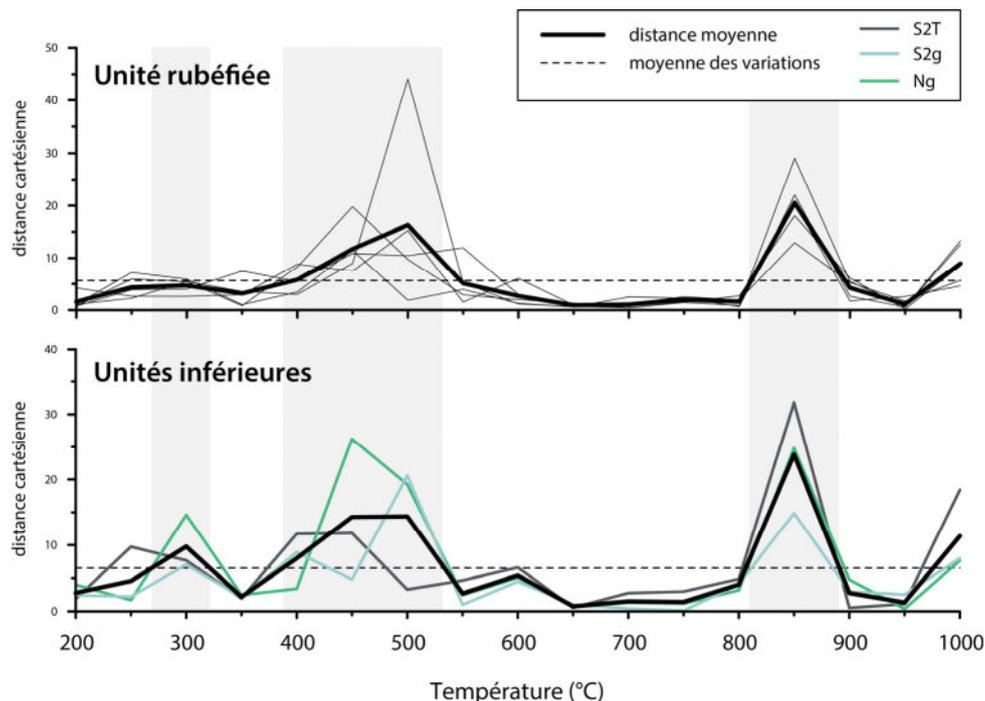
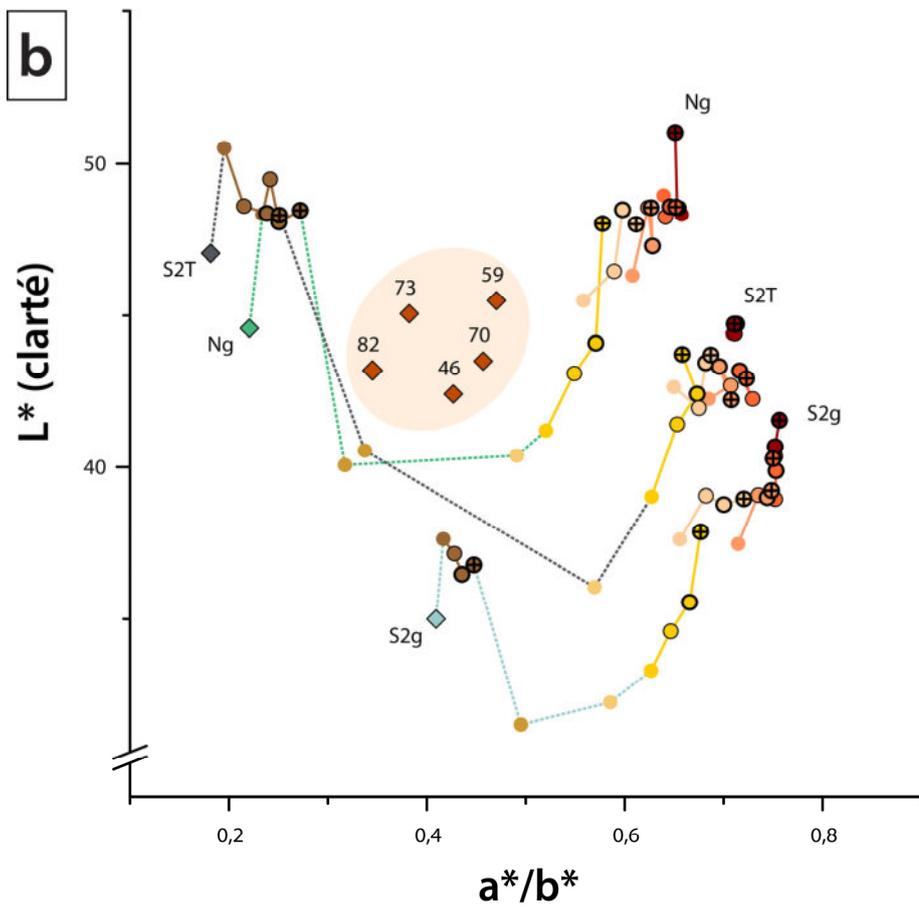
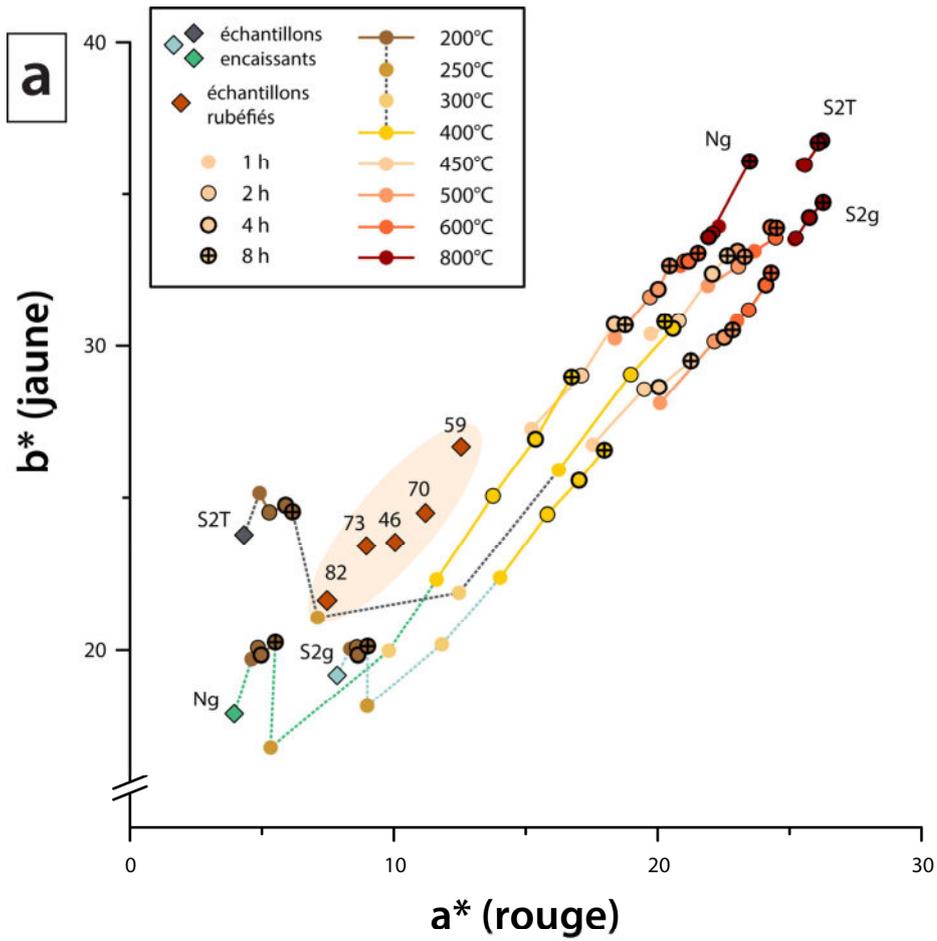


Figure 48 : courbes d'évolution de la colorimétrie des unités encaissantes et des échantillons rubéfiés en fonction des températures de chauffe.

Page suivante

Figure 49 : Représentation graphique des résultats colorimétriques relatifs aux cuissons expérimentales des sédiments de Vaudes



6. Résultats des analyses paléo-environnementales

6.1. Étude malacologique

En considération du contexte pédo-sédimentaire local, la mise en place d'une étude malacologique s'avérait pertinente pour documenter l'évolution de la structure de la végétation et du degré d'humidité, selon une résolution spatiale locale. L'analyse malacologique a été réalisée Sophie Martin⁶². Les effectifs malacologiques restant globalement plutôt faibles, au regard du nombre d'échantillons, nous avons regroupé les échantillons selon leurs attributions chrono-stratigraphiques en trois groupes. La Figure 50 présente ces résultats, avec d'une part le nombre de taxons différents ainsi que la quantité d'individus en pourcentage, identifiés pour chaque classe écologique. Globalement, les assemblages malacologiques du secteur illustrent une assez grande diversité de milieux, puisque l'on retrouve des taxons caractéristiques de milieux en permanence en eau, avec toutes les transitions entre des taxons terrestres de milieux plus ou moins humides et plus ou moins ouverts. Précisons que ce phénomène s'observe à l'échelle des prélèvements seuls et n'est donc pas un artefact dû à la compilation des prélèvements. D'autre part, il faut bien considérer que ces assemblages ne sont calés que de manière chrono-stratigraphique, et correspondent donc à un pas de temps plus ou moins long.

L'assemblage des unités inférieures montre une diversité relativement élevée. Le rapport entre taxons terrestres et aquatiques est équilibré, néanmoins, ils traduisent tous deux, un milieu très fortement marqué par l'humidité. Les espèces évoquant un milieu fermé sont assez bien représentées et diversifiées par rapport à ceux de milieux ouverts. On remarque que les taxons caractéristiques de milieux d'eau courante sont absents, même pour les prélèvements très proches du paléochenal. Ceci renvoie l'image d'un milieu marécageux, non strictement engorgé de manière permanente, et avec une composante forestière dominante. En somme, on peut reconstituer un environnement peu voire pas anthropisé, et possédant une relative diversité que l'on pourrait associer à l'existence d'une certaine hétérogénéité spatiale et topographique (chablis, etc.). Ces observations s'accordent avec les résultats géoarchéologiques précédents.

Les échantillons de l'unité rubéfiée ont livré des effectifs malacologiques faibles. Il est remarquable qu'aucune coquille identifiée ne présente de traces de combustion. Cela est notable, car les escargots possèdent un taux de survie peu élevé après un feu (même de faible intensité). Même si les coquilles peuvent être fragilisées à cause de la chauffe, elles sont aptes à résister sur le long terme aux processus taphonomiques, comme l'atteste la découverte fréquente de coquilles brûlées dans les gisements naturels et archéologiques (Kiss, 2002 ; Martin, 2004). Puisque les différents résultats d'analyses montrent que l'unité rubéfiée résulte d'une chauffe à des températures largement insuffisantes pour entraîner une destruction complète des coquilles d'escargots (décomposition du CaCO₃ à partir de 850°C au moins ; Pansu et Gautheyrou, 2006), cela suppose que les coquilles retrouvées et étudiées ont été déposées dans un second temps, soit par les alluvionnements subséquents, soit par une dynamique de reconquête. La reconquête peut être extrêmement rapide après le passage du feu (pour des incendies naturels), quand bien même peu d'individus y survivraient, grâce à leur habileté à profiter de micro-

⁶² Inrap Méditerranée, UMR 5140 Archéologie des Sociétés Méditerranéennes.

refuges liés à l'hétérogénéité du milieu à une échelle spatiale très fine (ou à la variabilité de l'intensité du feu ; Kiss et Magnin, 2003). En tous cas, l'absence de traces de coquilles brûlées reste surprenante compte tenu de l'importance et de la densité des traces rubéfiées, mais elle pourrait s'expliquer par des modalités particulières liées à l'évènement même. En tout cas, l'assemblage malacologique de l'unité rubéfiée doit être considéré comme illustrant un état du milieu postérieur à l'évènement, à court ou moyen terme.

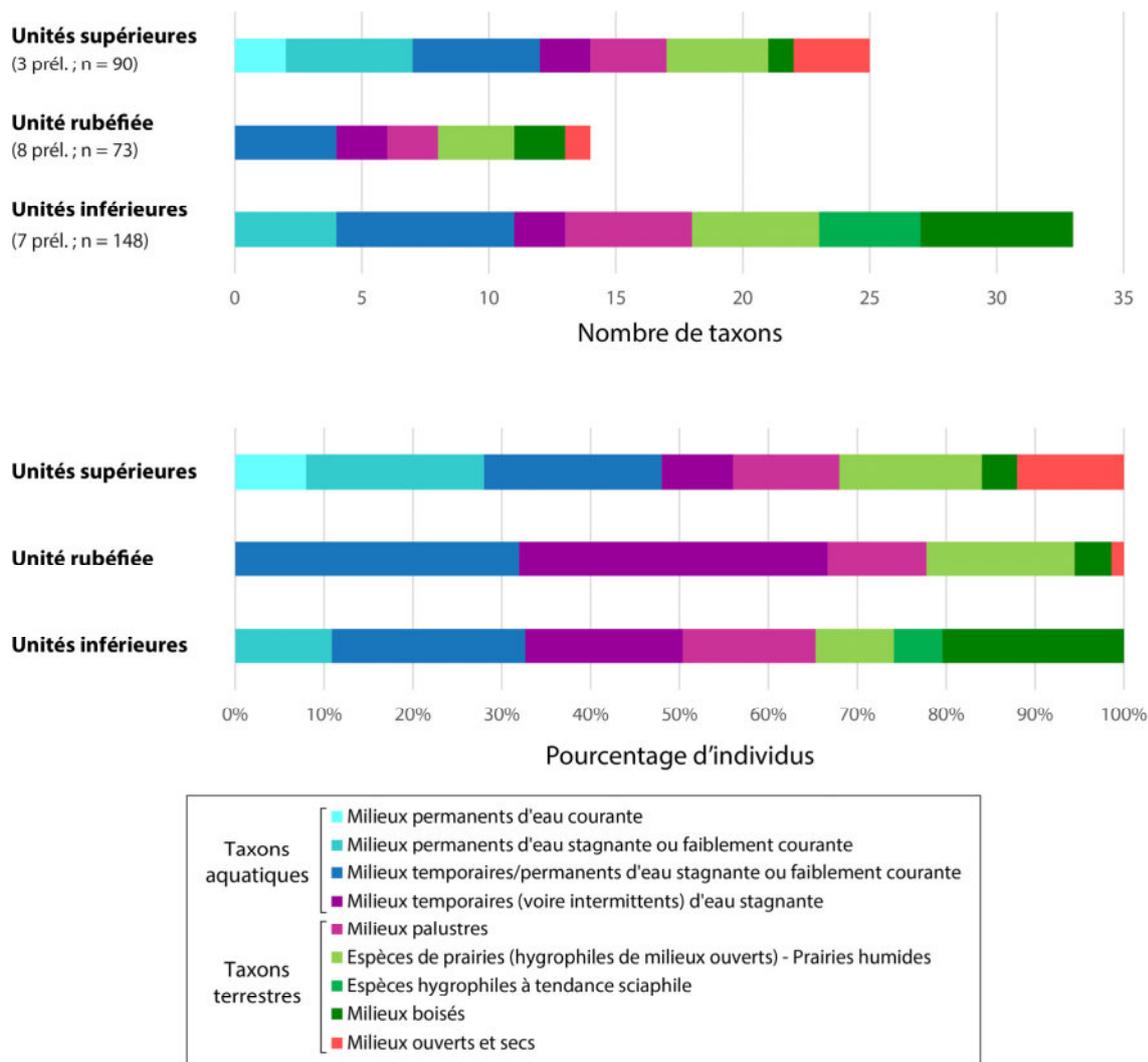


Figure 50 : Évolution générale de la malacofaune classée d'après leurs affinités écologiques, et regroupées en trois ensembles stratigraphiques, à Vaudes (réalisé d'après les données brutes de Sophie Martin).

La diversité de l'assemblage de l'unité rubéfiée est inférieure à celle des unités sous- et sus-jacentes, mais il faut prendre en compte son plus faible nombre d'individus, et surtout le fait que sa dynamique de formation est vraisemblablement bien plus courte que celles des unités inférieures et supérieures, et associée à un enfouissement relativement plus rapide. L'assemblage reste nettement dominé par les taxons de milieux humides, et en particulier aquatiques. Néanmoins, les gastéropodes traduisant un milieu plus permanent en eau et associé à de faibles écoulements sont moindrement représentés. De

plus, dans un des échantillons apparaît un taxon xérophile, typique de milieux très dénudés, *Candidula cf. unifasciata*. C'est un taxon associé aux herbacées sèches, qui, bien qu'unique, constitue dans ce contexte un indicateur clair d'une ouverture du milieu local sous l'influence des activités humaines. La représentation des milieux boisés est nettement diminuée, sans disparaître complètement (présents dans deux échantillons sur huit), et les taxons de prairies humides augmentent. Cela suggère la persistance d'un milieu palustre, marqué par des engorgements, au moins saisonniers, mais en grande partie déboisé et potentiellement mis en valeur.

L'assemblage des unités postérieures, bien qu'avec seulement trois prélèvements, montre une diversité accrue par rapport à l'unité rubéfiée. Le spectre malacologique change de façon plus marquée par rapport aux assemblages précédents. La part des taxons aquatiques est légèrement dominante, mais surtout, des mollusques caractérisant un milieu permanent d'eau douce sont enregistrés, confirmant sans surprise la présence d'un véritable cours d'eau (comblement du curage du chenal). Une seule occurrence indique un milieu boisé. Au contraire, on observe une nette augmentation des taxons xérophiles (de milieux ouverts et secs). Le milieu semble donc être nettement plus ouvert, mais caractériserait aussi une dynamique hydrologique différente, une réduction des taxons de milieux intermittents en eau, qui sont à mettre en parallèle avec une chenalisation des écoulements. Les taxons des milieux irrégulièrement inondés évoqueraient alors plutôt les composantes des berges humides attenantes du Vieil Hozain. Tout ceci traduit une augmentation de la pression anthropique locale, plus forte que ce qui est perçu dans l'assemblage de l'unité rubéfiée, mais relativement modérée par rapport aux unités antérieures.

6.2. Études archéobotaniques

L'analyse des végétaux carbonisés apparaît indispensable dans le cadre de l'interprétation de structures liées au feu, puisqu'elle permet de discuter de la nature du combustible, et donc, a priori, de nous renseigner sur le type d'évènement qui a produit ces traces rubéfiées. Un effort assez conséquent a été fait dans ce sens, par la multiplication des prélèvements, en vrac, mais aussi à vue, lors des fouilles en plan. Les prélèvements de sédiments de l'unité rubéfiée ont été traités par flottation et tamisage, à des mailles de 1 et 0,315 mm pour les carporestes et 2 mm pour les charbons. Les carporestes ont été analysés par Geneviève Daoulas⁶³, et les charbons de bois par Sylvie Coubray⁶⁴. Nous avons compilé les résultats des identifications botaniques dans le Tableau 15. Ajoutons qu'une recherche de phytolithes a également été entreprise, mais s'est révélée infructueuse (étude Pascal Verdin⁶⁵). Il a été proposé que cette absence puisse signaler que l'unité rubéfiée n'a pas été mise en culture. Il nous semble plutôt que le contexte hydrogéologique, un contexte alluvial avec une certaine influence des carbonates de calcium, soit globalement peu propice à la préservation de phytolithes (Canti, 2003).

⁶³ Inrap Grand-Est

⁶⁴ Inrap Centre – Île-de-France, UMR 7209 AASPE

⁶⁵ Inrap Méditerranée, UMR 7264 CEPAM

Les rares carporestes, tous carbonisés, correspondent à des taxons ubiquistes, donc peu diagnostics, affiliés à des pelouses, prairies, pâturages ou lisières. Les deux céréales identifiées n'ont pas pu être identifiées plus précisément. Les taxons ligneux, également peu nombreux, sont cependant plutôt variés. Ils incluent des essences nomades ou post-pionnières (chêne, frêne), mais également des essences pionnières (aulne, bouleau, saule). Malgré les faibles effectifs obtenus pour l'unité rubéfiée, il est remarquable qu'on y observe des taxons assez peu communs, dans le cadre d'analyses anthracologiques. La présence de fabacées est intéressante à noter, car les ligneux de cette famille comprennent notamment des essences de reconquête de milieux pâturés ou cultivés, et leur germination peut être favorisée par le passage du feu (Noirfalise et Thill, 1960 ; Tarrega, Calvo et Trabaud, 1992). Deux lianes sont identifiées, de la clématite et de la vigne. Compte tenu des données contextuelles pédo-sédimentaires et de l'absence d'indices d'anthropisation probants, antérieurs à l'unité rubéfiée, il est peu probable qu'il s'agisse de vigne cultivée, mais plutôt de vigne sauvage, de type *sylvestris* (Rameau et al., 2008 ; Zohary, Hopf et Weiss, 2018). C'est une essence à caractère héliophile, mais du fait qu'il s'agit d'une plante grimpante, elle peut être associée à des milieux plus fermés. La vigne sauvage est typique des forêts humides et alluviales (ibid.).

Tableau 15 : Synthèse des résultats des analyses anthracologiques et carpologiques du site de Vaudes.

	Taxons			Unités antérieures	Unité rubéfiée	Unités postérieures
	Famille	Sous-famille, Genre et espèce	Nom commun			
Anthracorestes	Fagaceae	<i>Quercus</i> sp.	Chênes		10	
	Oleaceae	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Frêne commun	1	4	
	Ulmaceae	<i>Ulmus minor</i> Mill.	Orme champêtre		3	
	Betulaceae	<i>Betula</i> sp.	Bouleaux		5	
	Betulaceae	<i>Alnus</i> sp.	Aulnes			1
	Betulaceae	<i>Carpinus betulus</i> L.	Charme			1
	Salicaceae	<i>Salix</i> sp.	Saules			3
	Sapindaceae	<i>Acer cf. campestre</i> L.	Erable	1		
	Vitaceae	<i>Vitis vinifera</i> L.	Vigne		2	
	Ranunculaceae	<i>Clematis cf. vitalba</i>	Clématite		1	
	Rosaceae	Prunoideae			2	
	Fabaceae				2	
	Total			2	29	5
	Volume traité (L)			58	107	20
Densité (nombre/L)			0,034	0,271	0,25	
Carporestes	Poaceae	<i>Cerealia indeterminata</i>	Céréales indéterminées	1	1	
	Cyperaceae	<i>Carex sp. tristigmate</i>	Laïche	1		
	Cyperaceae	<i>Carex flacca</i>	Laïche glauque		2	
	Orobanchaceae	<i>Rhinanthus</i> sp.	Rhinanthe		1	
	Caprifoliaceae	<i>Sambucus ebulus</i>	Sureau yèble			1
	Total			2	4	1
	Volume traité (L)			58	107	39
Densité (nombre/L)			0,034	0,037	0,026	

Ajoutons que l'anatomie des charbons de bois est identifiée comme celle d'organes aériens et non souterrains. La grande similitude anatomique observée entre des charbons provenant de prélèvements spatialement proches pourrait indiquer la fragmentation et la dispersion d'un même individu, ou sinon l'exploitation d'une population de plusieurs individus présentant des conditions de croissance proches. Dans les structures rubéfiées, les calibres estimés sont majoritairement supérieurs à 7 cm, et les patrons de croissance sont plutôt irréguliers. Des stigmates interprétés comme le résultat d'émondages ont été observés sur un charbon de frêne et un autre de chêne, tous deux provenant de l'unité rubéfiée (Haas et Schweingruber, 1994).

Le résultat marquant de ces analyses reste néanmoins la rareté des macrorestes carbonisés au vu de l'important volume de sédiments traité, ainsi que des nombreuses structures fouillées manuellement. Ce résultat pourrait être imputé à des phénomènes post-combustion, comme celui d'une désintégration par l'alcalinité induite par un enfouissement avec une forte densité de cendres, mais ceci n'est pas confirmé en micromorphologie (Huisman et al., 2012). Il pourrait également être expliqué par des modalités de combustion précises (oxygénation), et/ou par la nature même du combustible, c'est-à-dire un combustible non ligneux, mais on ne possède pas de référentiel qui permette d'évaluer la représentativité de ces écofacts dans un tel contexte.

7. Chronologie et périodicité du phénomène

L'unité rubéfiée n'a quasiment pas livré de mobilier (quelques fragments de faune et deux tessons médiévaux *lato sensu*), et c'est donc entièrement sur les datations par radiocarbone que repose son attribution chronologique. Treize datations radiocarbone ont été effectuées par le laboratoire Beta Analytic sur des charbons prélevés directement au sein des structures sur le terrain ou issus du tamisage d'échantillons de sédiment en phase d'étude. Ils ont été sélectionnés de manière à former un maillage spatial réparti sur toute l'étendue du phénomène. La Figure 51 présente les probabilités d'attribution radiocarbone obtenues par la calibration des âges bruts, pour l'ensemble des dates réalisées.

Les datations de l'unité rubéfiée s'étalent sur un pas de temps relativement long, qui couvre près de quatre siècles, si on les considère dans leur ensemble. Les unités postérieures, associées au chenal du Vieil Hozain, ont livré des dates tout juste plus anciennes, dont les probabilités s'échelonnent de 1220 jusqu'à environ 1600 cal. AD. Le charbon de bois de l'unité US 1001, qui recouvre à la fois l'unité rubéfiée et les comblements du chenal, a livré une date contemporaine des dates terminales de l'unité rubéfiée. Elle est donc stratigraphiquement inversée, logiquement du fait d'une remobilisation de matériaux de surface lors de sa mise en place. D'autre part, un bois non carbonisé de chêne, préservé dans un chablis colmaté par l'unité S2T, a donné une date contemporaine de ces dernières. Mais, étant dans un secteur à plus d'une centaine de mètres des traces rubéfiées, il ne peut être clairement mis en relation avec celle-ci. Cette date est difficilement interprétable du fait que le bois n'est pas brûlé, et de plus qu'il correspond à du bois de branche et non de racine (analyse Willy Tegel ; DendroNet). On notera seulement que sa datation est distinctement contemporaine de celle du frêne de l'unité rubéfiée, dont l'anatomie suggère des pratiques sylvicoles. Les autres datations de l'unité inférieure S2T sont, elles, largement antérieures (600-300 cal. BC/AD environ). La présence de l'érable champêtre, essence calcicole typique, traduit l'influence du substrat calcaire, encore à faible profondeur, à cette période

(Jacamon, 1992). Il semble donc, en accord avec les résultats géo-archéologiques, que les événements à l'origine de l'unité rubéfiée interviennent sur un sol alluvial qui se développe certainement depuis au moins plus d'un millénaire.

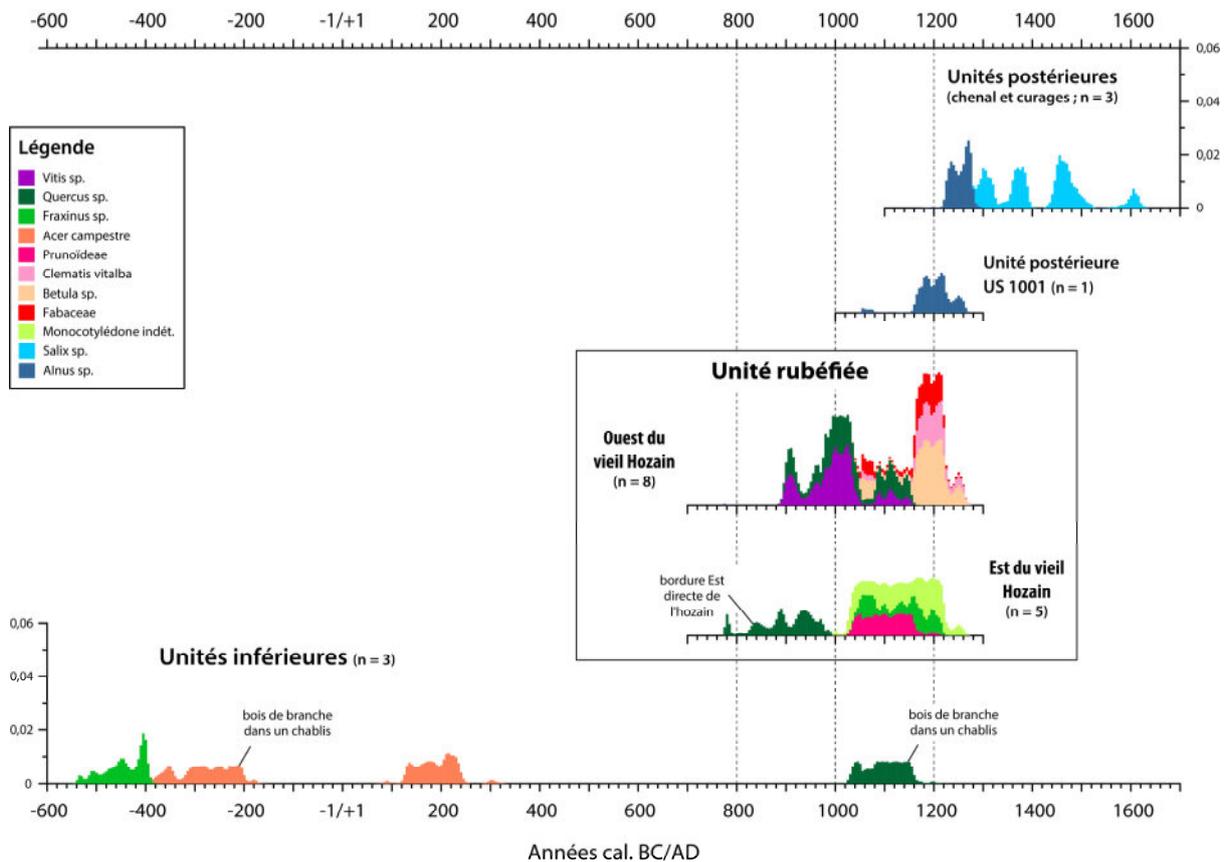


Figure 51 : Distribution chronologique des probabilités radiocarbones obtenues pour l'opération de Vaudes. Probabilités à résolution de cinq années, obtenues avec le logiciel OxCal 4.4 et la courbe de calibration Intcal 20. Les axes des ordonnées sont strictement identiques pour tous les groupes de dates.

Comme l'illustre la Figure 51, les probabilités chronologiques de l'unité rubéfiée ne sont pas du tout uniformément réparties. Les datations ont été divisées en deux groupes, en suivant l'hypothèse archéologique que le cours du Vieil Hozain constituait un linéament marquant du paysage, au moment de la formation de l'unité rubéfiée. Les probabilités obtenues montrent une répartition inégale entre les deux secteurs, mais avec dans les deux cas des dates plus anciennes, qui se distinguent relativement d'un groupe plus récent. Cette tendance bipartite montre une certaine logique vis-à-vis des taxons datés. D'un côté, les essences qui pourraient caractériser (mais non strictement) un milieu boisé humide, plutôt fermé et évolué (*Quercus*, *Vitis*), dont les probabilités d'attribution chronologique sont environ situées entre 830 et 1030 cal. AD. De l'autre, les taxons héliophiles, pionniers ou indiquant une dynamique d'évolution secondaire, dont la chronologie, selon une fourchette large, est comprise entre 1030 et 1230-1270 cal. AD. Ainsi, pour les charbons de chêne et de vigne, on peut clairement se poser la question s'il s'agit d'un effet vieux bois. D'ailleurs, ces charbons de chêne correspondraient possiblement à des bois de plus gros diamètres. Néanmoins, même en écartant ces derniers, les autres taxons montrent une répartition sur un pas de temps relativement long. Mais surtout, on observe, centrés autour de 1200 cal.

AD, sur un intervalle d'une cinquantaine d'années, des taxons héliophiles et globalement peu longévifs : le bouleau, la clématite et surtout la fabacée. Le fait que ces taxons soient carbonisés suggère que le milieu était déjà ouvert, avant le feu. La possibilité que les assemblages anthracologiques de l'unité rubéfiée proviennent de plusieurs événements paraît donc envisageable. Il est évident que cette observation est contre-intuitive vis-à-vis du très faible nombre de charbons retrouvés.

8. Discussion

8.1. Interprétation structurale des traces rubéfiées

La susceptibilité magnétique, les compositions élémentaires totales, les particularités liées aux formes du fer, mais également la morphologie générale des traces ainsi que d'autres éléments mis en évidence à travers les analyses géoarchéologiques, orientent clairement l'interprétation de ces faits vers l'hypothèse pyrogénique. Ceci n'exclut pas la possibilité d'évolutions post-dépositionnelles en lien avec des phénomènes d'oxydo-réduction, nous y reviendrons. La morphologie originale des traces décrites sur le site de Vaudes « Les Trappes », la rareté du mobilier associé, et leur contexte paléoenvironnemental, ne concordent en aucune manière avec des activités artisanales ou autrement spécialisées. Les résultats orientent la recherche de leur origine du côté d'événements ou de pratiques ayant lieu en contexte naturel, agricole, sylvicole ou pastoral.

L'hypothèse que ces traces de combustion résultent d'empreintes d'arbres ou de souches brûlées, comme cela est souvent proposé dans la littérature archéologique, est réfutée par plusieurs aspects. Tout d'abord, la morphologie même des faits, qui ne possèdent aucune similarité morphologique ni adéquation spatiale avec les 28 chablis qui s'ouvrent dans les niveaux de grève alluviale. Un unique chablis amplement comblé de matériaux rubéfiés a été mis au jour, mais sa stratigraphie montre que ce dépôt est secondaire. Il n'y a aucun indice qui atteste de la présence de bois racinaires carbonisés. De plus, nous avons vu que les charbons sont extrêmement rares, alors même que le volume de terre affecté par la chauffe est important. Non seulement la morphologie des traces identifiées n'est en aucun cas comparable à celle de chablis, mais surtout, on ne voit pas comment des racines brûlées pourraient engendrer des morphologies aussi singulières que celles observées.

Alors, comment interpréter de telles traces ? La comparaison de leurs caractéristiques avec la synthèse réalisée sur les produits potentiels des feux agro-pastoraux (Partie 2) nous oriente clairement vers les pratiques dans lesquelles des volumes de terre importants sont susceptibles d'être concernés, c'est-à-dire les pratiques opérant par des fourneaux.

Du point de vue structurel, l'aspect « en mottes » des traces rubéfiées semble particulièrement diagnostique vis-à-vis de cette hypothèse. En effet, comme nous l'avons vu, ces techniques procèdent par une extraction en mottes ou en plaques du sol, qui constituent les éléments architecturaux des fourneaux. Les observations de terrain, en particulier les coupes, et les observations micro-morphologiques, ne fournissent pas d'indices comme quoi il s'agirait de surfaces chauffées en place. La transition est globalement assez nette et franche avec les sédiments encaissants. Il n'y a pas de gradient dégressif des altérations en profondeur. Au contraire, à l'échelle des mottes rubéfiées, les

modifications sont même assez homogènes. La distinction se ferait plutôt entre ces différentes mottes. D'autre part, les colorations observées indiquent que les conditions de chauffe ont été, en majeure partie, largement oxydantes (rubéfaction). Les teintes noirâtres ne sont, en comparaison, observées que sur des volumes ou des surfaces réduites. Elles traduisent vraisemblablement des conditions de chauffe réductrices, déficitaires en oxygène. Leur présence n'est pas systématique, elles sont notamment localisées à la base ou en périphérie des masses rubéfiées, qu'elles moulent, ou se retrouvent en périphérie, non directement associées à ces dernières. Nous manquons de données analytiques les concernant, mais il apparaît qu'elles sont majoritairement formées de matériaux inorganiques. Dans le cas où elles moulent les masses rubéfiées, elles paraissent matérialiser un unique ensemble stratigraphique, ou autrement dit, que les mêmes masses de terre largement rubéfiées ont partiellement carbonisé en leur périphérie. Une telle morphologie pourrait s'expliquer soit par la succession, après une chauffe en conditions oxydantes, de conditions finales déficitaires en oxygène (peut-être lors du refroidissement), soit du fait que ces parties contenaient relativement plus de matières organiques (horizon de surface ?) ou qu'elles étaient en contact avec des matériaux organiques, a fortiori le combustible (Fechner et al., 2002 ; Pernot et Frerebeau, 2018 ; Picon, 2002 ; Velde et Druc, 1999). Les analyses micromorphologiques ne nous fournissent cependant pas d'indices comme quoi il pourrait s'agir d'un horizon plus organique (la texture et la structure de l'unité noirâtre sont indifférenciées de celles de l'unité rubéfiée). De plus, en certains endroits, les traces observées s'étalent sur des superficies assez considérables, et ne montrent aucune organisation cohérente, hormis la localisation de certaines zones qui semblent plus fortement concentrées, et dont la fouille indique une rubéfaction légèrement plus indurée.

Toutes ces observations retranscrivent l'image de produits chauffés non en pleine terre, mais dans une configuration en élévation, subséquentement effondrée, qui sont donc retrouvés en position secondaire. La répétition des traces sur une importante surface et l'absence d'organisation évidente évoquent un nombre non négligeable de structures de chauffe. De plus, il nous semble que les différences de structuration observées pourraient s'expliquer par le fait qu'elles correspondent tantôt, à la base des fourneaux (morphologie concentrée, de faible extension, avec un fond légèrement plus induré) tantôt aux produits démantelés, épandus et plus ou moins fortement remaniés (traces diffuses, moins denses, en mottes). L'interprétation en tant que résidus de fourneaux nous paraît de loin la plus cohérente.

D'autre part, les dimensions des mottes, tel qu'elles sont perçues, de plus que l'extrême rareté des charbons de bois, ne favorisent clairement pas l'hypothèse qu'elles soient liées à un milieu boisé, bien que nous ne disposions là d'aucune référence solide pour l'assurer (quid des différences de taphonomie entre terre brûlée et végétaux carbonisés ?). Néanmoins, ceci nous amène à privilégier l'hypothèse que la pratique mise en évidence se rapproche plutôt des techniques du type écobuages des croûtes terreuses, que des fournelages appliqués, soit, à une véritable prairie (extraction en plaques plutôt qu'en mottes ; faible épaisseur de matériaux terreux), soit, à un taillis ou une autre forme de boisement (rares charbons). Un contre argument peut tout de même être apporté, celui que certains charbons pourraient indiquer, à travers les résultats des datations radiocarbone, l'existence d'un milieu boisé ancien. L'interprétation que nous retenons est donc celle de traces d'écobuages, dont les modalités plus précises de mise en œuvre (par rapport à la classification que nous proposons) restent encore largement hypothétiques. Il s'agit donc vraisemblablement bien d'une entreprise agricole. La mise en évidence de

traces aratoires, bien que très diffuses et difficilement perceptibles, permet d'asseoir cette interprétation. Celles-ci correspondraient, *a minima*, aux labours d'enfouissement des semences. L'absence d'indice de labour en profondeur (du moins plus profond que l'écobuage) est cohérente avec cette proposition (travaux superficiels), et parallèlement, au fait que leur identification archéologique soit spatialement limitée à quelques endroits favorables.

Compte tenu de ces résultats, nous pouvons proposer que les quelques morphologies rubéfiées que nous décrivons en plan comme étoilées résultent simplement du passage répété d'instruments aratoires (certainement un araire), selon différentes orientations. Ce faciès, qui pourrait évoquer un négatif de souche calcinée, découle d'une association d'idées totalement abstraite, et n'est pas recevable.

8.2. Quelques remarques à propos des spécificités du processus de chauffe et de la taphonomie

Les analyses minéralogiques et les cuissons expérimentales nous ont permis de proposer une gamme de températures de chauffe, pour les sédiments rubéfiés, compris entre 300 et 450°C. Celles-ci sont relativement basses, en comparaison des températures que l'on peut attendre en association avec des structures du type fours spécialisés (Berna et al., 2007 ; Pernot et Frerebeau, 2018). Par contre, elles concordent avec les quelques données de la littérature dont on dispose sur les techniques d'écobuage, quoiqu'elles se placent plutôt dans la gamme inférieure. Malgré cela, l'épaisseur (ou le volume) de terre affectée est importante, et à l'échelle d'une même motte, d'après leurs textures et leur couleur, il apparaît que ces modifications sont assez homogènes (il aurait donc été pertinent de travailler sur des micro-prélèvements ciblés). Ces observations suggèrent fortement que la combustion a été relativement longue dans le temps et diffusante, pour cuire à cœur ces masses de terre. Ce processus aurait pu se dérouler durant plusieurs heures, mais seules de nouvelles expérimentations (en conditions « réelles » ou de laboratoire) sur blocs de terre non perturbés permettraient d'en discuter.

En tout cas, il apparaît que les colorations vives observées ne résultent pas d'une cuisson de très forte intensité, comme cela avait été proposé initialement. Comment expliquer les teintes rouges observées ? La rubéfaction est un caractère qui est normalement principalement dirigé par la teneur en hématite du sol (Torrent et al., 1983 ; Jouaffre et al., 1991 ; Schwertmann, 1993). Sa capacité colorante est très importante, ce qui fait que même dans des proportions très faibles (< 1 %), elle peut entraîner l'expression d'une nette coloration rouge (ibid.). L'hématite n'a pas été identifiée en DRX, mais les analyses colorimétriques permettent de suspecter fortement sa présence, très ténue. Les résultats des extractions du fer montrent que l'unité rubéfiée ne possède pas plus de cristaux de fer bien développés que ses encaissants. Elle s'en distingue clairement, seulement par une plus forte abondance de fer amorphe ou mal cristallisé. Nous en concluons que la rubéfaction doit s'exprimer à travers la présence des particules d'hématite de dimensions trop réduites ou dont la cristallinité n'est pas bien définie, empêchant de la mettre en évidence avec les méthodes analytiques employées. Ces particules ont pu se développer à partir du fer libéré des phyllosilicates détruits par la chauffe, mais certainement aussi à partir de la goethite identifiée dans l'unité S2T (Bresson, 1974 ; Jouaffre et al., 1991).

D'autre part, nous avons vu à travers nos expérimentations que les colorations obtenues sur des sédiments chauffés en laboratoire différaient légèrement des teintes mesurées dans les échantillons rubéfiés. Maintenant que le postulat est fait qu'il n'y a que peu ou pas d'hématite bien cristallisée, qui est thermodynamiquement un oxyde extrêmement stable, on peut se demander si les « dérives » des couleurs de l'unité rubéfiée en direction des teintes jaunes ne pourraient pas s'expliquer par une évolution post-dépositionnelle (Cornell et Schwertmann, 2003). Les particules de « protohématite » formées auraient été dissoutes et commenceraient à se cristalliser en goethite. Un effort analytique important serait à faire pour le vérifier et comprendre ces différents mécanismes. Nous ne pouvons pas pour le moment définitivement exclure que cela s'explique par des différences de modalités entre expérimentations et conditions réelles de cuisson (problème soulevé avec la susceptibilité magnétique).

Ajoutons un mot concernant un résultat qui reste tout de même assez singulier, celui des taux plutôt importants de manganèse dans l'unité noirâtre (mais qui vraisemblablement sont aussi irréguliers). Ce point pose question, car il pourrait suggérer que cette concentration s'explique par des processus pédologiques. Le manganèse précipitant souvent conjointement avec des oxydes de fer, sous la forme de concrétions noirâtres, à la suite d'alternances marquées et récurrentes de périodes d'assèchement /engorgement (Baize et Jabiol, 1995 ; Guillet et Souchier, 1979). Présentement, nous n'expliquons pas comment, du point de vue pédologique, cet enrichissement pourrait être expliqué. Les taux de Mn de l'unité rubéfiée et celle sous-jacente sont assez proches, ce qui ne semble pas indiquer un appauvrissement de ces derniers. Les données granulométriques n'indiquent rien de tel non plus, mais nous n'avons malheureusement pas de données sur ce faciès noirâtre. De plus, nous n'observons ni des volumes décolorés ni des traits pédologiques qui traduiraient des redistributions de particules ou d'oxyhydroxydes à fort pouvoir colorant (Fe ou Mn). Cependant, il est documenté que le manganèse, suite à une forte élévation de pH et en milieu aéré, peut être « brutalement » oxydé, formes sous lesquelles il devient insoluble et très stable, tempérant les phénomènes dits de « dégradation morphologique » (Guillet et Souchier, 1979 ; Montagne, Cousin et Cornu, 2013). Cela se produit tout spécialement en cas de chaulage. La combustion, provoquant une augmentation soudaine et forte du pH, par la production de cendres, devrait théoriquement produire des effets tout à fait comparables. L'enregistrement d'une baisse marquée de la fraction de Mn dite facilement réductible suite à un écobuage irait dans ce sens (mais le Mn total n'est pas connu ; Nzila, 1992). Un tel phénomène s'opposerait à une redistribution post-combustion de Mn. Par contre si l'on considère que le faciès noirâtre caractérise une cuisson réductrice, et que les cendres de certains végétaux peuvent être particulièrement riches en manganèse, alors une accumulation ponctuelle de manganèse pourrait être expliquée (Parra, Rivero et Lopez, 1996 ; Smet, 1966 ; Bodí et al., 2014). Nous privilégions cette hypothèse, mais il est évident qu'à ce stade de caractérisation, nous manquons de données de comparaison.

Ainsi, les vestiges d'écobuage identifiés à Vaudes, mis à part des remaniements mécaniques superficiels sous contrainte de travaux aratoires, sont vraisemblablement peu affectés par des altérations post-dépositionnelles. Cela semblerait cohérent avec leur enfouissement relativement rapide, aux échelles de temps des dynamiques pédo-sédimentaires.

8.3. Séquence évènementielle autour de l'écobuage : un évènement isolé ?

Les analyses géoarchéologiques permettent de donner une interprétation cohérente vis-à-vis des phénomènes très singuliers identifiés. D'un point de vue archéologique et stratigraphique, les données suggèrent fortement que l'on se trouve face à un évènement unique, ponctuel, du moins à l'échelle de la zone d'étude, comme nous l'avons initialement proposé (Guiblais-Starck et al., 2020). Les arguments employés envers cette hypothèse sont que ces traces se situent dans un même niveau stratigraphique, que les unités supérieures ne présentent pas en micromorphologie d'indices clairs de travail du sol, et surtout, qu'au cours de la fouille aucune trace de recoupement ou indices de répétition du phénomène n'a pu être identifiée.

L'identification des traces aratoires nous amène clairement à revoir notre postulat. Non seulement celles-ci sont en certains points multiples (notamment les faciès étoilés), quoique très éparses, mais leur morphologie évoque aussi la possibilité qu'elles correspondent à différents outils (certains faits que nous n'avons pas évoqués, car ils nous semblent trop incertains, nous questionnent sur le fait qu'il y ait aussi des traces d'outils manuels). En microscopie, il apparaît clairement que certains de ces faits ont subi un brassage assez notable, certainement suite à des opérations répétées. Ces observations ouvrent la possibilité à ce que plusieurs opérations culturales se soient succédé, mais qu'elles aient été trop superficielles pour être préservées en profondeur, c'est-à-dire à la base des traces rubéfiées. Ainsi, pour ces structures qui pour l'instant n'ont jamais été étudiées, et pour lesquelles nous ne disposons pas de comparaison, la possibilité même de la reconnaissance des activités postérieures et antérieures peut être questionnée. Si l'on considère seulement les modalités techniques de l'écobuage, on comprend qu'elles impliquent de telles modifications sur la partie supérieure du sol, que les éventuelles traces d'interventions précédentes auraient très probablement totalement disparu.

Aussi, nous avons dit qu'il a été proposé que le cours du Vieil Hozain était actif lors de cette exploitation agricole. Néanmoins, cela n'est pas assuré avant les XIII-XIV^{ème} siècles. De plus, les traces aratoires jouxtant perpendiculairement le chenal, elles, ne nous semblent aucunement compatibles avec la présence d'un cours d'eau, à cet endroit précis. Selon ces éléments, on peut interpréter le chenal comme un aménagement postérieur qui a priori, n'est pas forcément lié à l'activité d'écobuage, même s'il intervient possiblement peu de temps après. L'origine de ce chenal n'est pas définie, mais son cours pourrait être en partie anthropique, et lié à des entreprises d'aménagement et d'exploitation de ces espaces, de plus grande ampleur, ou avec une volonté de planification à plus long terme (à relier au développement des moulins ?). Aucun élément probant ne nous permet de postuler qu'il en était de même pour l'écobuage, mais il est possible que l'ouverture et les modifications du milieu (mises en place de prairies ?) aient subséquemment pu jouer un rôle sur ces entreprises.

Il est un autre point qui est également assez contradictoire avec l'hypothèse d'un évènement unique, c'est celui des résultats radiocarbone et des taxons botaniques identifiés. Il est évident que les probabilités radiocarbone doivent être prises avec précautions dans l'attribution chronologique, car d'une part, elles ne datent pas l'évènement en lui-même (Schiffer, 1986 ; Carcaillet et Talon, 1996), et d'autre part, les incertitudes obtenues ici sont larges, même pour les probabilités les mieux bornées. Elles ne permettent donc pas d'assurer que ces charbons résultent d'un seul évènement. Mais surtout, cela est mis en doute par la présence conjointe, dans l'unité rubéfiée (considérée dans son ensemble),

de taxons qui évoquent des milieux assez différents, en termes de succession végétale. Les stigmates associés à l'émondage indiqueraient aussi la possibilité d'un milieu déjà exploité ou aménagé (si les bois proviennent effectivement de ce secteur, ce que l'on peut fortement présumer, mais pas démontrer). Enfin, les taxons héliophiles, avec le bouleau et en particulier la fabacée, dont les dates sont les plus récentes, indiquent des feux associés à un milieu déjà préalablement ouvert. De même, la présence d'un grain de céréale carbonisé (et un autre dans l'unité sous-jacente) n'est pas complètement anecdotique, puisque comme nous l'avons vu, l'écobuage est une méthode de préparation du champ, il n'y a donc a priori pas de raison que des organes de plantes cultivées puissent être carbonisés.

D'autre part, la malacologie permet de restituer un milieu antérieur à dominante palustre, fortement marqué par l'eau, qu'il s'agisse de nappes quasi permanentes ou saisonnières, et au moins en partie boisé. Les caractéristiques pédo-sédimentaires générales vont dans ce sens, et les nombreux chablis suggèrent l'existence d'un milieu boisé peu anthropisé, avec une microtopographie assez irrégulière. L'écobuage intervient-il directement, en tant qu'étape initiale d'exploitation de ce milieu ? Le fait que les traces rubéfiées ne soient pas abondantes dans les comblements de chablis ne va pas vraiment dans ce sens. Si elles semblent mieux préservées à la faveur de certaines anomalies micro-topographiques, les traces rubéfiées sont tout de même retrouvées sur une surface globalement plane et homogène. Les assemblages malacologiques reliés aux nappes rubéfiées, qui sont de peu postérieurs ou contemporain, indiquent un milieu nettement plus ouvert, prairial, mais toujours marqué par l'humidité, quoique de façon moins permanente. Comment passe-t-on de ce milieu boisé à ce milieu ouvert, et surtout dans quel intervalle temporel ? L'écobuage seul ne peut vraisemblablement pas l'expliquer. Bien que nous ayons vu qu'il peut être pratiqué en milieu boisé (essartage à couvert), les données disponibles ne nous livrent pas d'arguments envers cette hypothèse.

Tous ces résultats mis bout à bout suggèrent que l'écobuage identifié s'articulait certainement avec d'autres activités agro-sylvo-pastorales, que nous ne sommes pas en mesure de restituer. Sur cet espace précis, le « recul » du milieu forestier s'est certainement opéré progressivement, sans bouleversement drastique de l'écosystème. Certes le milieu qui en résulte est plus ouvert, et même localement asséché, mais les contraintes hydrologiques restent vraisemblablement assez conséquentes. D'autre part, la chronologie nous indique que l'on se situe en plein de l'optimum climatique médiéval, marqué en Europe, par un climat plus sec et plus chaud (Magny, 1993 ; Büntgen et Tegel, 2011 ; Catteddu, 2009, p. 66-67). Il est fort probable que les « écobueurs » ont su habilement profiter de la réduction, aux moins saisonnière et ponctuelle, de l'humidité, conditions indispensables à la réussite de l'opération.

Nous nous trouvons en fait, face à un problème classique et intrinsèque aux archives pédo-sédimentaires que nous étudions, à savoir que l'enregistrement est, en termes de chronologie et de rythmicité, irrégulier et discontinu (Brochier, 1991a ; Campy, Macaire et Grosbois, 2013). En conséquence, la résolution des données environnementales est, elle aussi, valable seulement à une échelle de temps assez large. Les traces d'écobuage apparaissent comme un événement marquant, car elles possèdent une visibilité matérielle très forte. Néanmoins, nous pensons qu'elles dissimulent d'autres activités, antérieures comme postérieures (exploitation du bois, remises en culture, feux de surfaces, etc.) qui possiblement s'étalent sur plusieurs décennies. Néanmoins, la bonne préservation de ces traces, au moins en certains secteurs, indiquerait tout de même qu'il prend plutôt place dans les derniers temps de l'exploitation de la zone. L'abandon n'étant certainement que subi, en conséquence

des dégradations climatiques et de la reprise d'une activité hydrologique plus forte, qui entraîne la troncature partielle et la fossilisation de ces traces. À l'échelle des temps historiques, il n'en reste pas moins que l'exploitation de la zone a été certainement très courte.

8.4. Place de l'écobuage dans son contexte archéologique

Dans quel contexte archéologique s'inscrivent ces découvertes ? La période du haut Moyen Âge est documentée localement par plusieurs découvertes. Il s'agit de nécropoles et d'indices d'habitat, tous situés entre l'actuel bourg de Vaudes et de Saint-Parres-lès-Vaudes, à environ deux à trois kilomètres au Nord-Est de l'emprise de fouille. Par contre, pour les premiers siècles du second millénaire, aucune occupation archéologique ni aucun habitat ne sont renseignés. Notre incapacité à pouvoir relier les événements de feu identifiés à une quelconque occupation, qui resterait d'ailleurs hautement hypothétique, ne fait que renforcer l'intérêt des traces d'écobuages.

À l'échelle micro-régionale, il est en effet certain que le secteur est loin d'être dépeuplé. Le domaine de Rumilly-lès-Vaudes (motte castrale à moins de cinq kilomètres en amont) est mentionné dans les archives historiques dès le tout début du XII^{ème} s. (Daunay, 2003). Ce domaine, qui appartient au comte de Champagne, Hugues, est offert aux moines de Molesmes à cette date. La ville de Troyes, qui est située à une dizaine de kilomètres du site d'étude, connaît, à partir du XI^{ème} s. une « période d'expansion démographique et de prospérité économique » (Kasprzyk et Roms, 2023). Les découvertes archéologiques documentent que les terres et prairies humides en périphérie de la ville, sont drainées afin d'étendre les occupations domestiques.

Cependant, les données paléo-environnementales nous confirment que l'on se situe ici dans un environnement « marginal », relativement ingrat et *a priori* assez contraignant d'un point de vue agricole, en particulier du fait de son humidité. Est-ce que les vestiges d'écobuages de Vaudes illustrent indirectement une recherche de terres nouvelles, une volonté d'étendre le territoire d'exploitation, ou au contraire, illustrent l'existence de communautés paysannes dont le système d'exploitation est principalement basé sur des systèmes cultureux temporaires, et où le feu occupait une place majeure ? La question reste pleinement ouverte (Devroey, 2003, p. 82-83 ; Viader, 2014). En tout cas, il fait peu de doute que cet écobuage ne constitue qu'une illustration des entreprises d'exploitation agro-pastorales qui ont dû être menées à cette période, dans ce secteur marécageux.

Partie 5 :

**Des « anomalies » pédo-sédimentaires médiévales
et néolithiques en bordure du lac de Chalain (Jura)**

1. Préambule

Classés au patrimoine mondial de l'UNESCO, les lacs de Chalain et de Clairvaux et leurs sites d'habitats palafittiques constituent des archives archéologiques pour la compréhension des sociétés néolithiques, dont la renommée n'est plus à faire (Pétrequin et Pétrequin, 2021). Il a été proposé que les occupations des abords de ces deux lacs au Néolithique auraient été rythmées par les modalités d'exploitation agricole des terroirs environnants. Les cycles d'occupation et d'abandon de courtes durées résulteraient des déplacements des populations, qui pratiqueraient une agriculture itinérante sur brûlis (Pétrequin et Pétrequin, 1997, 2021 ; Pétrequin, Pétrequin et Schaal, 2016). Il a aussi été proposé que l'accroissement du nombre de villages, qui traduirait une augmentation démographique remarquable aux environs du III^{ème} millénaire BC, aurait été accompagné d'une modification marquante des systèmes agricoles, à travers le développement d'une agriculture permanente et d'une économie à dominante céréalière (Arbogast, Magny et Pétrequin, 1996 ; Pétrequin et Pétrequin, 2021). La mention de foyers d'essartages et d'autres traces de feu reliées à des déboisements anthropiques, attribuées à diverses périodes, dans les séquences pédo-sédimentaires bordant ces lacs, a logiquement suscité notre intérêt. De nouvelles opérations géo-archéologiques ont été initiées en 2021, autour du lac de Chalain, avec comme objectif principal la recherche et l'étude de ces foyers d'essartages (responsables d'opération Christophe Petit et Hervé Richard⁶⁶). Ces travaux se poursuivent depuis 2022, dans un cadre de recherche plus large, au sein d'un Projet Collectif de Recherche : « *Agriculture et élevage autour des lacs jurassiens depuis le Néolithique : l'apport des données paléoenvironnementales et archéopédologiques* » (coordination Christophe Petit et Hervé Richard).

Dans ce cas d'étude, nous présentons les résultats de l'analyse de traces décrites comme des « anomalies » pédosédimentaires, terme d'attente pour essayer de ne pas présumer de leur nature, et surtout pour illustrer les avantages et les limites de chaque méthode d'étude choisie. L'accent a été mis sur l'analyse fine d'une seule anomalie, à l'échelle d'un profil pédologique, afin de comprendre au mieux les processus précis de sa formation. L'analyse a porté sur un phénomène daté de la période médiévale, et considéré a priori comme relativement bien préservé, du fait de son épaisseur. Ceci permettra pour la suite de cibler parmi les approches les plus pertinentes et de disposer d'une base de comparaison, pour la détection d'anomalies plus discrètes. Dans un second temps, les résultats inédits obtenus sur d'autres traces similaires, contemporaines et plus anciennes, seront brièvement évoqués, afin d'apporter des arguments complémentaires pertinents pour leur interprétation.

⁶⁶ UMR 6249 Chrono-environnement.

2. Contexte général : le lac de Chalain

2.1. Formation du lac et dynamiques hydrologiques

Le lac de Chalain⁶⁷ est un lac de retrait glaciaire typique de cette région du Jura. C'est le second lac naturel le plus étendu de Franche-Comté, avec une largeur moyenne d'environ un kilomètre et une longueur d'un peu moins de trois kilomètres, il possède une surface actuelle d'environ 230 ha. Il est situé dans une large vallée, la Combe d'Ain, à une altitude de 450-525 m environ (Figure 52 et Figure 53). Cette vallée est bordée par deux plateaux calcaires et marneux du Jurassique. À l'ouest se situe le plateau de Lons-le-Saunier (plateau lédonien) à 550-600 m d'altitude, qui est nettement délimité par la côte de l'Heute qui culmine vers 700-750 m. À l'est, le plateau de Champagnole se développe avec un relief ondulant, vers 600-650 m. Lors du Dernier Maximum Glaciaire (Würm), la Combe d'Ain était alors un vaste lac, alimenté par le glacier jurassien (extension maximum il y a environ 24 000 ans ; Campy, 1982). Suite au retrait de la calotte glaciaire, la dépression creusée par la langue de Doucier à travers le plateau supérieur de Champagnole – dont le fond est imperméabilisé par les dépôts glaciaires, et le débouché vers l'ouest est obturé par une moraine frontale⁶⁸ – va conduire à la formation du lac de Chalain. Il présente de par cette situation géologique, une morphologie nettement dissymétrique, avec : une moitié orientale nettement encaissée par le massif calcaire oxfordien, et une moitié occidentale qui s'ouvre avec un relief assez doux sur la combe d'Ain.

Le lac de Chalain possède un bassin versant d'une surface estimée à une trentaine de kilomètres carrés (Caille, 2018). Il correspond pour la majeure partie à une collecte du réseau karstique du plateau de Champagnole. Une partie de cette alimentation provient des excédents des lacs de Narlay et du Vernois, situés à plusieurs kilomètres en amont. Le lac possède de ce fait un régime hydrologique caractérisé comme torrentiel. D'une part, il existe un écart important entre les débits saisonniers (hautes eaux hivernales et étiages estivaux) et d'autre part, les épisodes de crues se manifestent assez brutalement à la suite des pics de précipitations (Magny, 1991). Les écoulements depuis les exurgences du plateau s'organisent en plusieurs ruisseaux traversant le fond de la reculée, qui forme une large plateforme émergée (delta alluvial grossier certainement contemporain du retrait glaciaire), aujourd'hui fortement artificialisée. Enfin, d'autres affluents très mineurs alimentent le lac, depuis sa bordure sud et ouest. L'exutoire naturel du lac, le Bief de l'Œuf, qui s'amorce au nord-ouest pour rejoindre le cours de l'Ain, n'est de nos jours actif que lors de crues très importantes. Effectivement, entre 1903 et 1906, des travaux en vue de l'implantation d'une usine hydroélectrique ont remplacé cet émissaire naturel par un canal souterrain (aménagement dit de « la Prise d'eau »). Cet événement marque un tournant important dans l'histoire récente du lac, puisque la régulation de la hauteur d'eau devient alors complètement artificielle. Mais surtout, cet événement va entraîner l'exondation des vestiges d'occupations préhistoriques (voir ci-dessous).

⁶⁷ Ou anciennement Lac de Marigny.

⁶⁸ Roches détritiques d'origine glaciaire formant une accumulation au front du glacier ou sous le glacier (moraines de fond), dans le cas présent, exclusivement formées de matériaux calcaires d'origine jurassienne (Campy, 1985 ; Buoncristiani et Campy, 2011).

ELEMENTS MORPHOLOGIQUES

M : Butte morainique
S1: "Terrasse" supérieure 525-528 m
S2: "Terrasse" inférieure 499-505 m
S3a-S3b : Terrasses lacustres de fond de reculée

ELEMENTS LITHOLOGIQUES

G : Argile à blocs à niveau varvés déformés
Vb : "Varves" à blocs V : "Varves"
N : Dépôts hétérométriques de progradation
A₀ : Argiles organiques et craies lacustres

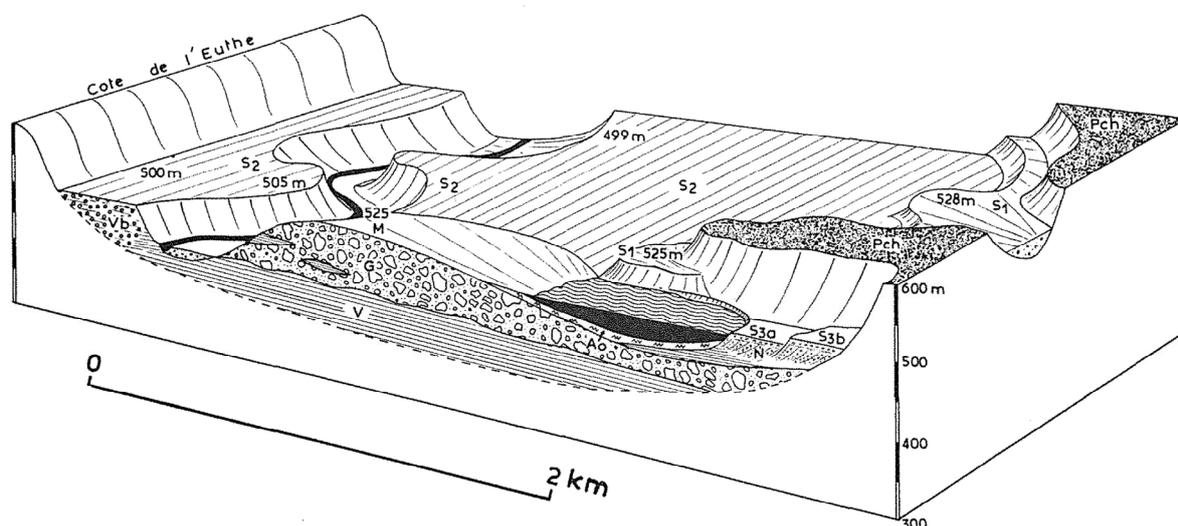


Figure 52 : Transect et morphologie des principales unités lithologiques de la Combe d'Ain au niveau du lac de Chalain (d'après Campy, 1982)

2.2. Le patrimoine archéologique

Les travaux de la Prise d'eau ont nécessité une baisse brutale du niveau du lac de plusieurs mètres (entre six et douze selon les auteurs), entraînant des effondrements massifs de la beine crayeuse (Pétrequin et al., 2000 ; Roulière-Lambert, 1985). Cette perturbation aura pour conséquence – outre le remodelage, la destruction totale d'une partie des rives – l'émergence des vestiges néolithiques et protohistoriques qui feront la renommée du lac. Ceux-ci se présentent alors sous la forme de champs de pieux émergeant par milliers de la beine crayeuse, ou en stratigraphies archéologiques dégagées sur les fronts des écroulements. Les sites seront alors l'objet de ramassages désordonnés de grande ampleur, principalement pour la collection et le commerce du mobilier archéologique, exceptionnellement préservé grâce à leur enfouissement en conditions anaérobiques. Le prolongement de la baisse du niveau lacustre aura somme toute des conséquences fatales pour le devenir de la « cité lacustre de Chalain » : les archéologues estiment que 30 ha de sites d'occupations sur un total « antérieur » de 42 ha ont été détruits et engloutis entre 1904 et 1909 (Pétrequin et al., 2000, p. 24-25). À partir de 1986 et jusqu'en 2002, un programme de recherche, dirigé par Pierre Pétrequin et al. (2000), a permis un inventaire exhaustif par prospections et sondages mais surtout la fouille de plusieurs de ces sites palafittiques. En 1911, une partie d'entre eux, puis en 1992, toute la zone archéologique a été inscrite au titre des Monuments Historiques (« Villages palafittes du lac de Chalain »). Depuis 2011, le « Lac de Chalain, rive occidentale » fait partie des 111 biens classés au Patrimoine mondial de l'UNESCO intitulé « Sites palafittiques préhistoriques autour des Alpes » (<https://whc.unesco.org/fr/list/1363/>)

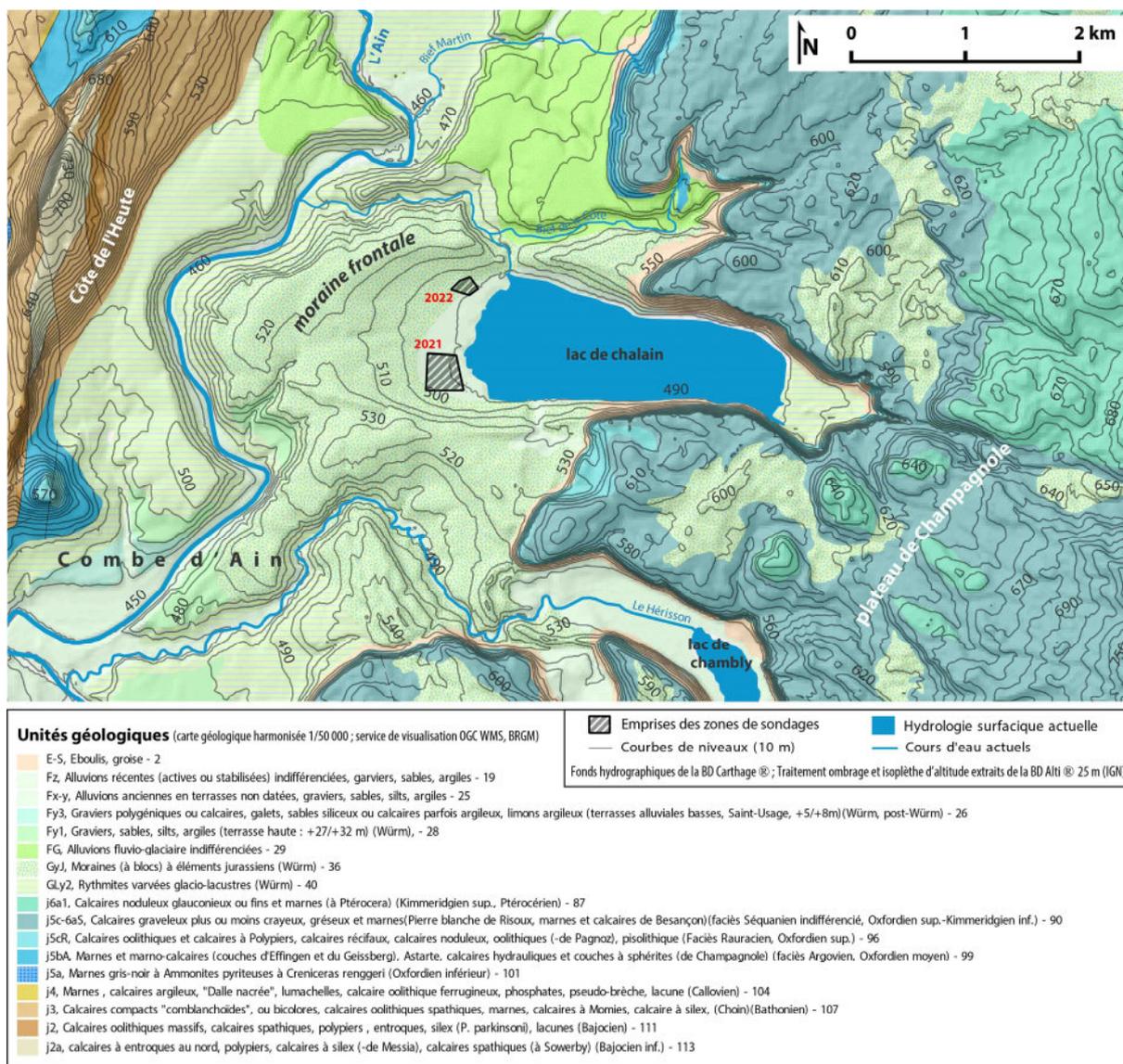


Figure 53 : Carte géologique du secteur du lac de Chalain.

Les sites bordant le lac de Chalain s'étalent sur une longue durée, mais non de manière continue et régulière (Pétrequin, 1997 ; Pétrequin et al., 2000). Ils correspondent à des villages au nombre variable d'habitats, qui sont souvent de véritables palafittes (constructions sur pilotis). Bien qu'aucun site du Néolithique ancien ne soit documenté sur le littoral, des indices palynologiques chronologiquement bien calés, obtenus sur un niveau organique préservé dans les craies à relativement grande profondeur attestent très probablement d'une première phase d'anthropisation sur la forêt environnante autour de 5400 cal. BC (Pétrequin et al., 2009 ; Richard, 1997). Les occupations documentées pour le Néolithique s'étalent entre 3800 et 2400 cal. BC environ, avec quelques hiatus d'occupation qui semblent correspondre à des périodes de dégradation climatique. Le Néolithique final, à partir de 3300-3200 cal. BC, est la période la mieux représentée, avec un grand nombre d'occupations, possible reflet d'un accroissement démographique. À cette période, le secteur de la combe d'Ain semble connaître les influences de divers groupes culturels, d'un côté des cultures méridionales (culture de Ferrières) et de l'autre des lacs alpins (culture du Horgen). Des groupes possédant des cultures matérielles originales

apparaissent : vers 3100 cal. BC le groupe de Clairvaux, et vers 2800 cal. BC le groupe de Chalain. La fin du Néolithique récent/final, vers 2500 cal. BC, marque l'arrêt des occupations lacustres, jusqu'à l'âge du Bronze.

D'autre part, il convient de rappeler que les fluctuations du niveau lacustre ont joué un rôle essentiel dans la fossilisation des sites archéologiques littoraux, et ont conjointement permis d'étudier les relations entre ces variations naturelles et les rythmes d'occupations humaines (Magny, 1995, 1997, 2007, 2014 ; Pétrequin, Magny et Bailly, 2005 ; Arbogast, Magny et Pétrequin, 1996). De façon générale, il semble que les périodes d'occupations soient corrélées aux périodes de bas niveau lacustre, qui correspondent aussi à des phases d'amélioration climatique. Néanmoins, dans le détail, les travaux démontrent que cette histoire est complexe, et qu'il ne semble pas y avoir de corrélation systématique entre les occupations littorales et les variations du niveau lacustre (ibid.).

2.3. Chronologie générale des dynamiques pédo-sédimentaires péri-lacustres

En 2000, une opération d'évaluation globale du patrimoine archéologique de la rive occidentale de Chalain a été réalisée sous la direction de P. Pétrequin (2000). Dans ce cadre, un important travail de prospection à la tarière a été mené, avec pour objectif, la documentation des zones archéologiques sensibles, ainsi que la caractérisation des grands ensembles sédimentaires des secteurs périphériques au lac. Nous reprenons ici les résultats de la synthèse générale de ces travaux. La Figure 54 présente les résultats des carottages du transect Est-Ouest traversant la cuvette morainique en son centre, pour lequel des datations absolues hors-sites archéologiques étaient disponibles, que nous avons repris d'après les données brutes des inventaires de Chalain 2000. Nous avons recalé les logs stratigraphiques – dont les altitudes ont été approximées par rapport à la hauteur du lac – d'après les données de la topographie actuelle (le RGE ALTI® 5 m afin de réduire l'effet des anomalies micro-topographiques)

Suite au retrait de la langue du glacier, au cours du tardiglaciaire, la cuvette de Chalain va enregistrer des dépôts de nature variée, mais globalement dominés par des phénomènes détritiques, relatifs aux différentes conditions climatiques et paléo-environnementales de cette période (voir Pétrequin et al., 2000, p. 70-75). Les premières précipitations biochimiques carbonatées enregistrées dans la cuvette sont reliées au réchauffement climatique du Bölling-Alleröd. Cet épisode s'intercale entre des dépôts d'argiles bleutés, contemporains des périodes froides du Dryas ancien et récent.

Avec le réchauffement climatique Holocène, les processus de formation des craies s'accroissent, conjointement au développement des plantes aquatiques et des algues (Magny, 1992, 2007). Ces phénomènes amorcent l'apparition d'une beine lacustre, c'est-à-dire une plateforme littorale immergée à faible profondeur (ibid.). Ces craies présentent des intercalations organiques qui correspondent à des cordons de flottage et marquent ponctuellement l'avancement de la rive. Des tourbes – génériquement enregistrées sous le terme « anmoor » – sont identifiées sur une étendue assez vaste de la rive occidentale, qui est aujourd'hui entièrement émergée. Leur répartition spatiale est hétérogène, puisqu'elles sont principalement reconnues – outre sur une bande d'une centaine de mètres bordant la rive – dans la moitié sud, où elles atteignent une épaisseur de plus d'un mètre, à environ 200-250 m du rivage actuel. La chronologie de leur développement n'est toutefois pas bien définie. Une datation

absolue a donné pour résultat la période de l'Atlantique ancien : 5370-5070 cal. BC⁶⁹. Ces tourbes se raccordent stratigraphiquement en direction du rivage, aux dépôts organiques mis en place en condition subaquatique plus ou moins marquée (« gyttja »). Ces derniers dépôts sont toutefois nettement postérieurs, puisqu'ils coiffent des formations crayeuses qui elles-mêmes recouvrent certains sites préhistoriques (Figure 54, sondage 28/10). Il faut considérer que ces formations organiques postérieures aux craies sont spatialement asynchrones, puisqu'elles marquent l'atterrissement centripète progressif des bords du lac (Magny, 1992). Elles constituent la tourbière basse littorale à proprement parler. D'autre part, l'extension des tourbes en direction de la moraine n'est pas complètement définie. Et, leur morphologie suggère l'existence, au moins au début de l'Holocène, d'une petite cuvette secondaire vers la moraine terminale, comme cela est observé dans d'autres lacs du Jura (Magny, 1992).

Durant la seconde moitié de l'Holocène, les processus détritiques à dominante minérale deviennent prépondérants. Dans les secteurs proximaux de la moraine frontale, et plus particulièrement dans la partie centrale de la cuvette morainique, des colluvions fines sont enregistrées, dont l'épaisseur peut atteindre au moins 1,40 m. Elles sont souvent accompagnées de concrétions de fer, et parfois de lits ou de concentrations de charbons bois et de terre cuite (voir partie suivante). Ces colluvions sont interprétées comme résultant d'une érosion agricole accrue, en relation avec l'accroissement démographique de l'Âge du Bronze final. Localement, ces apports débuteraient aux environs du troisième millénaire BC, phénomène interprété conjointement à l'accroissement du nombre de villages lacustres (Pétrequin, 1992 ; Pétrequin, Crousch et Pétrequin, 1996). Le colluvionnement semble se poursuivre jusqu'au Moyen Âge. Ce stockage important de matériaux érodés en contrebas de la moraine aurait enfin permis l'extension des cultures à ces terrains humides, à la fin de la période médiévale (Pétrequin et al., 2000).

⁶⁹ 6277 ± 53 ; T14152A ; CH28/14

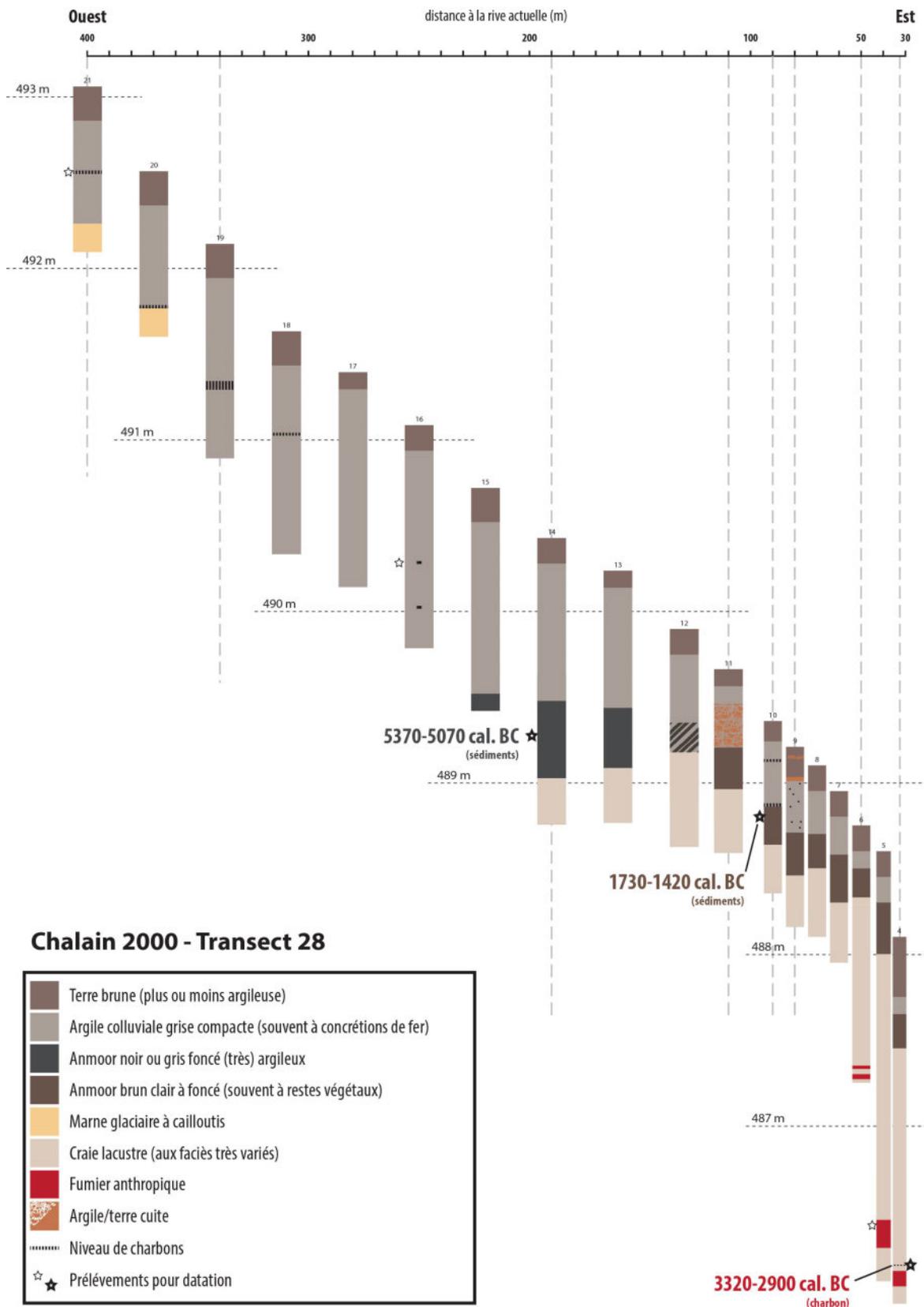


Figure 54 : Transect stratigraphique simplifié de la rive occidentale de Chalain (dessin d'après les inventaires de Pétrequin et al., 2000).

Noter que les nombreux faciès de craies lacustres ne sont pas détaillés.

La côte précise du lac lors du relevé n'est pas connue, elle était vraisemblablement aux environs de 486 m NGF, les logs ont été recalés en altitude à l'aide du MNT du RGE ALTI@ 5 m.

2.4. Un secteur propice à la recherche de vestiges de paléo-feux

Les inventaires descriptifs des carottages réalisés dans le cadre des prospections de Chalain 2000 (Pétrequin et al., 2000), signalent à plusieurs reprises la présence d'indicateurs de feu. Il s'agit de granules, de nodules, ou de boulettes d'argile cuites associées ou non à des charbons, ou autrement de niveaux charbonneux ou charbons isolés. Contrairement aux traces de feux qui correspondent à des niveaux d'incendie (ou de foyers domestiques ?) liés aux occupations littorales, ces indicateurs ne sont pas associés à d'autres indices archéologiques. Ils sont identifiés dans les secteurs en amont des rives actuelles, au sein des différentes unités sédimentaires argileuses renseignées comme colluviales qui couvrent les craies et tourbes ou directement le substrat morainique en bas de versant. La présence de terre cuite est signalée dans 18 sondages. Plusieurs dizaines d'autres mentionnent la présence de charbons de bois. De plus, il est fait mention d'un « foyer de dégazonnage » de deux centimètres d'épaisseur (Figure 54, sondage 28/9), sans plus de précisions. Ce dernier s'inscrit à vingt centimètres de profondeur sous une unité argileuse brune qui montre quelques granules de terre cuite et par-dessus un niveau d'argile colluviale gris foncé compacte de trente centimètres avec quelques minuscules charbons. En outre, il est indiqué de façon récurrente, au sein des mêmes formations colluviales, la présence « d'oxydes de fer », qui dans quelques cas sont associés à des charbons.

À ces mentions, viennent s'ajouter celles de deux opérations d'évaluation archéologique menées en 1995 et 1996 au nord de la rive ouest du lac, au pied de la moraine frontale de Doucier, au lieu-dit Marigny « Les Vernois ». La notice de la première opération indique en particulier : « *Les sédiments qui scellent la totalité de la parcelle sont caractérisés par de nombreux nodules de terre rubéfiée, en relation avec une pratique de culture sur brûlis contemporaine du bas Moyen Âge. Mais des indices de telles pratiques existent dès les premières phases de colonisation de la zone (III^e millénaire av. J.-C.), sous la forme de foyers d'essartage inscrits en stratigraphie* » (Prodéo, Saintot et Pétrequin, 1995). La seconde opération, qui concerne une parcelle juste en amont de la précédente, évoque la présence de charbons de bois attribués à des « *défrichements par le feu* » (Pétrequin, Croutsch et Pétrequin, 1996). Néanmoins, les mêmes auteurs affirment que « *le versant interne du vallum morainique apparaît comme une zone aux sols lourds, argileux et alternativement soumis à une dessiccation totale ou à une longue imprégnation par la nappe phréatique. Les conditions pédologiques étaient donc défavorables à des mises en cultures céréalières ; ces sols étaient plutôt occupés par la forêt riveraine et la forêt à bois tendres, très tôt défrichées pendant le Néolithique* ». Les constatations faisant suite à ces deux opérations adjacentes sont donc peu claires, tant en ce qui concerne l'origine de ces traces (s'agit-il de foyers en place ou de résidus colluvionnés ?), que pour leur interprétation archéologique (déboisement ou défrichement ? À vocation agricole ou non ?). Il reste que le secteur apparaît comme très favorable pour notre problématique, et nous invite à nous pencher plus précisément sur la question.

3. Démarche générale et contexte du secteur d'étude

3.1. Démarche générale

Dans l'objectif d'étudier ces phénomènes, de nouvelles prospections géoarchéologiques ont été entreprises en 2021 et se poursuivent aujourd'hui. En 2021, un premier secteur pour lequel un potentiel d'étude a été jugé propice a été prospecté à l'aide d'une sonde russe. Ces carottages ont, entre autres, permis de reconnaître des traces aux teintes brun-ocres à rougeâtres, plus ou moins diffuses et distinctes du reste des séquences pédo-sédimentaires. Toutefois, en l'absence d'une association claire à d'autres marqueurs de feu, en particulier à celle de végétaux carbonisés, et cela dans un contexte de sols aux caractères morphologiques traduisant des excès en eau, il ne nous a pas semblé au premier abord, indubitable que ces traces résultent d'une combustion. En l'occurrence, l'hypothèse qu'il s'agisse de traits d'oxydation d'origine pédologique restait envisageable, confirmant les indications précédemment mentionnées.

Par conséquent, un emplacement où ces traces étaient particulièrement marquées a été sélectionné pour les étudier de manière approfondie. Un sondage d'un mètre carré a été ouvert jusqu'à profondeur des premiers matériaux lacustres. Les traces que nous décrirons comme « ocrées » et leurs unités directement encaissantes ont fait l'objet d'une fouille minutieuse en plan. Les quatre profils de la fosse ont ensuite été nettoyés et observés, afin de maximiser les informations par rapport à l'ouverture spatiale limitée. Les dessins de ces coupes ont été réalisés à partir des photographies redressées, avec le support des observations de terrain, afin de caractériser le plus finement leur morphologie. Enfin, nous avons réalisé un nombre conséquent de prélèvements visant, par l'intermédiaire d'un panel analytique varié de comprendre l'origine de ces traces. Les analyses, ciblées sur ces traces ocrées et leurs encaissants, ont été choisies en vue d'apporter des éléments de discussion relatifs à : (1) leurs constituants et matériaux, (2) leurs processus de formation, (3) leurs contextes environnementaux et leur chronologie.

3.2. Contexte paysager actuel et récent du sondage 3

Le sondage 3 (SD3) a été implanté dans l'espace central de la « Prairie des Vernois », à 300 m en amont du rivage actuel (Figure 55). Il se situe à environ 491 m d'altitude. Le secteur de la prairie des Vernois s'étend sur une cartographie de 1909, depuis le bas de la butte morainique jusqu'aux rives du lac, sur une distance maximum de 500 m environ (Roulière-Lambert, 1985). La documentation photographique ancienne⁷⁰, confirme que l'emplacement étudié est, au moins depuis le début du siècle, une prairie, sinon pâturée, fauchée, où ne se développent que de rares ligneux épars. À partir de 1962-1969, des fossés de drainages sont progressivement réalisés, pour gagner des terres cultivées vers le lac. En comparaison des terrains alentour à distance équivalente des rives, l'emplacement du sondage n'est intégré au parcellaire de culture contemporain que tardivement, au cours des années 1970. L'emplacement étudié est labouré et cultivé entre 1974 et 1978, puis semble maintenu en pré. Début

⁷⁰ La plus ancienne photographie zénithale de l'IGN date de 1927. Aussi, une série de cartes postales contemporaines des travaux de la prise d'eau pour la construction de l'usine électrique nous renseignent ponctuellement sur le paysage général.

1990, la parcelle semble abandonnée et voit se développer une dense végétation arbustive. Les ligneux seront éliminés en 2000 et 2001, afin de la convertir à nouveau en pâture pour l'élevage bovin. Lors de notre intervention en 2021, le terrain était une prairie artificielle. La zone a donc connu plusieurs changements d'état récents à considérer.

De plus, on notera l'existence d'une large parcelle directement au nord de SD3, qui ne sera jamais mise en culture malgré le drainage. Elle se situe dans l'axe de l'ancien ruisseau du « Bief Laissant », qui par sa position médiane sur ces terres occidentales, draine depuis l'arc morainique une part importante des précipitations. Cela illustre le caractère encore contraignant de l'humidité locale, malgré le rehaussement progressif des terrains par les apports colluviaux, et l'abaissement du niveau du lac. D'autre part, on considérera le fort impact structural que l'assèchement engendre sur ces terrains. On peut ainsi observer à la fin de la période estivale, la formation de très larges fentes de rétractation, mesurant jusqu'à plus de 10 cm de large en surface, et se prolongeant parfois à plus de 50 cm en profondeur. Ceci signale la présence d'une fraction argileuse minérale au comportement semi-gonflant.

L'analyse des photographies aériennes infrarouges avait permis de repérer dans ce secteur, suite aux mises en cultures récentes, l'existence d'anomalies linéaires : « *un réseau complexe de fossés parallèles et étroits, disposés en faisceaux parallèlement aux courbes de niveau* » (Pétrequin, 1992). Leur datation était supposée antérieure à l'âge du Fer, mais les résultats des sondages de Chalain 2000 indiquent qu'ils seraient plutôt récents. Nous n'avons pas été capables de reconnaître ces structures, ni sur les photographies anciennes ni sur les relevés LiDAR (RGE ALTI® 1 m et LiDAR Chalain West, données V. Bichet), hormis quelques structures linéaires, mais en élévation, légèrement en amont, à hauteur des limites de la prairie des Vernois sur les cartographies anciennes.

3.3. Les profils de comparaison

Afin d'obtenir du matériel de comparaison, surtout pour les analyses élémentaires et minéralogiques, deux sondages ont été échantillonnés sur l'arc morainique de Doucier (MOR1 et MOR2). Ils sont tous deux implantés à environ 515 m d'altitude, dans la position supérieure du versant de la moraine, qui culmine aux environs de 525 m. Ils se trouvent sur sa moitié nord et possèdent donc un léger décalage latéral vis-vis du sondage 3. Les sondages et les prélèvements ont été réalisés par Vincent Bichet⁷¹. Les conditions de terrain n'ont malheureusement permis de décrire que sommairement ces profils. Néanmoins, les données disponibles et l'observation des prélèvements en laboratoire s'avèrent amplement suffisantes pour notre problématique.

⁷¹ Université de Franche-Comté ; UMR 6249 Chrono-environnement

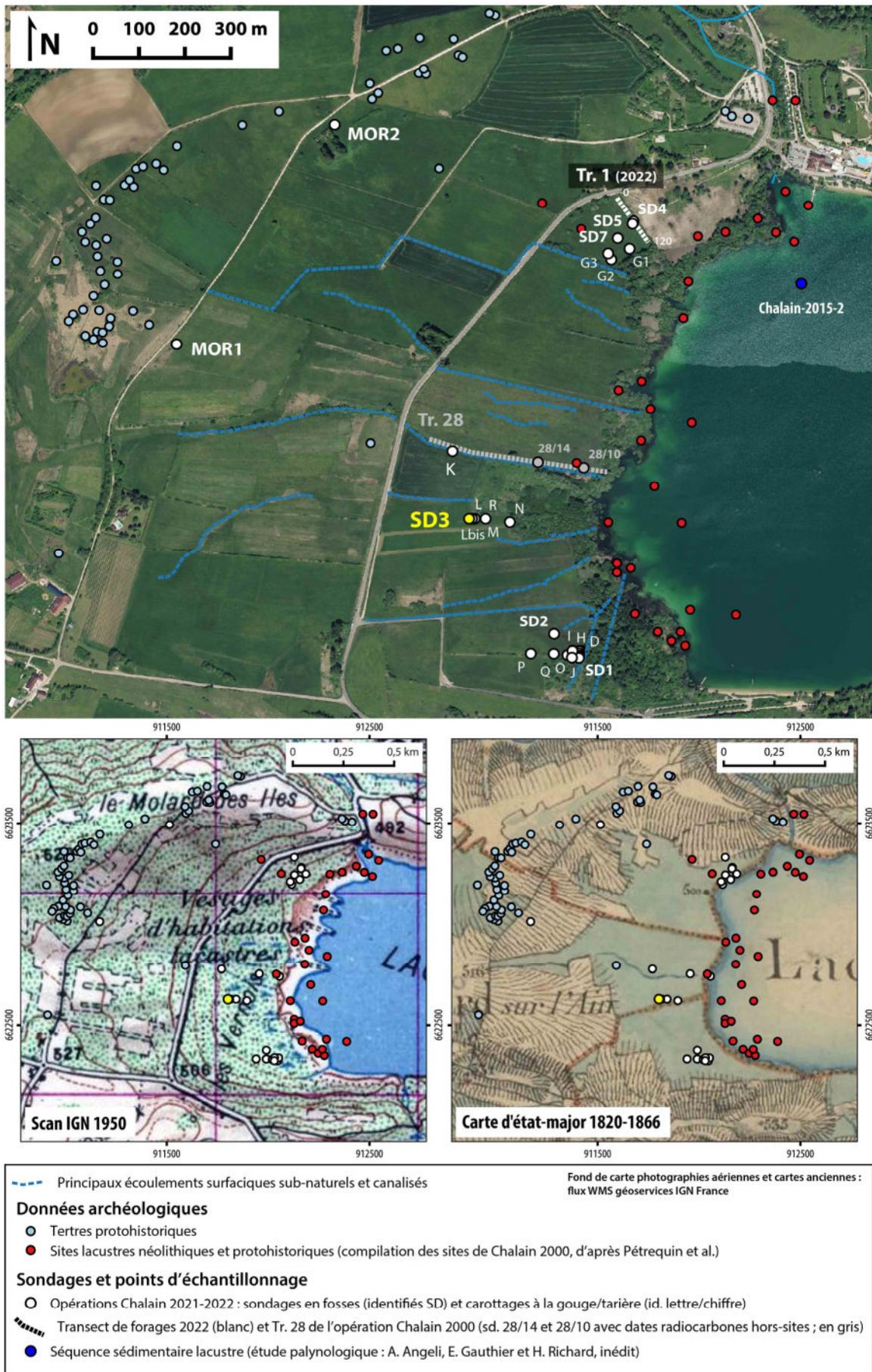


Figure 55 : Localisation et contexte général des sondages et carottages des opérations de Chalain 2021-2022.

4. Les séquences pédo-sédimentaires : description générale et caractéristiques morphologiques

4.1. Les profils pédo-sédimentaires étudiés

4.1.1. Le profil de référence : description générale du sondage 3

Le creusement du sondage 3 a été arrêté une dizaine de centimètres après l'apparition d'une unité argileuse blanchâtre très plastique et collante, présentant des marbrures grises et des taches d'oxydation jaunâtres (U8). Dans cette unité, ou à son sommet ont été retrouvés quelques pierres et graviers calcaires (du Jurassique supérieur). Il s'agit de dropstones d'origine glaciaire noyés dans une matrice fine argileuse glacio-lacustre (non varvée). Cette strate est recouverte par une mince unité argileuse, latéralement discontinue, de couleur franchement grise (U7), et identique aux marbrures de U8. Sa limite supérieure est irrégulière, et celle inférieure très irrégulière, avec des formes en poches ou des pénétrations anguleuses, voire digitées. U7 montre localement des restes végétaux fibreux. Elle correspond probablement à de fins dépôts détritiques tardiglaciaires. Du fait de son caractère irrégulier, elle n'a pas pu être proprement échantillonnée. Au-dessus apparaît une unité tourbeuse noire et grasse de 10-20 centimètres d'épaisseur (U6). Elle est globalement peu fibreuse, mais présente clairement des concentrations de restes végétaux, notamment de bois aux teintes rouges. Sa limite supérieure est plutôt nette, légèrement ondulée, mais avec quelques irrégularités.



Figure 56 : Prise de vue générale du sondage 3 et de l'unité ocrée (profil Est) après fouille et ouverture complète.

Au-dessus des tourbes se développe une unité argilo-limoneuse épaisse de 30-40 centimètres, sombre, avec des reflets variant verticalement du violacé dans la partie supérieure, au bleuâtre-verdâtre en profondeur (U5). La structure est peu nette, à tendance massive, caractère qui est encore plus accentué vers la base de l'unité. Aussi, on relève l'existence de taches d'oxydation diffuses et peu marquées, jaunâtres à rouilles. Ces dernières sont assez discrètes et n'occupent certainement pas plus de 1 % des surfaces examinées. Les caractéristiques de cette unité indiquent des conditions de développement globalement anaérobiques, sous l'effet des engorgements. U5 peut être classée comme un horizon réductique totalement réduit codé Gr (horizon à gley réduit ; AFES, 2009 ; Vizier, 1971). Cette unité est surmontée tantôt par une unité argileuse noire très plastique (U4), tantôt par l'unité aux teintes ocreuses qui nous intéresse tout particulièrement (U3). Ces deux dernières sont agencées selon une géométrie relativement complexe, qui sera décrite en détail ci-après. Elles sont irrégulièrement recouvertes par une unité argileuse noirâtre (U2), d'aspect très similaire à l'unité 4. Enfin, le sommet du sondage correspond à une unité limono-argileuse brune biomacrostructurée, très légèrement carbonatée, qui est l'horizon de surface actuel labouré LA (U1).

De plus, on observe des fentes de rétractation verticales qui descendent depuis la surface jusqu'à la moitié supérieure de l'unité 5, soit vers 50-60 cm de profondeur. Celles-ci sont toutefois relativement peu marquées en comparaison de ce que nous avons pu observer sur les terrains prospectés, lors de l'épisode de sécheresse au cours de la campagne 2022. En outre, on note que ces fentes sont globalement moins marquées au niveau de l'unité 3. Hormis la présence de l'unité argileuse noire plastique associée aux traces ocrées, la séquence correspond globalement à la stratigraphie précédemment documentée dans ce secteur.

4.1.2. Le secteur tourbeux : sondages 1 et 2

Deux sondages ont été ouverts dans le secteur sud de la prairie des Vernois, renseignée comme la zone la plus tourbeuse (SD1 et SD2 ; Figure 55 et Figure 57). Les creusements ont été arrêtés une quinzaine de centimètres après la rencontre des premières craies lacustres. Sur ces craies se développent des tourbes brunâtre sombre assez décomposées, mais avec d'assez nombreuses concentrations de résidus végétaux ligneux. Au sommet des tourbes apparaît une unité limoneuse peu argileuse brun foncé. Cette-ci correspond à l'horizon de labour actuel ayant très fortement remanié les dépôts tourbeux. Le sondage 2 se distingue seulement par la présence d'un mince liseré irrégulier argileux gris clair, de quelques centimètres d'épaisseur (SD2-U2). Il a été partiellement tronqué par les labours, mais on peut observer qu'il est intercalé dans les matériaux tourbeux. Il correspond à un épisode de colluvionnement notable, probablement d'origine agricole. Cette unité a été incluse dans les analyses élémentaires.

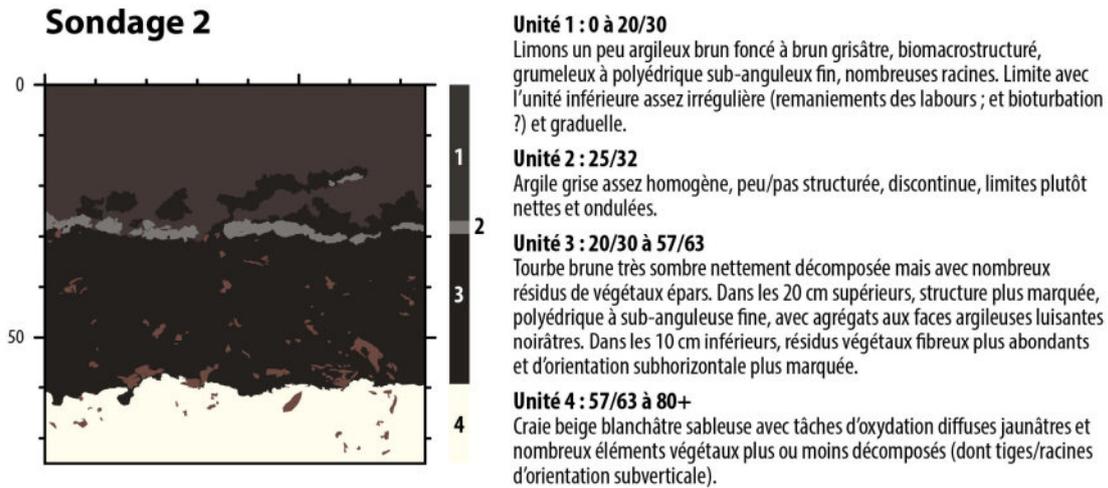
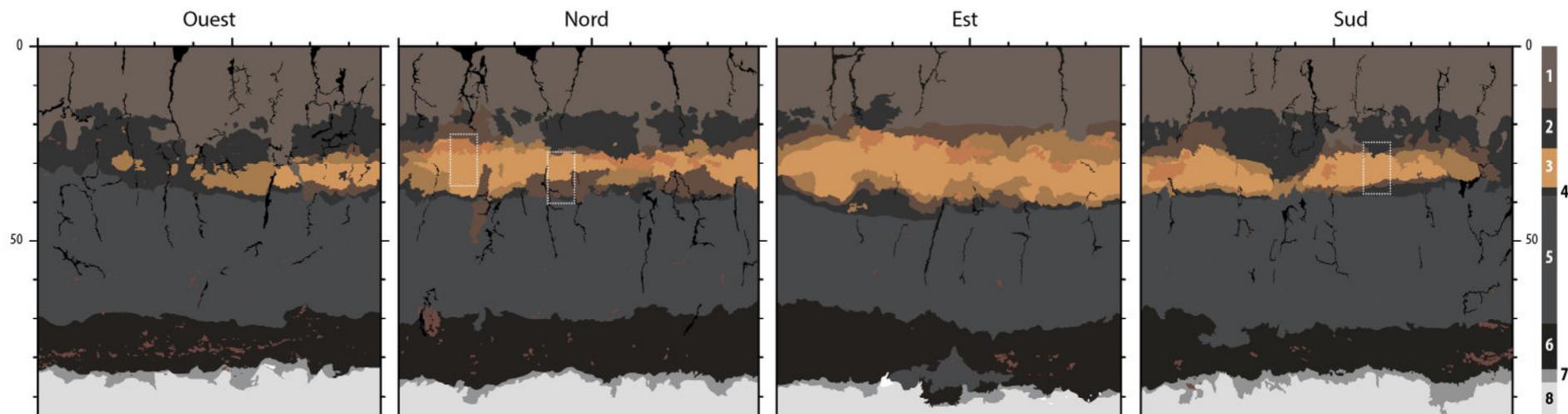


Figure 57 : Dessin stratigraphique du sondage 2 (SD2) de Chalain.

4.1.3. Les sols développés sur la moraine

Les deux séquences MOR1 et MOR2, prélevées sur l'arc morainique frontal sont assez similaires et globalement peu épaisses. Le substrat apparaît à environ 35-40 centimètres de profondeur. Il correspond à des matériaux carbonatés qui possèdent une fraction fine argilo-silteuse très importante (pierrosité des prélèvements d'environ 15 %). La granulométrie dominante fine s'explique par leur mode de dépôt particulier : il s'agit d'un faciès subaquatique, formé précisément à l'interface entre le paléo-lac de la combe d'Ain et le front glaciaire de la langue de Doucier (comm. pers. V. Bichet ; Campy, 1982). Ce type de formation a déjà été documenté, mais sur le flanc opposé de cette moraine frontale (ibid.). Les deux sols qui se développent dans ces matériaux présentent un horizon structural limono-argileux carbonaté (pierrosité 10-15 %), qui possède une structure polyédrique moyenne à fine plutôt bien exprimée (horizon Sca), au-dessus duquel s'observe un horizon organo-minéral limono-argileux (pierrosité d'environ 5 %) dont la terre fine est moins, mais encore nettement carbonatée (horizon Aca). Ces sols sont à rattacher au groupe de référence des Calcosols (hapliques), ce sont les sols classiques pour cette situation topographique (haut de pente molle) et ce type de matériau calcaire très tendre (Bruckert et Gaiffé, 1985 ; AFES, 2009)



Sondage 3

Unité 1 : 0 à 15/25

Limons argileux brun foncé, biomacrostructuré, structure grumeleuse à polyédrique sub-anguleuse, larges macro-fissures sub-verticales (fentes de dessiccation), nombreuses racines.

Unité 2 : 15/35

Argile noire, plastique, à tendance massive, discontinue et limites irrégulières parfois nettes parfois diffuses, localement très pédoturbé, quelques fragments de végétaux, et quelques concentrations charbonneuses diffuses avec rares charbons de bois microscopiques.

Unité 3 : 20/40

Limons argileux jaune à ocre orangé, discontinu, irrégulier, aux limites nettes à diffuses, structure polyédrique sub-anguleuse très fine à moyenne, localement à tendance massive (zones plus argileuses) ou au contraire d'aspect granulaire (voir subdivisions dans l'encart).

Unité 4 : 35/45

Argile noire inférieure à l'unité 3, caractères identiques à l'unité 2, sans végétaux, ni charbons (?).

Unité 5 : 30/45 à 65/75

Argile limoneuse gris sombre à tendance bleuâtre-verdâtre, plastique, à tendance massive, quelques résidus végétaux millimétriques épars. Moitié supérieure avec macro-fissures sub-verticales. Moitié inférieure localement plus argileuse, plus massive, et avec des tâches diffuses millimétriques jaune-rouille d'hydromorphie au sein d'une matrice légèrement plus claire. Transition avec l'unité supérieure parfois peu nette et irrégulière.

Unité 6 : 65/75 à 85/90

Tourbe noire nettement décomposée avec d'assez nombreuses concentrations ou litages de débris végétaux-ligneux milli- à centimétrique, limites avec l'unité inférieure généralement assez nette mais légèrement irrégulière.

Unité 7 : 80/90

Argile grise très plastique, collante, assez irrégulière et discontinue, sous forme de petites poches mesurant quelques unités à une dizaine de centimètres de large. Présence de quelques éléments grossiers (graviers à pierres) calcaires typiques du Jurassique supérieur (dropstones).

Unité 8 : 85/90 à 100+

Argile blanchâtre avec des tâches diffuses jaunâtre et traces/marbrures irrégulières d'argile grisâtre similaire à l'unité 7

Unité 3 :

- **3.a :** Limons argileux jaune-ocre
- **3.b :** Idem mais moins denses et avec indices macroscopiques de pédoturbation (cavités et chenaux millimétriques fantômes ou comblés des unités encaissantes)
- **3.c :** Concentrations plus fortement rouille-orangé, présente parfois une structure d'aspect particulaire associée à une texture de sable grossier, anguleux, induré mais friable par compression
- **3.d :** Agrégats pédologiques jaune-ocre dispersés et mélangés avec l'unité 2 ou 4 (et voire rarement l'unité 1)

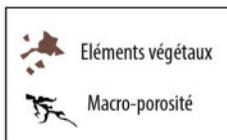


Figure 58 : Dessins des unités pédo-sédimentaires des quatre profils du sondage 3 (SD3) de Chalain.

4.2. Caractéristiques morphologiques et traits macroscopiques de l'unité ocrée et de ses encaissants

L'unité 3 se présente comme une couche irrégulière et discontinue, mesurant au maximum une vingtaine de centimètres d'épaisseur. À l'échelle de la séquence pédo-sédimentaire, elle est très distincte des unités encaissantes, en raison de sa teinte (« hue ») générale ocreuse, et de sa clarté (« value ») plus élevée. Elle repose le plus fréquemment sur une unité fortement argileuse, noire, plastique, irrégulière et souvent assez mince (U4). Et, elle est le plus souvent recouverte par une unité d'aspect très similaire (U2), épaisse au maximum d'une quinzaine de centimètres, mais discontinue et aux limites parfois diffuses (Figure 58). Il est intéressant de noter que dans l'angle sud-ouest du sondage, où l'unité 3 disparaît, les unités 2 et 4 se rejoignent sans que l'on puisse les distinguer. Sur le plan textural, ces dernières sont très fines, argilo-limoneuses. À l'état humide, leur structure est massive et continue, mais à la suite de leur dessiccation, des fissurations abruptes accompagnent leur fragmentation en agrégats polygonaux très anguleux et extrêmement compact. Certains de ces agrégats ont parfois une sous-structure d'ordre millimétrique à tendance rhomboédrique. Ces caractéristiques physiques, forte plasticité à l'état humide, mais structuration bien exprimée à l'état sec, agrégats denses et quasiment sans porosité interne, en lien avec une forte proportion d'argiles, évoquent ceux d'horizons à propriétés vertiques (AFES, 2009). Néanmoins, on n'observe pas de structure sphénoïde (ou structure dite en coins/fuseaux) très développée, et en tout cas pas de faces luisantes et gauchies de glissement, qui caractériseraient un horizon vertique « V » au sens strict. U2 et U4 s'apparentent donc plutôt à un/des horizons structuraux à caractères vertiques moyennement exprimés, codés « SV ».

D'autre part, on notera que, dans l'angle sud-ouest vers lequel l'unité ocre s'amenuise, la base du complexe argileux noirâtre formé de U2 et U4 remonte légèrement (Figure 58). Sur le profil Est, où l'unité 3 se montre la plus épaisse, l'unité 2 n'apparaît que sous la forme de poches résiduelles assez diffuses au sein de l'unité 1. Ceci est imputable à la combinaison de légères variations topographiques et des labours récents (sinon antérieurs ?), ayant presque entièrement remanié et fait disparaître l'unité 2, là où elle était présente plus haut. D'autre part, si les limites de l'unité 3 avec ces différents encaissants sont quelquefois très nettes, elles sont le plus souvent assez diffuses. U3 apparaît ainsi en plusieurs endroits sous la forme d'agrégats millimétriques à centimétriques disjoints, plus ou moins fortement mélangés avec les matrices des unités encaissantes. Le dessin des profils nous a amenés à la différencier en plusieurs sous-unités (voir légende Figure 58 et § suivants).

Ces observations stratigraphiques, qui décrivent un caractère général nettement irrégulier et discontinu des unités 2 et 3, confirment celles réalisées lors de leur fouille en plan (Figure 59). Nous avons alors noté que localement, l'unité ocrée prenait la forme de masses disjointes entre lesquelles U2 se poursuivait en profondeur. En effet, bien que l'unité ocre se montre épaisse et quasi continue sur les coupes, elle est en réalité assez discontinue. Ceci est illustré par le résultat d'un doublon de carottage sur l'emplacement de la fouille (avant l'ouverture), dans lequel aucune trace ocreuse n'était visible. En résumé, la fouille n'a permis d'identifier aucune structuration ni aucun aménagement ou indice macroscopique qui indiquerait une quelconque intervention anthropique dans la formation de l'unité 3 ou de sa fossilisation. Aucun mobilier archéologique ni résidu d'activités artisanales n'ont été identifiés. La fouille a seulement permis de repérer quelques petites concentrations (de quelques centimètres) de

charbons microscopiques à l'interface entre les unités 2 et 3. Il reste possible que l'absence de charbons de bois dans les unités encaissantes argileuses résulte de la grande difficulté à les fouiller par leur plasticité à l'état humide, et à les repérer au sein de ces unités sombres. Comme nous allons le voir, les observations des coupes nous ont apporté nettement plus d'informations que l'approche planimétrique.

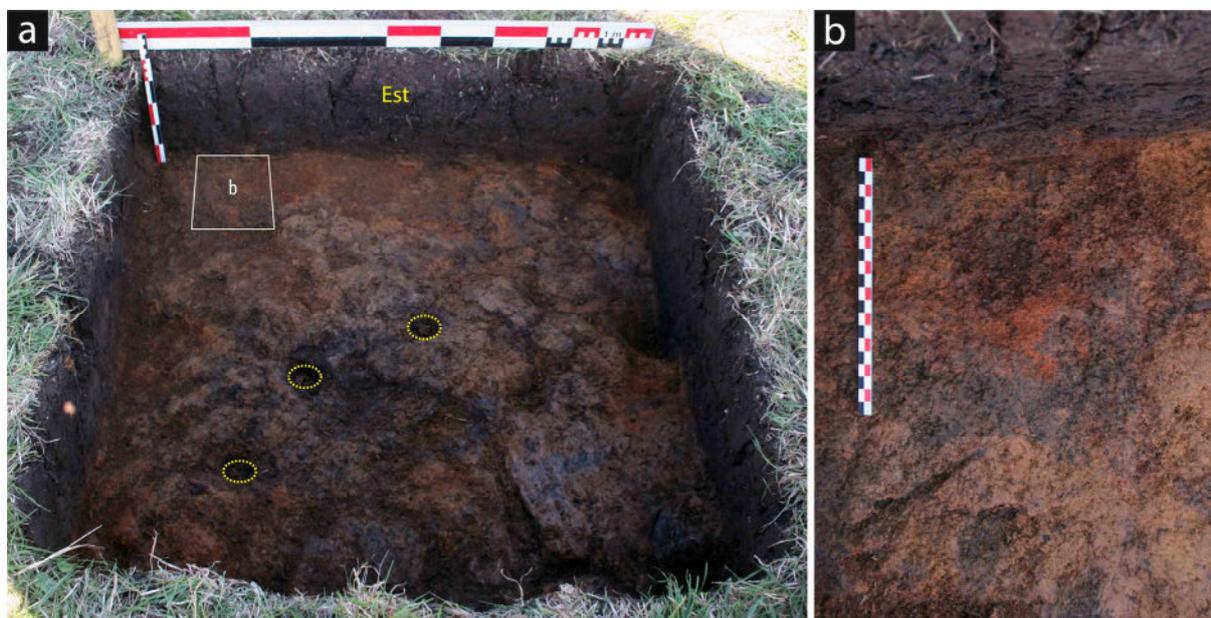


Figure 59 : Photographies zénithales du décapage du sommet de l'unité 3 (Sondage 3).

- (a) Le sommet de l'unité 3 présente une morphologie assez irrégulière ou ondulée, avec de nombreuses « poches » irrégulières où s'immisce l'unité argileuse noire U2. En certains endroits, U3 disparaît complètement (notamment au milieu du bord du profil Sud et angle S-O). Les cercles jaunes indiquent l'emplacement des forages à la sonde.
- (b) Détail d'une concentration plus rougeâtre et de l'irrégularité à fine échelle du toit de U3 (échelle de 20 cm).

L'unité 3 montre généralement une texture distincte de ces encaissants, limoneuse à limono-argileuse (sous-unité U3.a). Elle possède avec une structure polyédrique plus moins anguleuse à grenue, de dimensions assez fines (agrégats inférieurs à quelques millimètres). L'unité ocreuse ne forme pas de masses indurées, au contraire, elle a plutôt tendance à s'émietter facilement. Elle a donc globalement une structure relativement fine et bien agrégée, qui tranche indubitablement avec ses encaissants U2, U4 et U5. Néanmoins, elle est parfois clairement plus argileuse, en particulier au niveau de zones ayant une bioturbation fine marquée et des colorations moins vives, tirant vers le brun (sous-unité U3.b). À ces endroits notamment, la structure est alors à tendance plus continue et massive, ce que l'on expliquerait donc par un mélange intime avec leur encaissant. La distinction entre ces deux sous-unités (U3.a/U3.b) n'est en fait pas toujours évidente : nous avons plutôt l'impression d'une juxtaposition désordonnée de zones plus ou moins bien démarquées et irrégulières. L'observation très détaillée de l'unité nous permet d'établir qu'il existe en réalité un continuum de faciès entre ceux bruns argileux finement pédoturbés et ceux limono-argileux franchement ocreux (Figure 60.a). Nous expliquons ce constat par l'expression plus ou moins forte de différents traits pédo-biologiques, qui caractérisent, mais en même temps se juxtaposent et complexifient alors la lecture de ces faciès :

- de nombreuses cavités et de nombreux chenaux biologiques millimétriques comblés de sédiments de coloration brun noir bien distincts (notamment au sein de la sous-unité U3.b) ;

- certaines de dimensions centimétriques comblées de manière similaire (Figure 60.b) ;
- des zones où les sédiments ocrés sont fortement mélangés et finement diffusés avec ceux des unités sous et sus-jacentes (notamment au sein de la sous-unité U3.d ; Figure 60.a et b) ;
- d'autres, au contraire, où des agrégats ocrés sont bien distincts au sein des matrices encaissantes, et traduisent des phénomènes de détachement et de désagrégation en cours (Figure 60.b) ;
- des macro-fissures sub-verticales (fentes de retrait), parfois comblées ou associées à des effets de fracturation et de glissement des unités traversées (Figure 60.d).

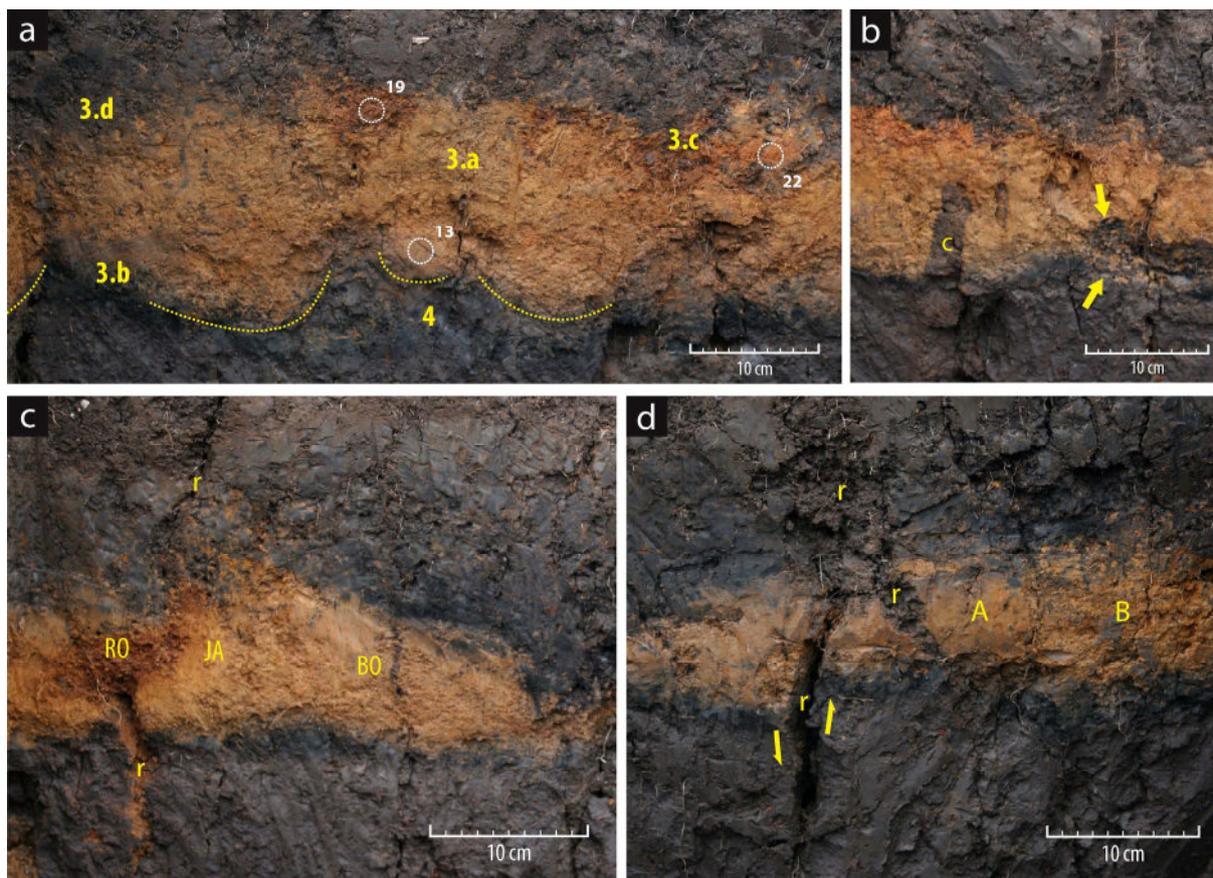


Figure 60 : Planche photographique illustrant la morphologie macroscopique complexe de l'unité 3 de SD3.

(a) Profil Est, illustrant l'aspect marbré général de l'unité 3 et leur interprétation en différentes sous-unités interprétées (U3.a-d). Sa base prend ici la forme de petites poches (traits pointillés), entre lesquelles l'unité 4 noire argileuse « remonte ».

(b) Détail du profil Nord, montrant à gauche l'unité 3 vraisemblablement peu bioturbée (aspect continu et peu panaché), mais traversée par un chenal colmaté (c ; probable cavité racinaire), et à droite, un effet de désagrégation de la base de U3 au sein de l'unité 4 (flèches).

(c) Détail du profil Sud, où l'on observe une concentration de sédiments rouille-rougeâtre (RO), traversée par une fente de retrait sub-verticale (r ; colmaté de sédiments teintés au cours du nettoyage des couches) autour de laquelle apparaît une auréole jaunâtre de 3-5 cm (JA). Les couleurs observées sont nettement distinctes de la partie droite de l'unité 3, où la couleur est brun ocre (BO) et assez homogène.

(d) Détail du profil Ouest, présentant une large fissuration (fente de retrait) vide ou comblée d'un limon-argileux grumeleux (U1) traversant les unités U2, U3, U4, jusqu'à U5. Le décalage de hauteur entre les masses ocrées et l'unité 4 sous-jacente, de part et d'autre de la fracturation, est interprété comme un effet de « glissement » (flèches). Noter de plus les différences structurales de U3, continue et compacte à gauche (A), grumeleuse à polyédrique émoussée fine à droite (B).

Ces pédoturbations importantes sont à l'origine – du moins pour une part – de la morphologie complexe de l'unité 3, tel que le retranscrivent les dessins des profils, et en particulier donc, là où ces perturbations biologiques et mécaniques sont en surimpression. Néanmoins, ces dernières n'affectent pas l'unité 3 de manière uniforme.

Par exemple, sur le profil Est, où l'unité 3 est la plus épaisse, celle-ci est nettement affectée. Elle révèle un aspect panaché sous forme de tâches de plusieurs centimètres de diamètre, qui prennent différentes teintes s'échelonnant du brun jaunâtre au rougeâtre (Figure 60.a). Ces formes sont irrégulières et leurs limites sont diffuses. Il n'est pas possible d'identifier une quelconque organisation. De plus, les limites avec l'unité inférieure prennent parfois la forme de « poches », qui évoquent des déformations de type figures de charge, quoique peu marquées (Miall, 2022 ; Owen, 2003 ; Owen, Moretti et Alfaro, 2011). Ces déformations pourraient être post-dépositionnelles ou témoigner de modalités de dépôt sub-synchrones de la formation de l'unité 3, qui dans un cas comme dans l'autre, suggéreraient que les matériaux encaissants étaient saturés en eau.

Au contraire, sur le profil Sud l'unité ocre prend un aspect plus homogène, avec un aspect interne peu ou pas du tout marbruré. De plus, les limites inférieures et supérieures de U3 sont globalement plus nettes et planes, et, l'unité supérieure U2 (bien que toujours plus ou moins mixée avec U1) y est relativement épaisse. L'unité 3 est donc vraisemblablement préservée de perturbations postérieures au niveau de ce profil. En outre, dans la direction où U3 et U2-U4 s'amenuisent, U3 présente en coupe une morphologie particulière : celle d'un volume plutôt cohérent et continue d'une quarantaine de centimètres de largeur pour une dizaine d'épaisseur, bordé de part et d'autre des unités 2 et 4 (Figure 61). Cette morphologie nous évoque fortement celle d'une masse de sédiments déposée d'un seul tenant. Ceci, ainsi que la morphologie en poches de la base de U3, va dans le sens d'un dépôt de matériaux de nature très distincte plutôt que d'une formation sur place, pédologique. Selon cette hypothèse, les différents faciès observés indiqueraient des modes de dépôt distincts, tantôt plus massifs, tantôt sous forme plus résiduelle, puis affectés de manière hétérogène par différentes perturbations.

Enfin, d'autres zones de quelques centimètres montrent une teinte rouge très marquée, et une structure non agrégée ou particulière (sous-unité U3.c). Ces particules sont plutôt anguleuses, parfois nettement, et de dimension maximale des sables (très) grossiers. Toutefois, elles se désagrègent lorsqu'elles sont soumises à une assez forte pression entre les doigts. Il s'agit donc vraisemblablement de pseudo-agrégats, en l'occurrence de pseudo-sables, résultant d'un concrétionnement, somme toute modéré (Mathieu & Lozet 2011). Si ces zones rouilles-rougeâtres semblent être plus souvent situées dans la moitié supérieure de l'unité 3, on ne peut pas identifier de logique claire dans leur répartition. Elles sont parfois bien intégrées au sein de l'unité (Figure 61). Une seule d'entre elles présente un faciès relativement diagnostique, avec une auréole contiguë inférieure de couleur graduellement plus jaune, et d'ailleurs bien distincte de la couleur du reste de l'unité 3, d'un brun-ocre assez homogène (Figure 60.c). Cette zone rouille-rougeâtre auréolée étant précisément coupée par une macro-fissuration verticale, il fait peu de doute qu'elle soit la conséquence d'un épuisement rédox basal conjoint à une accumulation d'oxy-hydroxydes de fer au niveau de cette fissuration. En l'état, la nature des autres traces rougeâtres ne peut être précisée.

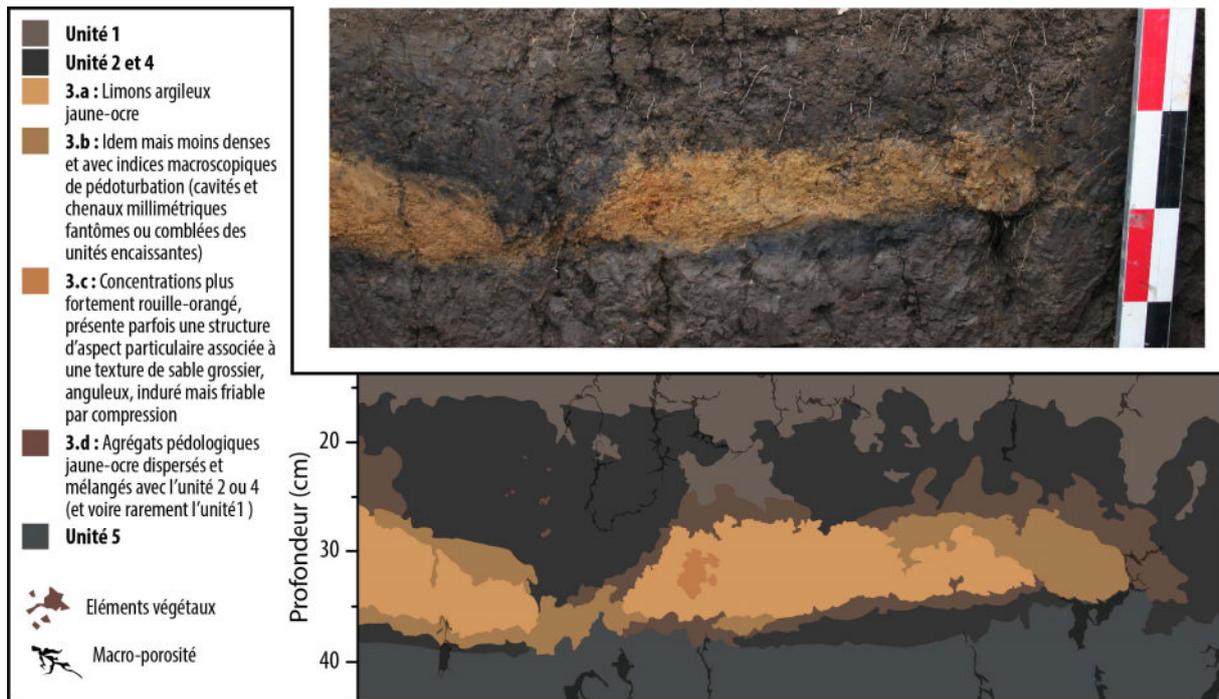


Figure 61 : Photographie de l'unité 3 sur le profil Sud (non redressée) et détail correspondant du dessin stratigraphique (après redressement).

Cette morphologie singulière, évoque une masse sédimentaire cohérente déposée d'un seul tenant.

En somme, l'unité 3 présente une morphologie complexe et singulière. D'un point de vue pédologique, U3 s'apparente à un horizon ferrique « Fe » – c'est-à-dire un horizon où le processus dominant est celui d'une accumulation de fer – mais non induré (AFES, 2009 ; Mathieu et Lozet, 2011). Néanmoins, sa morphologie interne ne correspond clairement pas à celle de traits d'oxydo-réduction « courants » : les teintes ocres ne sont pas seulement en surface des agrégats, mais imprègnent toute la masse de sédiments. Aussi, bien que les teintes jaunes-rouges soient très bien marquées, nous n'observons pas de plages ou d'horizons (horizon albique) nettement décolorés et contigus qui traduiraient une redistribution locale du fer. Seul un trait macroscopique est typique d'un phénomène rédox, mais il paraît se surimprimer à une masse sédimentaire déjà fortement teintée. De plus certaines formes de l'unité ocre suggèrent une mise en place de type dépôt sédimentaire. Puisque ses caractéristiques texturales et structurales tranchent nettement avec celles de ses encaissants, cela laisserait penser que son origine est allochtone. Enfin, le seul argument manifeste en faveur d'une chauffe est la présence de quelques petits charbons de bois. Néanmoins, il est impossible de garantir *a priori* qu'ils résultent d'un phénomène concomitant de la formation de l'unité ocre, d'autant que celle-ci montre des traits de pédoturbation marqués. En l'état, ces premières observations montrent que plusieurs hypothèses génétiques peuvent être envisagées, et qu'il est indispensable de recourir à des méthodes de caractérisation plus avancées.

Tableau 16 : Résultats bruts des analyses p-XRF des différents échantillons de Chalain (n = 21).

Les 7 éléments majeurs Si, Al, Fe, K, Mg, Ca et Ti sont présentés en % des masses séchées à l'air et les 22 éléments traces As, Ba, Co, Cr, Cu, Ga, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Se, Sr, Th, U, V, Y, Zn et Zr en ppm. Les taux de matières organiques (M.O.) correspondent à la PAF à 550°C, présentés en % des masses sèches à 105°C.

LOD : Limit of detection

ID	Si	Al	Fe	K	Mg	Ca	Ti	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ga	Mn	Mo
SD3-U1 [0-8]	10,54	3,72	6,63	0,99	1,17	1,74	0,47	48	104	< LOD	123	14	23	345	< LOD
SD3-U1 [8-16]	10,78	3,90	6,73	0,98	1,13	1,67	0,47	48	112	< LOD	138	13	24	342	< LOD
SD3-U1 [16-24]	10,50	3,81	7,27	0,95	1,12	1,72	0,48	50	99	< LOD	151	13	22	347	< LOD
SD3-U2 [24-26]	10,76	4,21	9,07	0,86	1,31	1,57	0,48	58	105	1	160	23	24	296	< LOD
SD3-U3 [26-32]	10,01	4,97	12,86	0,84	1,22	1,13	0,51	81	170	6	175	15	27	305	< LOD
SD3-U3 [32-40]	10,55	5,15	12,17	0,80	1,21	1,10	0,50	73	173	7	198	15	29	276	< LOD
SD3-U4 [40-42]	12,43	5,03	9,11	0,93	1,16	1,05	0,49	44	187	4	159	43	29	223	< LOD
SD3-U5 [42-50]	13,02	4,85	5,33	1,11	1,09	1,48	0,49	25	134	1	158	33	28	154	< LOD
SD3-U5 [50-58]	12,76	4,63	3,97	1,27	1,07	1,47	0,47	16	121	< LOD	142	38	28	119	< LOD
SD3-U5 [58-66]	12,78	4,85	4,09	1,39	1,12	1,39	0,45	16	129	< LOD	151	27	30	119	< LOD
SD3-U5 [66-72]	12,22	4,82	3,87	1,38	1,10	1,59	0,43	15	126	< LOD	146	30	29	111	< LOD
SD3-U6 [72-80]	8,39	3,46	3,90	0,93	1,07	3,75	0,34	17	60	< LOD	157	88	20	123	< LOD
SD3-U6 [80-88]	8,37	2,84	3,19	0,87	1,01	4,20	0,35	17	46	< LOD	124	115	16	110	< LOD
SD3-U8 [88+]	3,83	0,72	1,00	0,57	0,65	25,15	0,11	8	< LOD	2	24	4	6	153	< LOD
MOR1 [0-10]	15,56	2,25	3,31	1,00	0,87	4,20	0,39	26	90	4	109	9	11	809	3
MOR1 [20-30]	16,13	2,44	2,94	1,00	0,82	6,73	0,39	24	84	6	107	< LOD	9	1940	< LOD
MOR1 [40-50]	5,75	1,41	1,26	0,80	0,69	23,66	0,13	10	< LOD	3	40	< LOD	6	206	< LOD
MOR2 [0-10]	16,91	2,79	3,31	1,07	0,86	4,80	0,39	26	85	5	73	9	12	690	< LOD
MOR2 [20-30]	17,48	3,04	3,36	1,03	0,84	3,99	0,42	26	104	5	103	4	12	1041	< LOD
MOR2 [40-50]	6,78	1,45	1,36	0,73	0,73	22,73	0,16	11	40	3	37	< LOD	6	259	< LOD
SD2-U2 [28-30]	11,50	4,11	3,62	1,21	0,99	1,88	0,51	17	87	< LOD	142	15	27	121	< LOD

ID	Nb	Ni	P	Pb	Rb	S	Se	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr	M.O.
SD3-U1 [0-8]	15	43	748	35	91	1406	< LOD	54	10	14	233	35	179	110	28,0
SD3-U1 [8-16]	16	46	610	36	93	1294	< LOD	55	9	13	248	37	180	116	26,6
SD3-U1 [16-24]	14	44	616	37	90	1274	< LOD	54	12	16	255	36	174	113	26,0
SD3-U2 [24-26]	16	57	672	30	82	977	< LOD	49	12	18	266	36	174	124	22,4
SD3-U3 [26-32]	18	82	1032	33	87	435	< LOD	44	16	26	259	37	218	135	14,6
SD3-U3 [32-40]	19	81	960	34	90	336	< LOD	49	17	25	242	40	200	142	12,7
SD3-U4 [40-42]	19	60	459	41	113	287	< LOD	63	15	21	219	40	185	154	10,8
SD3-U5 [42-50]	20	45	420	40	108	756	< LOD	65	12	16	228	47	174	150	17,5
SD3-U5 [50-58]	19	41	533	30	120	835	< LOD	64	13	18	222	44	151	139	18,3
SD3-U5 [58-66]	18	44	498	32	133	752	< LOD	65	15	20	237	45	166	138	16,8
SD3-U5 [66-72]	17	43	503	27	133	904	< LOD	64	11	19	236	43	158	125	19,2
SD3-U6 [72-80]	11	36	743	21	72	3673	5	56	9	11	242	38	78	99	44,2
SD3-U6 [80-88]	10	34	597	21	55	4910	6	58	6	10	172	37	64	113	46,5
SD3-U8 [88+]	3	17	< LOD	12	30	1144	< LOD	223	< LOD	< LOD	36	15	34	59	2,9
MOR1 [0-10]	14	30	641	26	81	1172	< LOD	61	8	9	132	33	115	285	15,0
MOR1 [20-30]	13	28	243	33	70	819	< LOD	82	7	8	111	33	72	316	8,2
MOR1 [40-50]	3	18	< LOD	10	42	1092	< LOD	236	< LOD	< LOD	24	17	44	68	3,3
MOR2 [0-10]	15	29	607	30	86	1129	< LOD	67	8	12	128	33	115	277	13,5
MOR2 [20-30]	16	31	320	34	85	694	< LOD	65	9	12	125	36	97	321	7,8
MOR2 [40-50]	5	19	< LOD	< LOD	38	1178	< LOD	222	< LOD	< LOD	21	18	46	98	3,4
SD2-U2 [28-30]	18	41	252	26	102	1464	3	77	12	13	193	35	157	130	24,5

5. Résultats des caractérisations physico-chimiques

5.1. Compositions élémentaires totales (p-XRF et PAF)

Le Tableau 16 et la Figure 62 présentent les résultats des teneurs en éléments majeurs (%) et en éléments traces (ppm) obtenus par fluorescence X, ainsi que les taux de matières organiques estimés par PAF à 550°C. De manière globale, on observe une relative homogénéité entre les différents prélèvements d'une même unité (U1, U3, U5, U6), qui ne sont pas discriminés par les mêmes éléments. On note que les éléments traces qui montrent une variabilité unitaire plus forte sont identifiés à des taux très faibles de quelques dizaines de ppm (Pb, Th, U). Les taux d'incertitudes annoncés par la calibration interne de ces derniers sont d'ailleurs aussi plutôt élevés. En l'état, aucune interprétation de ceux-ci ne peut donc être proposée. D'autre part, il apparaît clairement que certains des éléments chimiques ont une évolution progressive sur la hauteur du profil (notamment Mn, K, Rb), qui traduit des phénomènes pédologiques qui concernent tout le solum. Les compositions géochimiques soulignent donc, d'une part, la relative complexité de la séquence de SD3, et d'autre part, de la nécessité de considérer l'interrelation verticale des unités pédo-sédimentaire définies (Baize, 2000, chap. 1). Le recours à des rapports élémentaires – pondération par un élément considéré comme relativement inerte ou peu mobile, ou un autre dont le rapport nous renseigne sur des processus pédologiques – est donc approprié. Avant cela, nous regarderons d'abord les résultats concernant certains constituants, entre autres celui du calcium qui possède un statut particulier dans le présent contexte géologique. Les caractéristiques de l'unité ocre et de ses encaissants directs seront ensuite précisées.

5.1.1. Résultats relatifs à quelques constituants spécifiques

5.1.1.1. Calcium et magnésium

L'échantillon argileux glacio-lacustre U8, se distingue sans surprise du reste des échantillons, par sa composition largement dominée par le calcium. La teneur en carbonate de calcium estimée d'après la PAF à 950°C est d'environ 75 %⁷². Pour le reste des échantillons, les mesures de calcium total sont globalement très faibles, avec des minimums enregistrés pour U4 et U3. Les taux très légèrement supérieurs de Ca pour les tourbes s'expliquent certainement par la présence de bois, car ces échantillons ne sont pas carbonatés. Pour les unités sus-jacentes aux tourbes, il n'y a que dans l'horizon de surface U1 que nous avons pu identifier quelques petits graviers et sables grossiers calcaires et dont la fraction < 200 µm est légèrement carbonatée (effervescence à HCl). Ce résultat ne s'observe pas à travers les résultats de Ca élémentaire ni avec les estimations de CaCO₃ par PAF, qui mêmes faibles (< 3 %), sont surestimées à cause de la richesse en argile de ces échantillons (incertitude relative aux pertes en H₂O des structures minérales ; Heiri, Lotter et Lemcke, 2001 ; Hoogsteen et al., 2015 ; Sun et al., 2009).

⁷² On notera que le taux de Ca total mesuré au XRF est trop bas par rapport à ce résultat. Après application du facteur de conversion (Baize, 2000) : $25,146 (= \text{Ca-XRF}) \times 2,496 = 62,8 \%$ de CaCO₃ rapporté à la masse séchée à l'air de l'échantillon. L'existence d'un effet de seuil de saturation de sa quantification liée à la calibration du XRF utilisée est possible.

Hormis pour U1, le Ca élémentaire doit correspondre à du Ca intégré dans les réseaux des minéraux argileux ou d'ions Ca^{2+} adsorbés en surface des constituants organo-minéraux.

Pour ce qui concerne le magnésium (Mg), les valeurs obtenues sont globalement assez homogènes, mais faibles, avec un net minimum pour U8. Les taux de Mg mesurés pour les deux Calcosols morainiques (horizons et matériau parental) sont dans les mêmes gammes de valeur que ce profil. Ces résultats sont cohérents avec la faible importance de la dolomie comparativement aux roches marno-calcaires, dans les formations géologiques régionales (Guillaume et Guillaume, 1989). On note d'ailleurs que Ca et Mg présentent une corrélation négative notable, avec un R^2 égal à 0,67 toutes unités comprises ($n = 21$), et à 0,70 substrats exclus ($n = 18$). En tant que métal alcalino-terreux bivalent, le magnésium possède un comportement général très proche du calcium, à ceci que les cations Ca^{2+} sont en règle générale plus fortement retenus que Mg^{2+} par les colloïdes (Duchaufour et al., 2018). En contexte de forte disponibilité du calcium, le magnésium sera donc plus facilement éliminé du profil par les eaux de drainage. Ces observations laissent penser que le magnésium des unités supérieures de SD3 est principalement en relation avec la présence de phyllosilicates (type chlorites ou vermiculites).

5.1.1.2. Matières organiques, carbone et azote

Les échantillons de tourbes (U6) sont surtout caractérisés par leurs taux de matières organiques, de soufre (S) et de cuivre (Cu) très élevés. L'association de S et Cu est cohérente puisque ces constituants ont souvent une affinité particulière aux composés organiques (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979 ; Kabata-Pendias, 2000 ; Mathieu et Lozet, 2011 ; Wainwright, 1984). Les taux de cendres sont d'après la PAF à 550°C légèrement supérieurs à 50 %, indiquant que cette unité est à la limite de la classification comme véritable horizon histique « H » (AFES, 2009). Il est envisageable que les quantités de MO soient légèrement sous-estimées par rapport au protocole du Référentiel Pédologique (RP) spécifique à ces horizons, dans lequel la température doit atteindre 600°C. Néanmoins, de telles valeurs indiquent clairement que des apports minéraux allochtones (dont l'origine anthropique ou naturelle reste à définir) complètent la sédimentation organique (AFES, 2009).

Ajoutons que, pour le reste du profil, la fraction organique reste minoritaire sans être négligeable. Avec la PAF, les valeurs les plus faibles sont celles obtenues pour U4 (≈ 11 %) puis U3 (≈ 14 %). Néanmoins, les comparaisons avec les estimations des dosages du carbone organique total indiquent une nette surestimation des résultats de la PAF (Tableau 17). Cela s'explique, comme pour les estimations des carbonates, par la perte d'eau structurale des minéraux argileux (Karathanasis, 2008 ; Sun et al., 2009). Ces résultats confirment que le complexe U2-U4 ne correspond pas à un horizon paratourbeux (entre 12,5 à 25 % de MO ; dont l'anmoor en est le pendant de surface ; Mathieu et Lozet, 2011), en accord avec leurs caractéristiques physiques (argile lourde et collante, absence de biomacrostructuration au séchage). Malgré cela, le fait que ces taux soient les plus faibles au sein de l'unité U4, dont la teinte suggérait une part certaine de matières organiques très fortement humifiées et intégrées aux constituant minéraux (en particulier par rapport à U5), nous pose question. Ce résultat pose aussi question vis-à-vis de l'hypothèse thermique, puisque les valeurs de U3, mêmes basses, y sont supérieures. Compte tenu de la nature des échantillons et du protocole de préparation, il n'est pas possible que les taux plus élevés de U3 s'expliquent par une proportion de résidus végétaux carbonisés (voir p. ex. Bonhage et al., 2020). En outre, dans le cas où U4 aurait effectivement été chauffé, sa teinte

suggérerait une chauffe réductrice, ce qui ne concorde pas non plus avec un abaissement du taux de carbone. Enfin, U2 se distingue de U4 par des taux de MO bien plus élevés, qui approchent ceux obtenus pour l'horizon de surface. Cette différence s'explique certainement (en partie) par une incorporation de MO postérieure à sa formation, liée au développement de l'horizon de surface U1.

Tableau 17 : Résultats des dosages de matières organiques, du carbone (C) total et de l'azote (N) total.

Analyses réalisées par l'INRAE d'Arras (LAS-SOL-0406 ; dosage de l'azote : ISO 13878 ; dosage du carbone total : ISO 14235), hormis PAF.

	Unité 2 (24-26)	Unité 3 (26-32)	Unité 4 (40-42)	Unité 5 (42-50)
Carbone organique total (COT ; g/kg)	71,8	34,8	20,3	49,2
M.O. (%) d'après COT (x 1,72)	12,4	6,02	3,52	8,51
M.O. d'après PAF (%)	22,4	14,6	10,8	17,5
Azote (N) total (g/kg)	7,0	2,7	2,5	4,8
Rapport Carbone organique / Azote total (C/N)	10,3	12,8	8,0	10,3

Les résultats des dosages de l'azote montrent des valeurs particulièrement faibles dans U4 et U3, par rapport à U2 et U5 (Tableau 17). Comme pour les teneurs en carbone, ces minimums seraient compatibles avec l'hypothèse d'une chauffe. Une nouvelle fois, la différence entre U2 et U4, ainsi que les caractéristiques physiques divergentes de U3 et U4, pose question. On ne peut exclure que ces faibles valeurs illustrent des pertes par lessivage ou voie gazeuse liées à d'autres « perturbations », auxquelles l'azote est très sensible, relatives à la formation de ces unités (voir Hébert, 1979). Les rapports C/N varient quant à eux relativement bas et assez équivalents. Ils correspondent aux valeurs des humus aériens de type mull (Gobat, Aragno et Matthey, 2003). Ils indiquent une incorporation et une minéralisation des MO assez bonne. Selon l'hypothèse thermique, les valeurs plus hautes en U3 traduiraient plutôt une combustion incomplète, avec des pertes plus importantes en azote qu'en carbone.

5.1.1.3. Phosphore

Il convient d'ajouter une précision concernant le phosphore, dont la mesure est parfois considérée comme invalide pour certains appareils de fluorescence portatifs, à cause d'une surestimation liée à la présence conjointe de calcium (effet de pic résiduel ou « escape peak » du Ca ; voir Hunt et Speakman, 2015). Nos résultats indiquent que P est sous la limite de détection pour les échantillons de substrats carbonatés. De plus, le coefficient de détermination de la régression linéaire P/Ca des échantillons positifs est très faible ($R^2 = 0,12$; $n = 18$). Il n'y a donc pas de corrélation entre les deux éléments, ce qui contredit une éventuelle influence de la teneur en calcium sur le phosphore (Frahm et al., 2016).

Les valeurs de P total sont hautes dans les tourbes, dans l'échantillon de surface de U1 et dans les horizons A des Calcosols, mais elles atteignent leur maximum dans l'unité 3. Il n'existe pas de corrélation significative entre les taux de P et de MO ($R^2 = 0,26$), même en excluant U3 ($R^2 = 0,53$). Le pôle organique du phosphore n'occupe donc vraisemblablement qu'une part réduite. Cependant, les valeurs nulles des trois échantillons carbonatés indiquent l'absence ou la rareté des minéraux

phosphatés primaires. Selon toute logique, les taux plus élevés en U3 seraient en relation avec la présence marquée d'oxy-hydroxydes de fer trivalent, qui possèdent une grande capacité de coprécipitation et d'adsorption du phosphate (Li et al., 2012). Inversement, les plus faibles valeurs enregistrées dans l'unité réductrice U5, peuvent s'expliquer par sa solubilisation plus marquée en conditions anoxiques. Par ailleurs, si P est plus fortement retenu dans l'unité ocre, l'origine de cet enrichissement relatif n'est pas définie. Dans tous les cas, les gammes de valeurs mesurées restent modérées (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979), ce qui ne plaide a priori pas pour un enrichissement lié à des apports anthropiques (Fechner, 2021). Ce résultat pourrait néanmoins convenir à l'hypothèse pyrogénique, puisque les cendres peuvent être riches en P et que sa fixation peut être accrue pour des sédiments ayant été chauffés (Bodí et al., 2014 ; Ketterings, van Noordwijk et Bigham, 2002 ; Raison, Khanna et Woods, 1985).

5.1.1.4. Soufre

Le cas du soufre est intéressant, puisque U4 et U3 se distinguent des autres unités du profil 3, mais également des Calcosols, par des valeurs très faibles. Le minimum est enregistré en U4. Par ailleurs, U2 se distingue clairement de ce dernier avec des valeurs intermédiaires à U5 et U1. Bien que le coefficient de détermination linéaire entre S et les MO soit moyen ($R^2 = 0,62$; $n = 21$), si l'on exclut les échantillons des Calcosols, il est alors assez élevé ($R^2 = 0,93$; $n = 14$). Le soufre est souvent majoritairement incorporé à divers composés organiques (ce qui est cohérent avec les taux très forts dans les tourbes), mais en contexte de sols engorgés, il peut aussi former des composés inorganiques notamment associés aux ions métalliques (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979 ; Freney, 1986 ; Kabata-Pendias, 2000). La dynamique du soufre est donc certainement assez différente entre le secteur de SD3 et les Calcosols de la moraine. Pour ces derniers, son association doit être gouvernée par les carbonates de calcium (Freney, 1986 ; Hu, Zhao et McGrath, 2005).

Les faibles valeurs de S dans l'unité ocre pourraient être cohérentes avec l'hypothèse d'une chauffe, puisque la combustion de matières organiques peut entraîner des pertes substantielles par volatilisation du soufre, à partir de températures assez modérées (Bodí et al., 2014 ; Sanborn et Ballard, 1991 ; Tiedemann, 1987). De plus, lors de la chauffe (en conditions suffisamment oxydantes), plusieurs types de minéraux sulfurés (de fer, de nickel, de cuivre, etc.) peuvent avoir tendance à former des composés secondaires plus riches en métaux par perte relative du soufre sous forme volatile (Maurel, 1964). Néanmoins, si ces processus pourraient expliquer les taux minimaux de S en U3, ils sont moins évidents pour U4, dont nous avons déjà dit que les caractéristiques physiques paraissent peu compatibles avec l'hypothèse d'une chauffe. Ce résultat soulève les mêmes questionnements que pour les résultats du carbone, des matières organiques et de l'azote, vis-à-vis de l'hypothèse pyrogénique. De manière comparable, la possibilité d'un appauvrissement progressif de S par lixiviation, serait éventuellement envisageable pour U3 dont la texture est plus grossière et la structure plus poreuse, mais elle ne l'est pas pour U4, très argileux et compact (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979 ; Scherer, 2009). Une autre éventualité serait que U4 ait connu une perturbation mécanique et une réoxydation suffisante pour engendrer la perte de S minéral (Li et al., 2012). Au vu de la morphologie localement nettement irrégulière du contact entre U4 et l'unité ocre, cette hypothèse nous paraît possible. Dans tous les cas, que U4 ait été chauffé ou non, il faut clairement envisager l'hypothèse que sa formation possède un lien avec celle de l'unité ocrée.

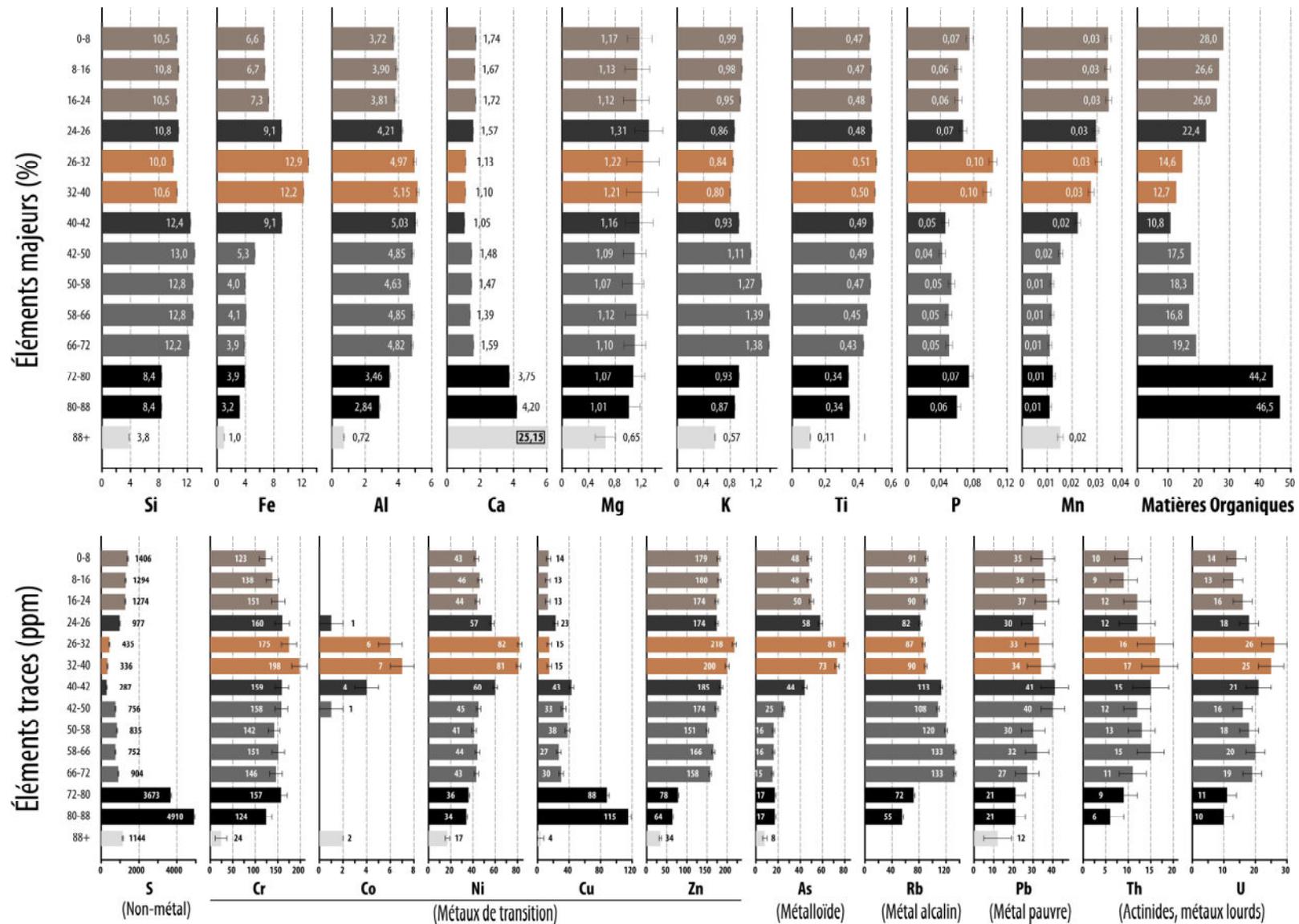


Figure 62 : Compositions élémentaires majeures et traces (p-XRF) et taux de matières organiques (PAF) de SD3. Mesures réalisées sur la fraction < 200 µm ; résultats exprimés sous forme élémentaire brute. P et Mn sont ici considérés comme éléments majeurs.

5.1.2. Rapports élémentaires totaux

5.1.2.1. Aluminium, titanium et silicium

Le titanium (Ti) est souvent considéré comme un élément quasiment inerte, car très résistant aux altérations biogéochimique (excepté dans quelques contextes, en particulier certains sols d'altération très intense des régions tropicales ; Cornu et al., 1999, 2005 ; Kabata-Pendias, 2000 ; Egli, Fitze et Mirabella, 2001 ; Bábek et al., 2015 ; Bajard, Poulénard, Sabatier, Develle, et al., 2017 ; Faměra et al., 2018). Cet élément a donc été choisi pour normaliser les autres éléments présentés ci-après.

L'aluminium (Al) est aussi globalement peu mobile dans les sols (Guillet et Souchier, 1979). Le rapport Ti/Al est supposé rester plus ou moins constant durant la pédogenèse (du moins à des pH intermédiaires), pour des sols développés à partir d'un matériau parental identique (Sheldon et Tabor, 2009). Les valeurs de Ti/Al varient relativement peu sur toute la hauteur de SD3. Elles sont restreintes dans l'intervalle des valeurs obtenues pour le Calcosol MOR1. Les valeurs les plus basses sont relevées à la base de U5. Elles augmentent progressivement vers U8 et sont aussi légèrement plus élevées dans l'horizon de surface. Dans le cas des Calcosols, la moraine possède un rapport notablement inférieur aux horizons Aca et Sca. Cela s'explique vraisemblablement par le drainage et le transfert de matériaux fins en aval, entraînant un accroissement relativement modéré de Ti vers la surface. Les variations obtenues pour SD3 sont assez comparables à celles indiquées dans la littérature, pour des séquences développées à partir de matériaux homogènes (Hamer et al., 2007 ; Hong et al., 2010 ; Sheldon et Tabor, 2009)⁷³. La déviation des valeurs du profil SD3 par rapport aux matériaux morainiques ne dépasse pas + 0,4 alors même qu'elle atteint + 0,85 pour l'horizon de surface de MOR1 (Maynard, 1992). Ce résultat va dans le sens que les unités minérales de SD3, unité ocrée incluse, se sont développées à partir d'un matériau similaire. De plus, ce résultat valide l'utilisation des rapports élémentaires suivants (avec Ti) pour la comparaison de U3 et ses unités encaissantes.

Le rapport de la silice (Si) sur le titanium permet d'apprécier l'évolution des proportions totales de Si. Il inclut indistinctement le silicium des minéraux argileux et les cristaux de quartz (entre autres formes mineures). Pour les Calcosols, les proportions totales de Si sont nettement plus élevées dans les horizons Aca et Sca que dans le Cca, mais le rapport Si/Ti varie très peu entre ces derniers. Cette homogénéité suggère qu'il n'y a pas d'apports en silice éoliens additionnels aux matériaux morainiques, sinon que ceux-ci sont résiduels (Campy, 1982 ; Havlicek et Gobat, 1996). Le rapport est environ deux fois plus faible pour le profil SD3 que les Calcosols, sauf pour U8 qui montre une valeur intermédiaire. Ces valeurs varient plus finement entre les unités de SD3 : plus élevées pour U5, elles décroissent progressivement vers le haut, un net minimum est atteint pour U3, alors que les rapports sont intermédiaires en U1, U2 et U6. Les plus faibles taux de l'unité ocre pourraient correspondre à un léger déficit en alumino-silicates, comme l'indiquerait sa texture moins argileuse.

⁷³ En considérant théoriquement que les valeurs de Ti totales et Al totales correspondent essentiellement à TiO_2 et Al_2O_3 , ce qui est plus discutable pour l'aluminium (voir sur ce point la Partie 5-5.5)

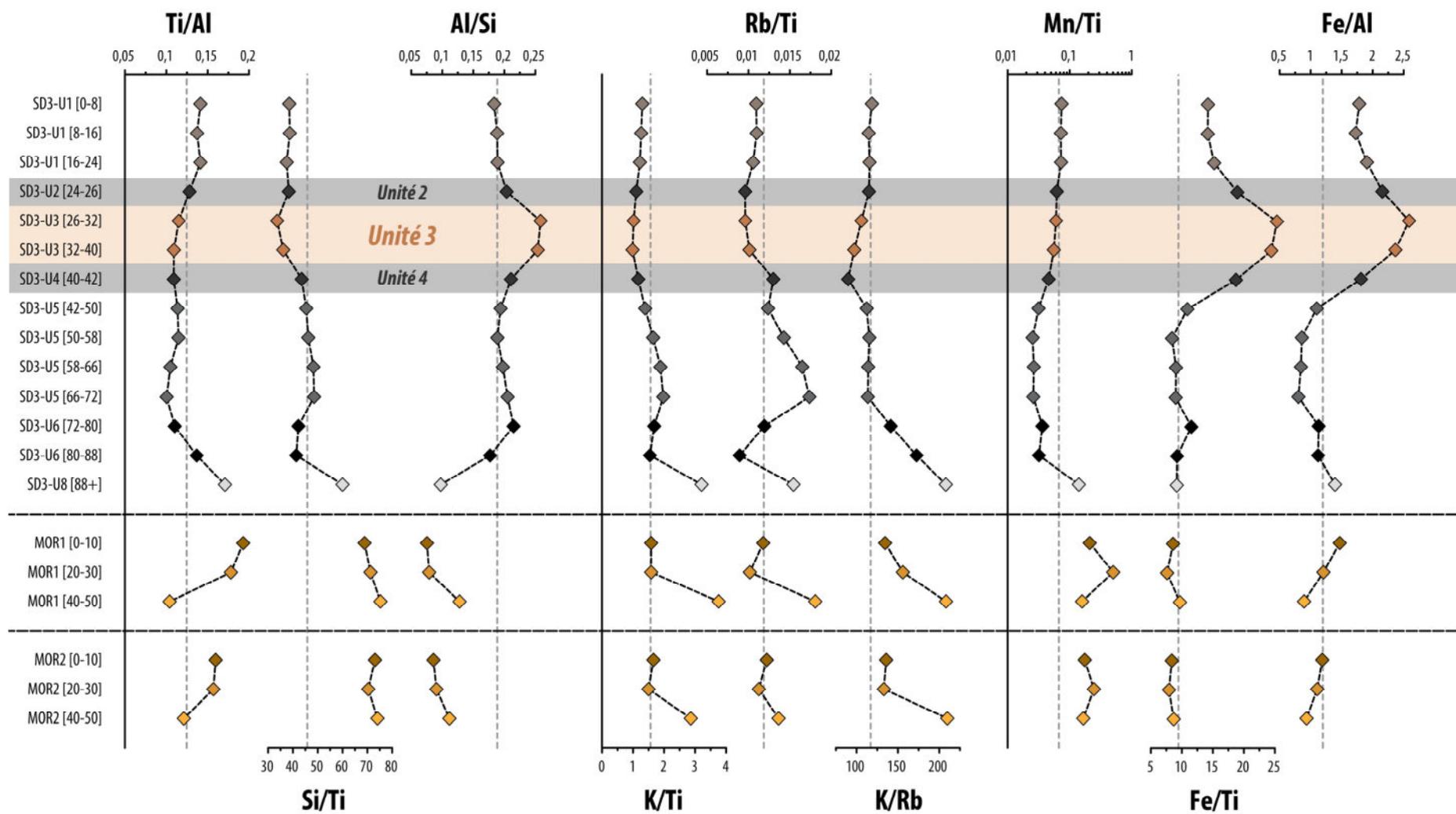


Figure 63 : Rapports élémentaires (Ti/Al, Si/Ti, Al/Si, K/Ti, Rb/Ti, K/Rb, Mn/Ti, Fe/Ti et Fe/Al) des profils de SD3, MOR1 et MOR2.

Noter que le rapport Mn/Ti est à l'échelle logarithmique. Les lignes verticales pointillées correspondent à la valeur médiane des 20 échantillons.

Le rapport Al/Si est classiquement employé pour quantifier le degré d'altération géochimique dans divers contextes, puisque au cours de l'hydrolyse des alumino-silicates (phyllosilicates, feldspaths), l'aluminium libéré est plus aisément réincorporé que la silice dans la formation des minéraux argileux secondaires (Pédro, 1979a, 1979b ; Ruxton, 1968 ; Sheldon et Tabor, 2009). Le profil 3 montre une nette individualisation de U3, avec un ratio élevé, et dans une moindre mesure des unités 4 et 2. La base de U5 et la partie supérieure des tourbes ont également des valeurs légèrement plus hautes que la médiane, qu'il est difficile d'interpréter. Au contraire, U8 et les unités des Calcosols disposent d'un rapport Al/Si très inférieur à la médiane. MOR1 montre de manière plus marquée que MOR2 un Al/Si inférieur dans les horizons Aca et Sca que dans leur matériau parental. Compte tenu des deux précédents ratios, ce résultat ne s'explique pas par un enrichissement relatif en Si allochtone. Nous l'attribuerions plutôt à un appauvrissement relatif en argiles, progressivement exportées par ruissellement (voire par une amorce de lixiviation ?), plutôt qu'à l'altération chimique. Il est également possible que l'horizon de surface Aca (faiblement carbonaté), marque une certaine acidification, plus favorable à la mobilité des ions Al^{3+} mis en solution. Enfin, concernant l'unité ocre, le rapport Al/Si élevé caractérise une altération géochimique et une argilisation nettement plus importante que pour le reste de la séquence. Contrairement aux sols sur la moraine, SD3 est situé en position topographique basse et enrichi en matériaux fins, ce qui engendre un milieu relativement confiné dans lequel l'aluminium s'est accumulé. Ce résultat est donc nettement contradictoire avec nos précédentes observations, où nous relevions le caractère nettement moins argileux (texture) de U3 en comparaison des unités U2, U4 et U5. Il ne peut pas être expliqué sur la seule base des données élémentaires.

5.1.2.2. Potassium et rubidium

Le potassium (K), dont l'origine est en général surtout liée aux minéraux silicatés primaires (micas, feldspaths), est progressivement libéré au cours de leur altération. Il est cependant rarement présent en solution, étant soit rapidement lixivié, soit refixé par certains minéraux secondaires (Robert et Trocmé, 1979). L'évolution du rubidium (Rb) est généralement similaire (tous deux sont des métaux alcalins monovalents), excepté que Rb^+ semble se fixer plus fortement à certains silicates que K^+ (Diaz, Huard et Prost, 2002 ; Kabata-Pendias, 2000). Le rapport de chacun de ces deux éléments par rapport à Ti fournit un indice de l'importance de la lixiviation (Nesbitt, Markovics et Price, 1980 ; Sheldon et Tabor, 2009 ; Bajard, Poulenc, Sabatier, Develle, et al., 2017), et le rapport K/Rb est un indicateur complémentaire intéressant (Kabata-Pendias, 2000). Les profils de K et Rb normalisés par Ti montrent les mêmes tendances : valeurs faibles autour de U3, accroissement progressif en profondeur jusqu'à la base de l'unité réductique, valeurs plus faibles dans la tourbe, et légèrement plus élevées vers l'horizon de surface. On remarque toutefois un petit effet de palier pour Rb/Ti au niveau de U4 qui montre une valeur plus élevée, que le sommet de U5. Le rapport K/Rb, très constant pour U1, U2 et U5, diminue progressivement depuis $U3_{sup}$ jusqu'à U4. Les valeurs très élevées de K/Ti dans la moraine et l'argile glacio-lacustre, et dans une moindre mesure de Rb/Ti, traduisent une abondance de minéraux primaires, non ou faiblement altérés. Les rapports K/Ti des horizons Aca et Sca des sols morainiques sont intermédiaires entre ceux de U5 et ceux des unités supérieures de U5. L'altération est donc certainement assez ménagée dans les horizons supérieurs des Calcosols. Pour SD3, l'évolution de ces ratios indique une altération chimique et une lixiviation plus importante dans la moitié supérieure du profil, et particulièrement en U3. Le comportement propre à U4, suggère une adsorption préférentielle de Rb vis-à-vis de K, ce qui serait cohérent avec la présence d'argile à propriétés gonflantes (Diaz, Huard et Prost,

2002). Au contraire pour U2, K et Rb sont en proportions plus faibles, mais avec un rapport équilibré, indiquant un appauvrissement net. Ce résultat peut être imputé à sa position supérieure à U3 dont les caractéristiques physiques sont plus favorables à la percolation (texture moins fine et structure plus poreuse).

5.1.2.3. Fer et manganèse

Le rapport Mn/Ti varie nettement sur la hauteur du profil 3 (échelle logarithmique), mais les taux de Mn mesurés sont en fait relativement faibles. Les ratios de SD3, excepté U8, sont nettement distincts de ceux des Calcosols. L'abondance du manganèse dans les matériaux calcaires est vraisemblablement liée à la présence de minéraux ferromagnésiens primaires (micas, chlorites ; Guillet et Souchier, 1979 ; Duchaufour et al., 2018). Les plus faibles valeurs des unités inférieures de SD3 (U6, U5, voire U4) marqueraient l'accroissement de l'engorgement dans ces unités (à l'état réduit, Mn est relativement plus soluble et mobile ; Guillet et Souchier, 1979 ; Retallack, 2001). Inversement, les valeurs graduellement plus élevées dans les unités supérieures (U3, U2, U1) s'expliqueraient par des conditions moins anoxiques, ou du moins plus courtes, et la plus grande abondance des matières organiques (Mathieu et Lozet, 2011). Pour les Calcosols de la moraine, leur situation stationnelle drainante explique les teneurs plus hautes que dans le sondage SD3. On relève une accumulation relative dans leur horizon Sca, avec un taux de Mn approchant les 2000 ppm pour MOR1, ce qui paraît notable (Baize, 2000, p. 140-141). Ce résultat pourrait indiquer l'appauvrissement par lixiviation de l'horizon de surface, le manganèse aurait alors été insolubilisé dans cet horizon plus carbonaté. D'autre part, on retiendra que les teintes de U4 et U2 ne peuvent donc pas être expliquées par un enrichissement relatif en cet élément. De plus, malgré le caractère « oxydé » de U3, le Mn n'est pas significativement plus abondant.

L'évolution du fer pondéré par Ti est assez différente de celle du manganèse. Les ratios Fe/Ti des différentes unités des Calcosols, ainsi que de U6 et U5, apparaissent très homogènes, alors que les teneurs en fer mesurées sont loin d'être équivalentes : les taux des matériaux glaciaires sont logiquement très faibles (< 1,5 %) en comparaison du reste de ce groupe (3-5 %). Ce résultat suggérerait, pour ces unités, une certaine stabilité chimique du fer, et une mobilité somme toute limitée. L'accroissement en fer au sein de ces horizons serait donc seulement lié aux résidus insolubles des matériaux morainiques (Havlicek, 1999). Au contraire, le rapport Fe/Ti dérive très nettement de la médiane pour les unités supérieures du sondage SD3, tout particulièrement pour U3, mais également pour U2 et U4. La déviation de Fe/Ti de U3 par rapport aux matériaux morainiques est extrêmement importante, puisqu'elle atteint + 1,9. Les taux de fer total correspondant sont effectivement très élevés : 9 % pour U2 et U4, et environ 12,5 % pour U3. Enfin, le rapport Fe/Ti de U1 est bien inférieur, mais reste tout à fait distinct de ceux enregistrés pour le premier groupe. U1 possède des taux de fer intermédiaires, d'environ 6-7 %. Les unités U2-U3-U4 présente donc un enrichissement en fer qui les distinguent indiscutablement.

Pour le profil SD3, le rapport Fe/Al montre une évolution très similaire à Fe/Ti : il est élevé pour U4 et les unités supérieures, avec un net maximum pour U3. Toute proportion gardée, on note que pour les Calcosols, ce ratio s'accroît légèrement vers le sommet des profils. Les valeurs fortes du rapport Fe/Al sont souvent associées à des horizons d'accumulations illuviales d'argiles (argiliques) ou de produits amorphes (spodiques), donc généralement associées à un horizon sus-jacent éluvial (en absence de

troncature), ou tout autrement, dans des horizons d'altération particulièrement avancés, caractéristiques des régions tropicales (voir AFES, 2009, chap. Ferrallitols et oxydisols ; et IUSS Working Group WRB, 2015, part. Horizon ferrallique ; Retallack, 2001 ; Hong et al., 2010). Dans ce contexte, et compte tenu de l'absence d'horizons dont les caractères indiquent un appauvrissement, il est difficile d'expliquer ces résultats uniquement par des processus pédologiques *in situ*. Toutefois, il y a visiblement une notable accumulation du fer dans ces unités, qui s'expliquerait (en partie) par leur position topographique basse, et une redistribution latérale du fer, depuis les terrains en amonts. De ce point de vue, l'unité ocre s'apparente effectivement à un horizon ferrique (AFES, 2009).

5.1.3. Comportement de quelques éléments traces

L'unité 3 ocrée se démarque par ces teneurs en fer, mais aussi par des teneurs assez fortes en plusieurs éléments traces minéraux (surtout As et Ni). Pour les interpréter, il est pertinent de les comparer, non seulement à l'échelle des résultats des profils pédo-sédimentaires, mais aussi aux tendances pédologiques micro-régionales (Baize, 1997, 2000). Aucune donnée n'étant disponible à notre connaissance pour le secteur de la combe d'Ain, ce sont les données statistiques des petites régions agricoles (PRA) voisines des *Plateaux moyens* et des *Plateaux supérieurs du Jura* (n°25450 et 25452) qui ont été retenues⁷⁴. Elles proviennent du programme BDETM (ADEME et Inra ; Duigou et Baize, 2010)⁷⁵. Les valeurs de quatre éléments traces métalliques (ETM) sont disponibles (Cr, Ni, Cu, Zn). Nos résultats sont comparés aux statistiques micro-régionales dans le Tableau 18. Il convient de considérer que les méthodes d'acquisition de ces données ne sont pas les mêmes. D'autre part, même si ces données ne sont certainement pas aussi pertinentes que celles de séries de sols apparentés à celui étudié, nous considérons au vu de la relative homogénéité géo-pédologique micro-régionale, qu'elles sont pertinentes. Les échantillonnages de ce jeu de données concernent surtout des sols agricoles de positions planes, en majorité de nature limono-argileuse à argilo-limoneuse.

Les résultats montrent que pour ces quatre ETM, le sondage SD3 présente des gammes de valeurs strictement plus élevées que les Calcosols. Ce schéma général évoque qu'il s'agit de différences liées à la nature des sols, et en particulier au caractère plus argileux et confiné de SD3. Les valeurs en zinc (Zn) de SD3 sont de l'ordre du dernier décile des valeurs micro-régionales. Pour le nickel (Ni), les valeurs de U4 et U2 sont de l'ordre du dernier décile et celles de U3 sont assez supérieures à ce seuil. Les taux de chrome (Cr) sont quant à eux nettement supérieurs à ce seuil dans toutes les unités supérieures de SD3. Ces éléments apparaissent donc, en particulier dans l'unité ocrée, dans des proportions que l'on peut considérer comme des anomalies à l'échelle micro-régionale (il aurait été intéressant de connaître leurs valeurs maximums, qui ne sont pas disponibles).

⁷⁴ Régions globalement comprises entre Salins-les-Bains et jusqu'à Pontarlier (Doubs).

<https://draaf.bourgogne-franche-comte.agriculture.gouv.fr/fiches-petites-regions-agricoles-r630.html>

⁷⁵ Données disponibles via le portail du Gis Sol

<https://www.gissol.fr/donnees/donnees-de-la-bdetm-2873>

Tableau 18 : tableau comparatif entre les teneurs en éléments traces métalliques (chrome, nickel, cuivre, zinc) micro-régionales et celles du sondage 3.

Données statistiques compilées depuis les bases de données BDETM des petites régions agricoles (PRA) des Plateaux Moyens (code 25450) et Supérieurs du Jura (code 25452) exprimées en mg/kg.

	Cr		Ni		Cu		Zn	
Données BDETM des plateaux moyens et supérieurs du Jura								
Identifiant INSEE de la petite région agricole	25450	25452	25450	25452	25450	25452	25450	25452
nombre d'observations	239	88	238	88	238	88	239	88
moyenne	76,4	74,0	40,0	40,2	17,7	16,7	127,0	108,3
écart-type	23,3	20,7	14,7	16,0	5,5	5,8	119,6	57,3
médiane	74,0	74,9	39,1	37,8	17,8	17,1	99,0	99,6
premier quartile (25 %)	62,4	61,4	29,5	30,8	13,7	14,2	66,8	75,5
dernier quartile (75 %)	89,4	85,8	49,9	48,9	20,9	20,2	144,0	126,0
premier décile (10 %)	51,0	43,9	21,6	23,0	11,0	8,7	53,6	55,1
dernier décile (90 %)	102,1	94,3	58,5	59,4	24,0	22,8	225,3	155,3
nombre d'outliers	3	2	1	2	3	4	16	5
Résultats p-XRF des sols de Chalain								
SD3	U1 (moyenne)	137	44	13	178			
	U2	160	57	23	174			
	U3	175-198	81-82	15	200-218			
	U4	159	60	43	185			
	U5 (moyenne)	149	43	32	162			
MOR1/2	Horizon A	91	30	9	115			
	Horizon S	105	30	2	85			
	Horizon C	39	19	0	45			

De plus, Cr, Ni et Zn apparaissent maximum dans U3 et diminuent dans les unités supérieures. Ce phénomène est a priori difficile à expliquer par un enrichissement lié à des activités agricoles ou d'autres pollutions récentes (épandages, retombées atmosphériques, etc.). De plus, le chrome et le nickel sont des ETM considérés comme presque exclusivement d'origine naturelle (Baize, 1997 ; Duigou, Baize et Bispo, 2011), ce qui indiquerait plutôt que le caractère anormal de U3 est lui aussi d'origine naturelle. Tous échantillons confondus (n = 21), on relève des coefficients de corrélation linéaire avec le fer plutôt fort pour Cr et Zn (0,77 et 0,83), et même très fort pour Ni (0,96). Ces corrélations s'expliquent par la forte similarité des propriétés géochimiques de Ni mais aussi de Cr avec Fe, sinon de la forte affinité dont dispose – en règle générale – la plupart des ions métalliques avec les oxy-hydroxydes de fer (voire d'aluminium) sur lesquels ils sont adsorbés voire se substituent au sein des réseaux des phyllosilicates (Baize, 1997 ; Kabata-Pendias, 2000). L'abondance de Ni et Cr est ainsi souvent liée aux sols et aux horizons fortement argileux (Duigou, Baize et Bispo, 2011 ; Sterckeman et al., 2006).

D'autre part, on remarque que le cobalt (Co) et l'arsenic (As) montrent une dynamique assez comparable avec ces précédents ETM (maximum en U3, diminution dans les unités supérieures ; Figure

62 et Tableau 16). Mais en l'absence de données de comparaison, nous ne pouvons pas définir s'ils sont effectivement présents dans des proportions « aberrantes ». Les taux d'arsenic de U3 pourraient tout de même correspondre à ceux de fortes anomalies naturelles (Baize, 2000, chap. 17). Le coefficient de détermination de As/Fe est assez élevé (0,91). Au contraire, on n'observe pas de corrélation pour Co/Fe ($R^2 = 0,07$) malgré sa nette concentration autour de U3, ce qui s'explique parce qu'il n'est détecté que pour quelques échantillons (et seulement avec des valeurs de quelques ppm). On note toutefois que Co, même très faible, est aussi détecté dans toutes les unités des deux Calcosols.

Toute la séquence supérieure du profil SD3 se distingue des Calcosols situés au sommet de la moraine par des taux élevés de Cr, Ni, Zn et As, que l'on peut relier à sa richesse globale en argile (Baize, 1997 ; Baize et Chrétien, 1994). Si l'on considère conjointement les variations verticales de ces éléments et les taux mesurés à l'échelle micro-régionale, seule l'unité ocrée peut vraiment être considérée comme une anomalie naturelle. Néanmoins, celle-ci n'apparaît pas comme une unité « close », puisque ses encaissants directs U4 et U2, semblent dans une moindre mesure être également enrichis. Il nous est difficile d'expliquer avec certitude l'origine de ces phénomènes. Toutefois, les taux relativement équivalents de ces ETM entre l'horizon de surface U1 et l'horizon réductique plus profond U5, vont plutôt à l'encontre d'une lixiviation verticale, qui induirait un appauvrissement parallèle en surface (Sterckeman et al., 2006). D'ailleurs, les ratios élémentaires des éléments alcalins (K, Rb) indiquent que la relative lixiviation du profil intervient surtout au détriment de U3 voire de U2, et non de U1. Compte tenu des précédents résultats, nous faisons l'hypothèse que ces anomalies résulteraient d'un enrichissement absolu et progressif conjoint à celui du fer, provenant des ruissellements latéraux, qui se seraient principalement concentrés dans l'unité ocrée. Cette hypothèse implique que U3 (et de façon moindre U2 et U4) possédait déjà des caractères particuliers favorisant la fixation du fer et de ces ETM. De plus, la possibilité qu'une altération thermique en soit la cause est envisageable (voir p. ex. l'enrichissement d'emplacements de foyers domestiques : Davidson et al., 2007 ; Wilson, Davidson et Cresser, 2009). Une autre hypothèse à celle d'un enrichissement par migration serait un accroissement lié à des apports de cendres, mais dans ce cas, nous n'expliquons pas l'important enrichissement en fer observé dans l'unité ocrée (Bodí et al., 2014 ; Terzano et al., 2021 ; Wilson, Davidson et Cresser, 2009). En outre, selon le schéma d'un enrichissement externe, la plus forte discrimination des teneurs de Ni et As en comparaison de Cr et Zn (en U3) pourrait s'expliquer par la plus forte mobilité relative des deux premiers éléments (Kabata-Pendias, 2000)

Enfin, la répartition du cuivre (Cu) se distingue clairement des précédents ETM, avec cette fois des taux minimums en U3, mais plus élevés en U2 et U4 que leurs encaissants U1 et U2. Comme nous l'avons vu, ces valeurs restent toutes très faibles par rapport aux tourbes. Hormis ces dernières, la teneur en Cu est de l'ordre (ou supérieure) au dernier décile des valeurs micro-régionales en U2, U4 et U5, alors qu'en U3 les taux mesurés sont inférieurs à la médiane. Les taux nuls à très faible enregistrés dans les échantillons de substrats morainiques sont cohérents avec sa rareté habituelle au sein des roches carbonatées (Kabata-Pendias, 2000). Contrairement aux précédents ETM, le coefficient de corrélation entre Cu et Fe est quasi nul (0,01). Celui de Cu/MO est moyennement élevé ($R^2 = 0,64$), mais il est surtout influencé par les forts taux de MO des tourbes, puisqu'il tombe à 0,16 en les excluant ($n = 19$). Cela illustre que les mécanismes dirigeant la rétention et/ou la compartimentation de Cu diffèrent juste entre matériaux organiques et minéraux (Kabata-Pendias, 2000 ; Shuman, 1979). La relative abondance de Cu dans U2 et U4 pourrait ainsi être liée à leur présence au sein des réseaux cristallins, en particulier

de minéraux aux propriétés (semi-)gonflantes (Harter, 1979 ; Mathieu et Lozet, 2011). Quant à la distinction de U3 elle pourrait être interprétée comme un appauvrissement en Cu en lien avec une altération plus poussée ou l'absence d'argiles gonflantes (Kabata-Pendias, 2000). Néanmoins, l'absence d'enrichissement en cuivre conjoint au fer reste surprenante par rapport à ce que nous avons vu dans la littérature (Baize, 1997 ; Cornell et Schwertmann, 2003). Mis à part le cas du cuivre, ces anomalies en ETM ne montrent pas de discordance fondamentale avec l'hypothèse pyrogénique.

5.1.4. Analyse statistique multivariée

Afin de tester de manière statistique le signal géochimique global propre à chaque unité, et d'appréhender la structure et la proximité des échantillons, une analyse par traitement multivarié des corrélations est pertinente. Les éléments majeurs, une sélection d'éléments traces ainsi que les taux de matières organiques (soit 16 variables) ont été traités par une analyse en composantes principales (ACP). Les échantillons du matériau morainique et du substrat glacio-lacustre ont été exclus du traitement statistique du fait de leur richesse en CaCO_3 qui contraint trop fortement la projection des échantillons faiblement ou non carbonatés (soit 18 observations). La représentation graphique des deux premières composantes calculées et les cosinus carrés des variables, qui permettent de visualiser les contributions de chaque variable pour chacun des facteurs, sont visibles en Figure 64.

Les deux premiers facteurs de l'ACP représentent un peu plus de 70 % de la variabilité calculée. On observe globalement une tripartition des échantillons avec : (a) les tourbes nettement isolées, (b) les horizons des Calcosols, et (c) tous les autres échantillons à dominante minérale qui se dispersent le long des valeurs positives du premier axe. Le regroupement des échantillons par unités pédo-sédimentaires est assez bon, bien que leur nombre soit insuffisant pour le valider statistiquement (ellipses de confiance et centroïdes). L'axe 1 oppose principalement les valeurs de Ca (11,5 %) à celles de Zn (12,0 %), Mg (11,7 %), Fe (10,9 %) et Al (9,7 %). Ainsi, les horizons encore carbonatés se différencient plus ou moins fortement des unités supérieures de SD3, et en particulier de U3 qui constitue le pôle extrême opposé. L'axe 2 discrimine clairement les tourbes, caractérisées par leurs hautes valeurs de MO (17,7 %), S (17,5 %) et Cu (14,4 %), de l'ensemble des autres échantillons, caractérisés par leurs teneurs relatives en Si (11,8 %). Quant à l'axe du troisième facteur qui représente 18 % de la variabilité totale (non présenté), il distingue d'un côté U5, U6 et SD2-U2 associés aux variables K (19,3 %) et Rb (14,1 %), et regroupe de l'autre, U2, U3 et les horizons Aca et Sca des Calcosols, associés aux variables Mn (14,1 %) et As (13,9 %). L'axe 3 oppose donc les unités marquées par des conditions anaérobiques de celles aux conditions aérobiques et plus ou moins drainantes (affectées par la lixiviation).

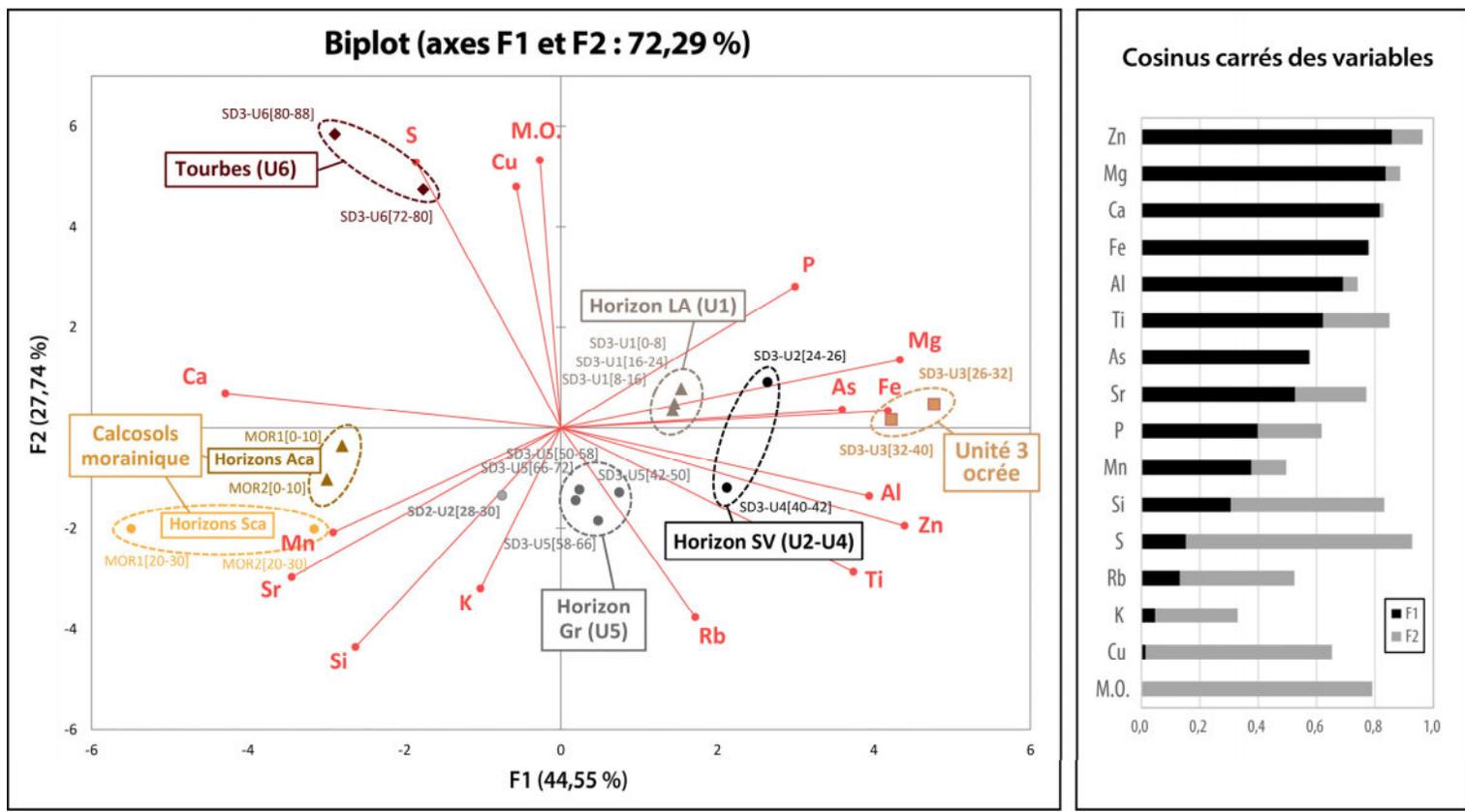


Figure 64 : Graphique des deux premiers facteurs de l'analyse en composantes principales des compositions élémentaires des échantillons de Chalain
 Les ellipses qui groupent les échantillons ne correspondent pas à un intervalle de confiance (n trop faible).

Dans le troisième groupe d'individus (c), on observe que plusieurs échantillons se rapprochent plus ou moins du centre du graphique : ceux de U5, SD2-U2 voire ceux de U1. Ces unités sont donc faiblement différenciées et leur position est moins significative que le reste des échantillons. Il est tout de même intéressant d'observer que leur répartition montre une certaine cohérence avec l'organisation stratigraphique. Le groupe de U1 est assez proche de U2, alors que celui de U5 est plus proche de U4. Le relatif écart entre les échantillons U2 et U4 est d'ailleurs notable en comparaison de la bonne circonscription des échantillons de U5 et de U1. Cela questionne la relation génétique entre ces différentes unités. Quant à SD2-U2, qui est interprété comme un événement détritique marquant qui s'intercale dans la sédimentation tourbeuse en bordure du lac, il se rapproche des colluvions réductives U5, mais en direction du pôle des Calcosols. Le signal géochimique de SD2-U2 est interprété comme celui de sédiments érodés faiblement évolués, dont le stockage dans le secteur à l'humidité plus prégnante, aurait freiné l'altération géochimique postérieure.

En définitive, la principale différence qui ressort de l'analyse des compositions géochimiques de ces séquences est celle qui oppose les horizons des Calcosols de l'unité ocrée du sondage 3. De manière assez schématique, le premier facteur de l'ACP illustre un gradient d'évolution et de différenciation pédologique croissant, depuis les horizons plus ou moins carbonatés des positions hautes, à ceux décarbonatés en contrebas, et graduellement marqué par un enrichissement relatif (et absolu) en fer et en aluminium, qui sont le siège d'une altération pédologique importante. Entre les deux extrêmes, des horizons décarbonatés, mais dont l'évolution pédologique est modérée, en lien avec un milieu confiné saturé par l'eau (horizon Gr), ou du fait d'une mise en place plus récente (horizon LA). De plus, la projection des deux premiers axes confirme les précédentes tendances, à savoir le rapprochement du point de vue élémentaire entre le complexe argileux SV et l'unité ocrée, dont les caractéristiques physiques tranchent de façon manifeste. Les compositions élémentaires globales vont plutôt dans le sens que l'unité ocre possède une filiation génétique avec le reste de la séquence supérieure de SD3, et suggère que l'acquisition d'une partie de ces caractères particuliers (c'est-à-dire outre l'enrichissement en fer et en ETM) résulte de processus autochtone.

5.2. Granulométrie

Le Tableau 19 et la Figure 65 présentent les résultats des premières analyses granulométriques des échantillons du sondage 3. Les analyses ont été réalisées par Vincent Bichet, au laboratoire Chrono-environnement de Besançon, sur un Granulomètre laser (mesures à 97 classes de particules). Le seul traitement opéré est une oxydation des matières organiques au peroxyde d'hydrogène H₂O₂.

Les encaissants U5 et U4 sont exclusivement composés d'une fraction fine (argiles et limons). Les deux échantillons de U5 se montrent très homogènes. Ils sont assez comparables à U4, mais avec quelques différences que l'on peut noter. La distribution des particules argileuses montre un léger décalage, avec un mode de 0,15-0,197 µm pour U5 et de 0,259-0,296 µm pour U4. Ce léger décalage peut correspondre à des différences d'ordre minéralogiques, auxquelles la fraction argileuse est sensible (Guillet et Rouiller, 1979 ; Hubert et al., 2012 ; Jackson et al., 1953 ; Viennet, 2015). Aussi, on note en U5 un léger épaulement dans la distribution des limons grossiers qui n'apparaît pas en U4. La variation est toutefois trop faible pour définir une population différente. D'ailleurs, le mode de la fraction limons

est équivalent pour les deux unités (7,697-8,816 μm). Selon la classification des textures de Jamagne (1967 ; dans Baize, 2000), U5 correspond à une argile limoneuse (AL) et U4, en dépassant tout juste les 45 % d'argile, se place dans le domaine des argiles lourdes (A_{LO}). Accessoirement, on notera que le RP fixe la limite minimale des horizons à propriétés vertiques à 40 % d'argile (AFES, 2009). D'un point de vue global, la granulométrie indique donc une forte homogénéité des matériaux entre U5 et U4.

En revanche, U3 se distingue clairement de ces unités inférieures. Elle possède une fraction sableuse non négligeable, quoique très inégale entre les deux échantillons (18 % en $U3_{inf}$ contre 39 % en $U3_{sup}$), et une faible proportion d'argile. Alors que les courbes des encaissants inférieurs montrent deux modes, celles de U3 sont clairement plurimodales. De plus, leur fort étalement traduit le mauvais classement de ces échantillons. D'après le diagramme textural de Jamagne, $U3_{inf}$ est classée comme limon argilo-sableux (LAS) alors que $U3_{sup}$ est un sable limoneux (SL).

Ces résultats illustrent l'hétérogénéité de la granulométrie de U3, mais cette hétérogénéité ne se limite pas à des différences de proportion dans les classes granulométriques. On remarque des divergences entre les classes dominantes propres aux silts et aux argiles. $U3_{inf}$ possède une fraction argileuse de mode comparable à U4 (0,296 μm) alors que celui de $U3_{sup}$ est plus élevé (0,389-0,445 μm), et s'écarte donc encore plus des distributions de U5 et U4. Nous pouvons observer un phénomène tout à fait similaire pour ce qui est de la fraction silteuse seule, avec une distribution principale en $U3_{inf}$ plutôt similaire à U4, alors qu'en $U3_{sup}$ celle-ci a un mode légèrement plus haut (11,565-13,246 μm) que celui de tous les encaissants (7,697-8,816 μm), et de plus elle montre une certaine asymétrie. On notera que pour $U3_{inf}$ le mode de la fraction limons (5,867 μm) est au contraire légèrement inférieur à celui des encaissants. Nous interprétons ces décalages, avec des modes plus fins en $U3_{inf}$ comme le résultat d'un lessivage des fractions fines depuis $U3_{sup}$. Résultats qui confirment ceux des ratios élémentaires alcalins (voir Partie 5.1.2.2).

L'unité encaissante supérieure U2, possède une distribution granulométrique approchant celles des encaissants U5 et U4, mais avec quelques différences. Son taux d'argile est inférieur, à environ 30 %, et, elle possède une fraction sableuse d'un peu plus de 10 % qui est distribuée dans la classe des sables fins, mais aussi celle des sables grossiers. De façon stricte, il n'est plus possible de considérer cette unité comme un horizon à propriétés vertiques. Nous interprétons la présence de ces sables du fait du mélange de particules extrêmement fines de l'unité ocrée, qui comme nous l'avons vu lors de la préparation des sédiments (maille 200 μm), peuvent être intimement mêlées avec les agrégats des encaissants. L'analyse granulométrique portant sur la fraction de terre fine totale (< 2 mm), de telles particules n'ont pu être identifiées et isolées. Dans tous les cas, ce résultat constitue une distinction importante avec l'unité inférieure 4 (dont les seuls sables fins enregistrés appartiennent à la population silteuse). D'après le diagramme des textures, U2 correspond à une AL, comme U5. Néanmoins, le mode de la fraction argile de U2 est à 0,296 μm , il se rapproche donc plutôt de l'échantillon U4 que de U5.

Ces résultats confirment que U5, U4 et U2 se sont développés à partir de matériaux globalement homogènes. Les différences perçues seraient plutôt d'ordre minéralogique (fraction argile), en relation avec l'évolution pédologique. Néanmoins, U2 possède une petite proportion de particules sableuses que l'on attribue à l'unité ocre, qui sont fortement intégrées dans la masse sédimentaire. L'exclusivité des

fractions fines des encaissants inférieurs, mais aussi la nette dominance de la fraction LF sur LG (Baize et Chrétien, 1994 ; Campy, 1982 ; Havlicek, 1999), confirme le caractère local des matériaux, transportés depuis le versant morainique par des ruissellements de faible énergie (alluvions de pente). L'importance de la fraction LF par rapport à LG est cohérente vis-à-vis des faciès granulométriques de moraine subaquatique documentés, et l'absence de matériaux loessiques allochtones (Antoine, 2002 ; Campy, 1982, p. 433-440). Il n'est cependant pas possible de préciser si les légères différences de distributions entre U5 et U4 (en particulier la fraction LG) sont directement en lien avec les matériaux amonts disponibles ou s'expliquent par des variations dans les conditions environnementales au sens large (climat, couvert végétal, états de surface, activités agricoles, etc. ; Lelong et al., 1993). Des analyses supplémentaires des sols morainiques doivent pour cela être envisagées.

Par contre, du point de vue granulométrique, U3 apparaît clairement comme une discontinuité sédimentaire. Si la présence d'une fraction sableuse est cohérente avec les observations de terrain, elle nous surprend par son importance, tout spécialement en U3_{sup}. De fait, si nous avons noté l'existence de particules apparentées à des pseudo-sables, celles-ci nous ont paru plutôt rares. De plus, les préparations pour analyses ne nous ont permis de déceler aucun sable siliceux ou calcaire, du moins pour la fraction SG, alors que celle-ci atteint 18 % en U3_{sup} d'après la granulométrie laser. Ceci confirme qu'il s'agit là de pseudo-particules n'ayant pu être dispersées par le prétraitement, mais dont l'induration reste très modérée (Baize et Chrétien, 1994 ; Vysloužilová, 2014). Compte tenu que ces pseudo-particules étaient flagrantes dans les zones marquées par des teintes rubéfiées, et de l'importance du fer total au sein de l'unité ocre, il est manifeste que ces pseudo-particules correspondent à des particules argilo(-silteuses) cimentées par des oxy-hydroxydes de fer (Baize et Chrétien, 1994 ; Mathieu et Lozet, 2011). Les dimensions de telles pseudo-particules peuvent tout aussi bien être de l'ordre des sables que des silts, ce qui expliquerait le mauvais classement des particules. Les résultats obtenus sont donc biaisés et ne permettent pas de préciser si les matériaux de U3 et ceux de ses encaissants sont effectivement homogènes. Des analyses granulométriques supplémentaires avec l'emploi de réactifs pour dissoudre les ciments ferrugineux doivent être envisagées (Guillet et Rouiller, 1979). Pour ce qui est de l'origine de ces pseudo-sables, elle peut a priori autant être d'origine pédologique (Duchaufour et al., 2018), quoiqu'un processus si marqué dans ce contexte est difficile à expliquer, ou simplement résulter d'une cuisson (p. ex. : Sertsu et Sánchez, 1978 ; Giovannini, Lucchesi et Giachetti, 1988 ; Ulery et Graham, 1993 ; Terefe et al., 2008).

Tableau 19 : Résultats des analyses granulométriques des échantillons de SD3.

Résultats exprimés en pourcentages volumiques selon les huit classes granulométriques

	Diamètre	U2 [24-26]	U3 [26-32]	U3 [32-40]	U4 [40-42]	U5 [42-50]	U5 [50-58]
Argiles	< 2 μ	30,7	9,8	26,6	46,3	42,8	44,0
Limons totaux	2-50 μ	58,1	50,8	55,3	53,4	56,4	55,3
Limons fins	2-20 μ	50,1	40,2	48,0	49,6	50,0	50,0
Limons grossiers	20-50 μ	7,9	10,6	7,2	3,8	6,4	5,3
Sables totaux	50-2000 μ	11,3	39,4	18,1	0,3	0,8	0,7
Sables fins	50-200 μ	7,0	21,4	15,0	0,3	0,8	0,7
<i>SF1</i>	50-100 μ	3,6	9,9	7,5	0,3	0,8	0,7
<i>SF2</i>	100-200 μ	3,4	11,5	7,5	0	0	0
Sables grossiers	200-2000 μ	4,3	18,0	3,1	0	0	0
<i>SG1</i>	200-500 μ	4,3	9,6	3,1	0	0	0
<i>SG2</i>	500-1000 μ	0	5,3	0	0	0	0
<i>SG3</i>	1000-2000 μ	0	3,2	0	0	0	0

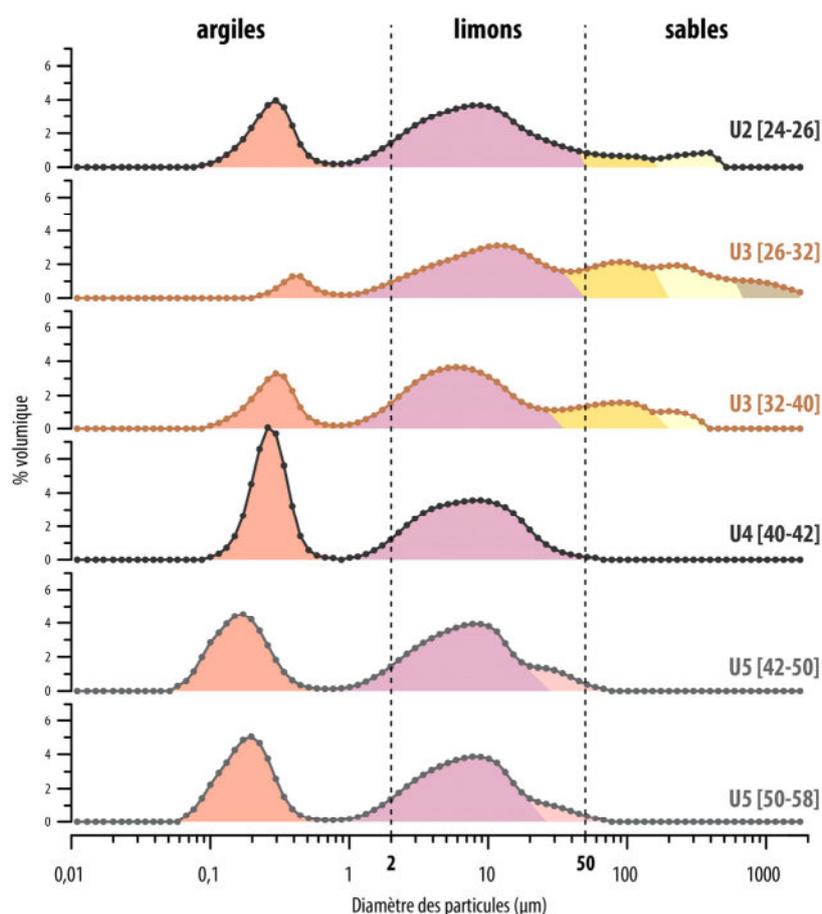


Figure 65 : Courbes granulométriques de l'unité 3 et ses encaissants.

Expression en pourcentages volumiques (non cumulés). Noter que les différentes couleurs des aires sous les courbes correspondent seulement à une interprétation visuelle de possibles sous-populations des particules.

5.3. Caractérisation minéralogique (DRX)

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X ont été réalisées sur douze échantillons des unités de SD3 et de MOR1. Une analyse pour chaque unité du sondage 3, tourbe exceptée, a été réalisée. Pour l'unité ocre, l'analyse des prélèvements pédologiques (en vrac) a été complétée par celle de trois micro-prélèvements (μp) avec différents faciès (voir leurs emplacements sur la Figure 60) : deux prélèvements ayant une teinte rouge marquée (U3.c), mais l'un avec des pseudo-sables, une microstructure sub-anguleuse et une coloration « rouille » (μp -19), et l'autre une texture plus fine et une structure continue peu différenciée (μp -22) ; le troisième est un prélèvement de la sous-unité finement bioturbée (U3.b, μp -13). Les analyses ont porté sur les fractions sédimentaires $< 200 \mu\text{m}$.

5.3.1. Identification des cortèges minéralogiques

5.3.1.1. Le matériau glacio-lacustre U8 et le Calcosol morainique

Les diffractogrammes du substrat U8 et du matériau parental de MOR1 sont de composition générale assez proche (Figure 66). Leurs cortèges minéralogiques sont nettement dominés par la calcite et montrent une présence marquée du quartz. Ce dernier est toutefois moins abondant en U8. Ils sont accompagnés de minéraux argileux, évidemment en proportion très faibles, car sans prétraitement des échantillons. Nous pouvons toutefois proposer des identifications sur la base des raies principales des principaux phyllosilicates. La biotite apparaît la mieux représentée, et notamment en MOR1-C. Des pics de diffractions minimes suggèrent aussi de l'illite et/ou un minéral apparenté aux chlorites (voir partie suivante). Aucun modèle d'illite ne se montre vraiment satisfaisant vis-à-vis des raies secondaires de forte intensité (pas seulement à cause de leur superposition à celles de la calcite et du quartz). L'illite et la biotite sont tous deux des phyllosilicates appartenant aux micas, et possèdent une forte proximité structurale (Wilson, 1999 ; Thompson et Ukrainczyk, 2002 ; Duchaufour et al., 2018). Si la biotite est un minéral primaire, l'illite, fait référence à des particules de micas extrêmement fines (nanométrique), divisées par l'altération, et peut être considéré comme un minéral secondaire. Tous deux sont relativement communs dans les faciès marneux et calcaires régionaux (Martignier, 2013). Malgré leur faible proportion relative, ces minéraux micacés primaires (ou peu altérés) sont importants, car ils sont facilement altérés en conditions superficielles, et constituent les principaux précurseurs des minéraux secondaires (Wilson, 1999). Ces deux échantillons montrent également la présence de kaolinite, uniquement définie par son pic principal à $12,5^\circ$.

L'horizon Sca de MOR1 présente une très forte abondance du quartz. Celui-ci est plus de quatre fois plus abondant que dans l'horizon Cca. La calcite est encore clairement identifiable, mais dans des proportions bien moindres, entre $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$ par rapport à Cca, ce qui est assez cohérent avec les précédents résultats. Parmi les phyllosilicates, on retrouve de manière extrêmement ténue les minéraux micacés (biotite, et peut-être de l'illite), et une légère oscillation à hauteur de la raie principale de la kaolinite. Par rapport aux deux échantillons précédents, on observe un pic à $20,0^\circ$ relativement mieux développé, qui indique la présence d'autres phyllosilicates. Il est interprété comme indice de minéraux apparentés à des chlorites secondaires. On remarque aussi une oscillation vers $34,8\text{-}35,0^\circ$ qui correspond certainement à de la magnétite (oxyde de fer Fe_3O_4 possédant Fe^{2+} et Fe^{3+}) sinon de titanomagnétite

(son dérivé avec des substitutions de Fe^{3+} par Ti). La (titano)magnétite n'est pas identifiée dans les diffractogrammes de SD3-U8 et MOR1-C, mais il est certain que, si elle était effectivement présente, elle serait en quantité non détectable dans ces matériaux carbonatés. Néanmoins, nous n'avons pas connaissance de l'existence de magnétite primaire dans les formations géologiques affleurantes. Par contre, c'est un oxyde très courant qui peut se former dans les sols (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Maher et Taylor, 1988). De plus, on observe d'autres pics à $24,2^\circ$, $25,4^\circ$ et $27,6^\circ$ que l'on peut associer à des feldspaths (Harris et White, 2008 ; Havlicek, 1999). Le pic en particulier bien développé à $27,6^\circ$ ($3,23 \text{ \AA}$) indiquerait plutôt des feldspaths potassiques (orthoclase/microcline). Il semble qu'ils soient aussi présents en trace dans l'horizon Cca. L'interprétation du petit pic à $25,4^\circ$ en tant que feldspath n'est pas aussi tranchée. Il pourrait éventuellement s'agir d'anatase, un oxyde de titane (TiO_2), mais nous ne savons pas si ce minéral est représenté dans les substrats géologiques régionaux (il serait présent dans le Jurassique d'après Antun [1953] dans Beiner et al., 2009).

5.3.1.2. Les encaissants de U3

Les unités encaissantes de l'unité 3 (U1, U2, U4 et U5) montrent des diffractogrammes globalement assez proches (Figure 67). Les courbes de diffraction de U5 et de U1 sont quasiment superposables. Les cortèges minéralogiques de ces différents encaissants sont dominés par le quartz, dans des proportions équivalentes ou un peu supérieures à MOR1-C, soit quatre fois moindres que pour MOR1-S. Toute proportion gardée, U5 est légèrement plus riche en quartz que les encaissants supérieurs. Parallèlement, et compte tenu de l'absence de calcite, les minéraux argileux sont nettement mieux représentés que dans le précédent groupe d'échantillons. On retrouve la kaolinite, toujours en proportion faible, mais bien identifiable. Et, on identifie maintenant de la vermiculite. Il est difficile d'estimer sa proportion par rapport aux autres phyllosilicates puisque sa raie principale est située à un angle de diffraction aigu, où elle se détache peu de la ligne de base (Harris et White, 2008). Cependant, entre les différents échantillons, on observe qu'elle est mieux marquée tel que suit : $U4 > U5-U1 > U2$.

Le pic vers $20,0^\circ$, déjà relevé sur le diffractogramme de MOR1-S, est présent avec une intensité très forte. Aucun minéral de référence satisfaisant pour l'expliquer n'a été trouvé. Il a été associé sans certitude à du chloritoïde, un minéral peu courant, mais dont la structure est apparentée aux micas et plus particulièrement au groupe des chlorites⁷⁶. Les chlorites peuvent être primaires, celles-ci sont en conditions superficielles généralement assez vite altérées (Ross et Kodama, 1976 ; Wilson, 1999). Cependant, elles peuvent aussi résulter de la pédogenèse (chlorites secondaires), ou elles forment alors des édifices relativement plus stables (Barnhisel et Bertsch, 1989 ; Jackson, 1962 ; Kohut et Warren, 2002 ; Pédro, 1979a ; Wilson, 1999). Ces chlorites secondaires résultent souvent d'une transformation des vermiculites avec formation d'un feuillet supplémentaire constitué d'hydroxydes d'aluminium ou de fer. Dans les sols, les formes intermédiaires sont fréquentes, avec des substitutions par des cations Al^{3+} ou Fe^{3+} (ou polymères) entre les feuillets de vermiculites, mais qui ne forment alors pas une

⁷⁶ Le chloritoïde n'est pas d'un minéral courant, et il est associé à des séries géologiques métamorphiques (Halferdahl, 1961). Il fut un temps classé avec les chlorites (Bailey, 1975 ; Liou et Chen, 1978). Il est aujourd'hui classé parmi les (sub)nésosilicate, mais il est parfois considéré comme un phyllosilicate et rattaché aux micas durs magnésiens. Il possède une structure organisée en feuillets, mais ses groupes tétraédres sont indépendants (Bailey, 1975 ; Mackenzie, 1975).

véritable couche continue d'hydroxydes. Ces édifices, qui sont dits *intergrades*⁷⁷, se trouvent sous des dénominations variées dans la littérature, p. ex. pseudo-chlorites ou vermiculites hydroxy-alumineuses. Du fait de la grande variété des substitutions chimiques qui peuvent intervenir, ces chlorites pédogénétiques (et leurs *intergrades* associés) ont des structures cristallographiques variées, difficiles à identifier, qui ne correspondent pas aux modèles réguliers des phyllosilicates « classiques » (Bailey, 1975 ; Kohut et Warren, 2002 ; Meunier, 2007). Ce schéma nous paraît le plus à même d'expliquer l'impossibilité de relier ce pic à une référence cohérente de la base de données COD. En attendant des futures analyses sur les fractions argileuses, nous considérons que le pic de diffraction vers 20,0° indique la présence de minéraux chloritiques secondaires au sens large.

On ajoutera, entre autres anomalies incertaines, la présence d'oscillations mal définies entre 17,7° et 18,7° environ, plus particulièrement en U1 et U2. On peut supposer qu'elles participent à une composante micacée, mais ces pics ne sont pas aussi clairs que pour MOR1-C (pic secondaire d'illite), et, ils ne sont pas associés à d'autres pics caractéristiques. La présence de gibbsite, oxyde d'aluminium, dont le pic majeur est à 18,3° (4,85), a été envisagée, mais les conditions édaphiques ne sont, de prime abord, pas favorables à la formation de ce minéral (Macías Vazquez, 1981 ; Huang et al., 2002). Néanmoins, ils pourraient être liés à la présence des chlorites secondaires ou des édifices *intergrades* avec les vermiculites (Baize, 2018, chap. 15).

De plus, les unités encaissantes montrent toutes de la (titano)magnétite, très bien exprimée, et légèrement plus importante en U5 et U1 que U4 et U2. Dans l'unité 4 et celles supérieures, on relève l'apparition de goethite (oxyhydroxyde de fer α -FeOOH). Elle est plutôt bien identifiable malgré que sa raie de diffraction principale soit proche de raies associées à la kaolinite et d'un pic important de quartz, formant un épaulement peu individualisé. La faible présence de goethite en U1 (outre les minéraux incertains), est le seul caractère qui la distingue vraiment de U5. Des feldspaths résiduels pourraient également expliquer quelques oscillations irrégulières, mais celles-ci sont nettement moins claires que dans l'échantillon MOR1-S. La même remarque peut être faite quant à la présence d'anatase.

5.3.1.3. L'unité ocre

Les diffractogrammes des échantillons ocrés se distinguent clairement des unités encaissantes, par une absence et une moins bonne représentation des précédents minéraux. Hormis pour l'échantillon de U3.b, la vermiculite et la kaolinite sont absentes. Le pic associé aux minéraux de type chlorite est toujours présent, mais il est beaucoup plus faible que dans les encaissants. En outre, il est remarquable qu'il n'y ait aucune augmentation relative d'un ou des autres minéraux identifiés, ou de nouvelles structures cristallines, par rapport aux unités encaissantes. Le quartz en particulier possède des pics dans

⁷⁷ Les édifices dits *intergrades* sont formés d'un seul type de feuillet ayant des espaces interfoliaires avec une composition originale, où leur compensation n'est pas assurée par les alcalins et alcalino-terreux habituels (K, Na, Ca, Mg), mais par des cations moins basiques comme Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , qui pourront se polymériser, mais qui ne forment pas encore de véritables hydroxydes. Il en résulte des comportements considérés comme anormaux, intermédiaires entre ceux des chlorites et des phyllosilicates expansibles (Mackenzie, 1975 ; Pédro, 1979a). Les édifices dits *interstratifiés* sont quant-à-eux constitués par l'empilement de plusieurs types de feuillets, ou, d'un seul type de feuillet avec plusieurs types d'espaces interfoliaires (Mackenzie, 1975 ; Pédro, 1979a).

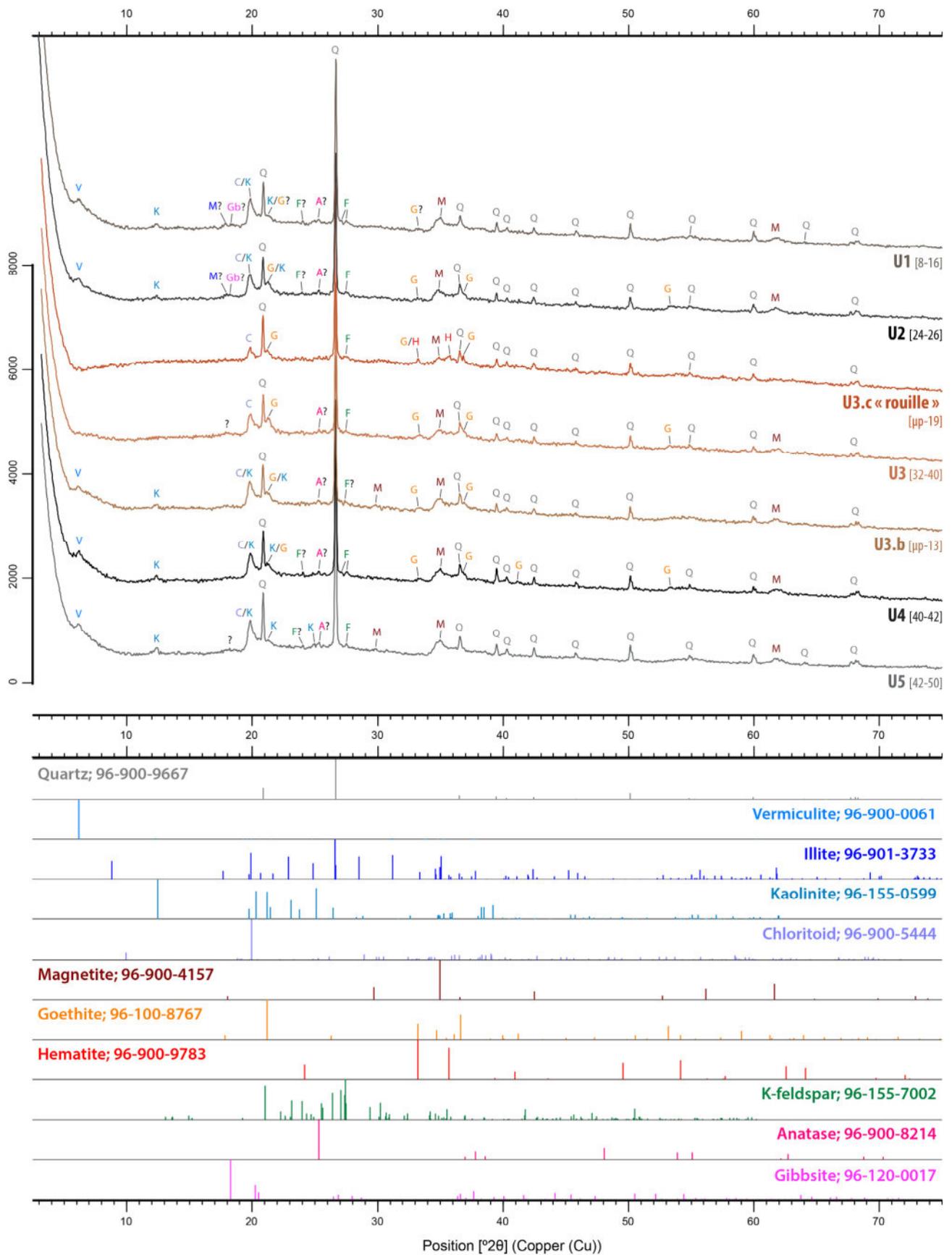


Figure 67 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des unités encaissantes U1, U2, U4, U5 et de trois échantillons représentatifs de l'unité ocrée $U3_{inf}$ [32-40], $\mu\text{p-13}$ [U3.c] et $\mu\text{p-19}$ [U3.b].

Le micro-prélèvement de l'unité U3.b fait figure d'exception, puisqu'il présente bien de la kaolinite et de la vermiculite, mais en proportions assurément plus faibles. Son pic de type chlorite est quant à lui bien développé. Les comparaisons par paires des diffractogrammes révèlent que cet échantillon est quasi similaire à celui de l'encaissant U2, qui comme nous l'avons vu possède un pic de vermiculite réduit en comparaison des autres encaissants. De plus, contrairement aux autres échantillons de l'unité ocre, la magnétite est très bien définie.

Enfin, nous observons dans l'échantillon U3.c. de teinte « rouille » ($\mu\text{p-19}$), la présence très discrète d'hématite (oxyde de fer $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Celle-ci est difficile à identifier, car son pic principal à $33,2^\circ$ se superpose à un pic secondaire de la goethite. Néanmoins, pour cet échantillon, ce pic apparaît très net et aigu – ce qui traduit un meilleur ordre cristallin – alors que le pic majeur de la goethite est plus faible que dans les autres échantillons. Ceci, ajouté à l'individualisation d'un léger pic vers $35,7^\circ$, confirme qu'il existe une petite proportion de cristaux d'hématite. La présence de maghémite (oxyde de fer $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) a été envisagée, puisque sa principale raie de diffraction se situe au même angle que la raie secondaire, mais forte de l'hématite à $35,7^\circ$. Mais aucun pic secondaire ne supporte cette hypothèse⁷⁸. Ajoutons par ailleurs, que la présence de lépidocrocite (du moins en quantité détectable) est rejetée par l'absence de son pic d'intensité principal vers $14,1\text{-}14,3^\circ$ ($6,2 \text{ \AA}$).

5.3.2. Synthèse des cortèges minéralogiques et implications relatives au développement des séquences pédo-sédimentaires

Le Tableau 20 présente de manière synthétique les résultats des analyses DRX. L'abondance des minéraux identifiés est une interprétation qualitative, qui repose sur la confrontation, d'une part, entre l'intensité des pics des différents minéraux identifiés, et d'autre part, entre chaque diffractogramme.

5.3.2.1. Le Calcosol morainique

Les assemblages minéralogiques identifiés dans les deux échantillons glacio-lacustres (U8 et MOR1-C), sont cohérents avec ceux des principaux substrats calcaires et marno-calcaires de la région (Campy, 1982 ; Martignier, 2013 ; Michalet et Bruckert, 1986 ; Mouchet, 1995 ; Pochon, 1975). Sans avoir réalisé d'analyses sur les résidus insolubles, nous pouvons identifier la – inévitablement – très faible présence de minéraux micacés primaires ou faiblement altérés (biotite/illite) et de kaolinite. Ceux-ci sont hérités des matériaux calcaires de la moraine. Dans l'horizon Sca du Calcosol, la proportion de minéraux argileux reste très faible et comparable à celle de l'horizon Cca, malgré une décarbonatation avancée. Néanmoins, on observe des différences de représentation entre ces phyllosilicates. Dans

⁷⁸ Précisons que, la proximité entre les structures cristallines de la magnétite et de la maghémite semble souvent limiter leur distinction (Cornell et Schwertmann, 2003, chap. 7.8 ; Maher, 1998 ; Mullins, 1977). Les diffractogrammes de référence de maghémite (et de titanomaghémite) sont tous très homogènes, contrairement à ceux des magnétites, qui montrent entre eux des décalages de leurs angles d'incidence principaux atteignant $0,5$ à plus de $1^\circ 2\theta$ (le décalage s'accroissant vers les angles plus élevés). Or, dans le cas des échantillons de Chalain, nous identifions un modèle cristallin de magnétite qui s'écarte nettement de celui de la maghémite. On peut faire l'hypothèse que ce décalage soit lié à des substitutions de cations dans leur structure, la magnétite ayant la capacité d'en incorporer une plus grande variété, et en particulier des éléments dont on a vu l'importance générale (ETM ou non, p. ex. Al^{3+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} ; Cornell et Schwertmann, 2003, chap. 3 et Tab. 3.2).

MOR1-C, ce sont les argiles micacées qui sont bien représentées alors que dans MOR1-S, ce sont les minéraux chloritiques. Il y a donc dans l'horizon structural Sca, un début de transformation des argiles micacées (biotite/illite) en chlorites secondaires.

Tableau 20 : Synthèse des cortèges minéralogiques identifiés du sondage 3 et du Calcosol morainique 1.
 Les variations de certains minéraux accessoires et mal définis ne sont pas considérées (feldspaths, anatase).
 Interprétation du degré d'abondance relatif : +++ ou ++++ : forte à très forte

++ : moyenne
 + : faible
 (+) : assez/très faible (pics potentiels ou mal définis)
 - : non identifié

Échantillon et prof.		Quartz	Calcite	Biotite / Illite	Kaolinite	Type-Chlorite	Vermiculite	(Titano)Magnétite	Goethite	Hématite
SD3	U1 8-16	+++	-	-	+	+++	+	++	(+)	-
	U2 24-26	+++	-	-	(+)	++	(+)	+	+	-
	U3 26-32	+++	-	-	-	++	-	(+)	++	-
	U3 32-40	+++	-	-	-	++	-	(+)	++	-
	U3.c [µp-19]	+++	-	-	-	+	-	(+)	(+)	(+)
	U3.c [µp-22]	+++	-	-	-	++	-	+	+	-
	U3.b [µp-13]	+++	-	-	(+)	++	(+)	+	+	-
	U4 40-42	+++	-	-	(+)	++	++	+	+	-
	U5 42-50	+++	-	-	+	+++	+	++	-	-
U8 88+	++	++++	(+)	(+)	(+)	-	-	-	-	
MOR1	Sca 20-30	++++	+	(+)	(+)	+	-	(+)	-	-
	Cca 40-50	+++	++++	+	(+)	(+)	-	-	-	-

La faible proportion des phyllosilicates vis-à-vis du quartz implique qu'ils jouent un rôle négligeable dans l'évolution du rapport Si/Ti. De plus, les diffractogrammes indiquent la présence de feldspaths potassiques, que l'on trouve dans les faciès géologiques jurassiques et crétacés, mais pas de plagioclases (feldspaths de types calco-sodiques), qui sont absents de ces faciès (Havlicek et Gobat, 1996 ; Jouaffre, 1989 ; Martignier et al., 2015 ; Pochon, 1978). Ces observations confirment l'absence de dépôts loessiques allochtones additionnels aux matériaux morainiques.

La plus grande proportion de feldspaths dans l'horizon Sca paraît s'expliquer par la seule augmentation relative du résidu de la décarbonatation, tout comme le quartz. Ce phénomène expliquerait également l'identification de l'anatase, s'il s'agit effectivement de ce minéral, par l'augmentation relative de Ti dans l'horizon Sca. Ceci étant, nous expliquerions le fait que la proportion

des minéraux argileux ne soit pas plus importante dans l'horizon S que dans C, par un faible lessivage vertical, comme le suggère les ratios élémentaires. Il serait pertinent d'échantillonner des prélèvements en blocs orientés pour rechercher en lame mince des traits d'illuviations qui le confirmeraient.

D'autre part, bien qu'elle ne soit que mollement définie, la magnétite est présente dans l'horizon Sca. Le plus vraisemblable est que sa formation soit concomitante à l'altération de la biotite, riche en fer bivalent, qui, progressivement libéré et oxydé au cours de l'altération peut précipiter de manière privilégiée en magnétite, car cette dernière a la particularité d'être formée à la fois de Fe^{2+} et de Fe^{3+} (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Farmer et al., 1971 ; Wilson, 1970, 1999). D'un point de vue général, on peut considérer que les caractéristiques de l'horizon Sca indiquent une altération somme toute relativement ménagée, ce que l'on explique par la persistance de l'influence du calcium, limitant l'acidification et l'altération des silicates.

5.3.2.2. Les encaissants de U3

Par rapport aux précédents échantillons, les unités supérieures de SD3 qui encadrent U3 sont constituées d'une plus forte proportion de matériaux très fins, ce qui se transcrit logiquement par une meilleure représentation des minéraux argileux. De surcroît, ils se dissocient nettement de par leur composition. Les minéraux micacés primaires sont absents, excepté une présence possible (en trace) dans les deux unités de surface, ce qui est cohérent avec la présence de quelques graviers calcaires en U1. Ces minéraux ont donc largement été altérés et transformés en vermiculite et en d'autres phyllosilicates, ayant selon toute évidence une structure cristalline apparentée à celles des chlorites (Wilson, 1999). La formation des vermiculites depuis les minéraux micacés est aisée, car elle advient suite au remplacement des ions interfoliaires K^+ par des cations hydratés échangeables (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+}). La formation des chlorites secondaires se fait en milieu confiné, souvent à partir des vermiculites (sinon d'autres édifices interstratifiés expansibles) qui sont d'un point de vue structurel relativement moins stable. Cette transformation s'opère par la précipitation progressive de cations hydroxylés (principalement de Al^{3+} , Fe^{3+}) ou plus ou moins polymérisés (pseudochlorites, vermiculites/chlorites alumineuses) allant jusqu'à former des couches d'hydroxydes continus (chlorites secondaires au sens strict). Cette série évolutive caractérise un degré d'altération croissant par rapport aux vermiculites, puisqu'elle nécessite un apport d'hydroxydes, soit d'origine externe via l'hydrolyse d'autres minéraux alumineux (p. ex. illites et feldspaths), soit *in situ* via la décomposition des feuillets du silicate même (Kohut et Warren, 2002 ; Vicente, Razzaghe et Robert, 1977 ; Wilson, 1999). Le développement de ces édifices chloritiques secondaires est favorisé, entre autres conditions, par des cycles d'humectation/dessiccation réguliers (Rich, 1968 ; Mitsuchi, 1974 ; Egli et al., 2002 ; Georgiadis et al., 2020). Ces conditions sont cohérentes avec la situation de SD3, en position topographique basse, où une recharge en calcium est assurée via les écoulements à travers les matériaux carbonatés amonts (limitant l'acidification). Ainsi, la très bonne représentation des pics attribués à la vermiculite et au minéral type-chlorite, de quelque manière qu'il se présente réellement (intergrades alumineux ? interstratifiés vermiculite-chlorite ?), suggère une transformation progressive des minéraux primaires, sans néoformation à strictement parler. Cette évolution traduit une altération dominante de type bisiallisation par hydrolyse partielle des constituants (Pédro, 1979a, 1979b).

Les encaissants possèdent tous de la (titano)magnétite dans des proportions notables. À l'exception de l'unité réductrice U5, de la goethite est identifiée, mais dans des quantités moindres. Ces deux minéraux sont présentement issus de la pédogenèse. Néanmoins, leur formation suit des voies différentes, de telle manière que les transformations de l'un à l'autre minéral requièrent une séquence complexe de processus, qui est peu susceptible de se produire dans les conditions naturelles (Lagroix, Banerjee et Jackson, 2016). Bien que tous deux soient courants en contexte climatique tempéré humide, leur formation est en quelque sorte compétitive vis-à-vis des conditions du milieu, la magnétite serait favorisée par des phases de réductions intermittentes plus marquées (Maher, 1998). D'autre part, si la goethite est particulièrement stable (Bigham, Fitzpatrick et Schulze, 2002 ; Cornell et Schwertmann, 2003), la magnétite est généralement très sensible à la dissolution en conditions anaérobiques (Fischer, Luster et Gehring, 2008 ; Grimley et Arruda, 2007 ; Grimley et Vepraskas, 2000 ; Hanesch et Scholger, 2005 ; Williams, 1992). La relative abondance de la magnétite en U5 et l'absence de goethite est en accord avec les caractéristiques réductrices de cette unité. Les conditions anaérobiques dominantes (qui n'excluent pas des périodes d'assèchement) et le milieu ambiant basique ont favorisé la formation de magnétite et limité sa dissolution (Grimley, Arruda et Bramstedt, 2004 ; Maher, 1998). Le développement de la goethite en U4, U2 et U1, traduit de fait des conditions relativement plus oxydantes, influencées par la proximité de la surface (pour U1) et possiblement par une meilleure porosité en U3 (pour U2-U4).

5.3.2.3. L'unité ocre

La très faible proportion de minéraux argileux apparaît comme un caractère discriminant majeur de l'unité 3 (à l'exception du micro-prélèvement de U3.b, point discuté plus bas). Cela, d'autant plus que l'on n'observe aucune augmentation parallèle significative d'un ou plusieurs autres minéraux, en particulier le quartz. Cette observation, conjointement à l'absence de minéraux micacés ou de minéraux distincts de ceux que nous avons identifiés jusqu'à présent, va à l'encontre de l'hypothèse de matériaux exogènes ou de colluvions dont les matériaux résulteraient d'un stade de pédogenèse distinct.

L'absence d'augmentation relative des autres minéraux s'oppose également à un transfert de matériau à la seule échelle des unités pédo-sédimentaires (voir p. ex. Van Ranst et al., 2011). De plus, l'absence de kaolinite – identifiée même en trace dans les échantillons carbonatés – est diagnostique, puisque c'est un phyllosilicate peu mobile et surtout très stable, qui n'est normalement pas altéré dans les conditions climatiques qui nous concernent (Pochon, 1975 ; White et Dixon, 2002 ; Mathieu et Lozet, 2011). Ainsi, les spectres de diffractions de U3 donnent l'impression d'un « effacement » de la phase minéralogique argileuse. Si, certains processus pédologiques peuvent effectivement entraîner une destruction des minéraux argileux⁷⁹, ils ne sont pas cohérents avec les caractéristiques de la séquence étudiée. Nous sommes dans l'incapacité d'expliquer ces observations uniquement par des processus naturels d'ordre pédologique.

⁷⁹ On pense notamment à une attaque par des composés organiques complexants en milieu acide (acido-complexolyse), comme dans le cas d'une podzolisation (AFES, 2009) ; ou encore au processus dénommé ferrololyse mais qui est aujourd'hui nettement remis en question par certains auteurs (Brinkman, 1970 ; Van Ranst et al., 2011 ; Van Ranst et De Coninck, 2002).

Par contre, ces résultats peuvent s'expliquer de manière tout à fait rationnelle par l'hypothèse de la chauffe. Avec l'augmentation des températures, les argiles vont subir une déshydratation puis une déshydroxylation, résultant en l'effondrement progressif de leurs structures cristallines. Ce phénomène se marque en DRX par la disparition des pics associés aux phyllosilicates (Cultrone et Carrillo Rosua, 2020). Dans le cas des vermiculites, les espaces interfoliaires étant constitués de cations hydratés, leur structure s'effondre généralement suite à leur déshydratation, en règle générale complètement vers 300°C (Ma et al., 2019). Néanmoins, il faut envisager un rang de températures plus élevé au cas où elles possèderaient des couches interfoliaires hydroxylées (Harris et al., 1992 ; Karathanasis, 2008). La kaolinite, quant à elle, subit une déshydroxylation entre 400 et 600°C (Karathanasis et Hajek, 1982 ; Karathanasis, 2008). Quant aux chlorites et leurs intergrades hydroxylés, leurs gammes de températures de déshydroxylation semblent grandement varier selon leur structure spécifique : entre 400 et 750°C (Ross et Kodama, 1976 ; Zhan et Guggenheim, 1995 ; Kohut et Warren, 2002 ; Karathanasis, 2008 ; Georgiadis et al., 2020). De plus, la décomposition de certains hydroxy-interfoliaires peut se manifester en plusieurs étapes, ce qui peut entraîner, selon les températures atteintes, une décomposition seulement partielle de ces édifices (Karathanasis, 1988 ; Kohut et Warren, 2002). L'absence de vermiculite et de kaolinite en U3, alors que le type-chlorite est seulement moins abondant, est donc tout à fait cohérente avec une hypothèse pyrogénique. Ces résultats indiqueraient que des températures d'au moins 400°C ont été atteintes et soutenues en U3. Par ailleurs, puisque le quartz est en quantité tout à fait comparable entre U3 et ses encaissants, cela indique que l'abaissement en silicium enregistré en U3 serait lié à une perte en Si des structures effondrées des phyllosilicates.

La formation d'hématite dans les sols (excluant donc un héritage) est en règle générale, liée à des conditions climatiques à la fois chaudes et à fort contraste saisonnier (Guillet et Souchier, 1979 ; Schwertmann, 1993 ; Cornell et Schwertmann, 2003). Toutefois, le développement d'hématite dans les conditions climatiques de l'Holocène a déjà été mis en évidence dans le massif jurassien (Jouaffre, 1989 ; Schwertmann, Murad et Schulze, 1982 ; Guenat, 1987 ; Gobat et Guenat, 2019, p. 112 et 257-258). Il est alors lié à des conditions stationnaires particulières, où un substrat perméable permet un drainage fort et une dessiccation rapide de certains horizons, dans un milieu suffisamment riche en fer, proche de la neutralité et pauvre en matière organique complexante (Jouaffre et al., 1991 ; Schwertmann, Murad et Schulze, 1982 ; Lamouroux, 1972). Ce phénomène est démontré dans des situations de plateaux calcaires durs et fortement fracturés ou de moraines à dominante gravelo-sableuse. Les conditions topographiques et pédoclimatiques de SD3 sont donc a priori peu compatibles avec le développement pédogénétique d'hématite. Sa présence semble donc être un autre bon critère d'une chauffe.

L'hématite peut être produite, dans des conditions de chauffes oxydantes, à partir de précurseurs comme la magnétite ou la goethite. La goethite peut se transformer en hématite par déshydroxylation, entre environ 250 et 400°C (Norrish et Taylor, 1961 ; Schulze et Schwertmann, 1984 ; Ruan, Frost et Klopogge, 2001 ; Karathanasis, 2008 ; Zhou et al., 2010 ; Brodard, 2013). Toutefois, le développement de cristaux d'hématite pleinement ordonnés semble souvent précédé, à des températures inférieures à 600°C environ, par des formes faiblement cristallines (ou microcristallines) qualifiées de pré- ou protohématite (Wolska et Schwertmann, 1989 ; Gualtieri et Venturelli, 1999 ; Cornell et Schwertmann, 2003, part. 14.2 ; Lamouroux, 1972 ; Peterson et al., 2015). Quant à la magnétite, elle nécessite des températures supérieures à 300-400°C pour être oxydée en hématite, avec parfois un développement de

maghémite en phase intermédiaire (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Mullins, 1977). En conditions réductrices, la formation de maghémite est plutôt favorisée par des températures basses, inférieures à 300°C ; au-delà et jusqu'à 600°C environ, c'est la production de magnétite qui est favorisée (à partir de la maghémite ou de l'hématite ; Brodard, 2013).

Cela étant, l'hématite n'est identifiée que dans un seul échantillon ($\mu\text{p-19}$) et dans des proportions relativement faibles. D'autre part, elle l'est dans un faciès particulier, qui est secondaire en termes de volume/surface, à l'échelle globale de U3. La dominance générale de la goethite en U3 et la présence de (titano)magnétite, alors même que l'absence de kaolinite et la diminution des minéraux chloritiques caractérisent des températures ayant dépassé les 400°C, semble donc contradictoire (puisque leurs seuils de déshydroxylation théoriques sont inférieurs). Ce résultat suggère, selon l'hypothèse thermique, que la goethite et la magnétite se seraient développées postérieurement. Néanmoins, on peut tout de même se demander si dans des conditions naturelles, une cuisson à un seuil proche de 400°C aurait pu engendrer un effondrement des structures cristallines des argiles et n'affecter que moindrement celles des oxy-hydroxydes de fer (Hanesch, Stanjek et Petersen, 2006 ; Jordanova et al., 2018). De plus, puisque l'hématite est un oxyde particulièrement stable, le fait qu'elle ne soit pas identifiée dans les prélèvements pédologiques U3_{inf} et U3_{sup} va dans le sens que les températures de chauffe seraient restées, de manière globale, inférieures à 600°C.

Compte tenu de nos résultats, nous envisageons deux scénarios vis-à-vis de la présence d'hématite : (1) l'hématite a été produite lors d'une chauffe, mais les conditions de cette dernière (température, durée, « organisation », etc.) n'ont engendré que de faibles quantités, ou localisées en des surfaces réduites ; (2) L'hématite n'est pas directement liée à la chauffe, mais elle s'est développée dans des microsites favorables à partir de précurseurs (oxydes amorphes ou plus faiblement cristallisés) générés par la chauffe (ferrihydrite ? protohématite ?).

Compte tenu de la relative complexité morphologique de U3, les deux hypothèses ne s'excluent pas l'une l'autre. Une autre hypothèse envisageable est qu'une plus grande proportion d'hématite aurait initialement été formée, mais qu'elle aurait subi une dissolution préférentielle hormis dans des microsites favorables. Cette dernière hypothèse nous paraît cependant moins pertinente, car même si l'hématite produite par la chauffe est plus instable du fait de défauts dans sa cristallisation, on identifie bien la magnétite dont la propension à la dissolution est supposée nettement supérieure (Biggam et al., 1991 ; Cornell et Schwertmann, 2003, part. 12.4). Puisque l'hématite est présente dans un faciès qui diffère remarquablement du reste de U3, et dont les caractéristiques nous évoquent un lien avec des phénomènes redox (texture plus sableuse, induration, (micro)porosité accrue, et liée à des fissurations prolongées dans le profil), la seconde hypothèse serait plutôt privilégiée (Michalet, Guillet et Souchier, 1993). Nous faisons l'hypothèse que les fissurations prolongées du profil lors de phases d'assèchement auraient accéléré le ressuyage autour de ces zones, la réduction de l'activité hydrique aurait ensuite favorisé la cristallisation d'hématite, à partir d'autres oxydes de fer formés lors de la chauffe.

Par ailleurs, les caractéristiques de l'échantillon U3.b sont intéressantes, car cette sous-unité est plutôt bien représentée à l'échelle de l'unité ocrée. La présence des phyllosilicates pourrait résulter d'un mélange fin de matériaux de U3 avec des sédiments encaissants. Elle pourrait également s'expliquer par des altérations thermiques d'intensité réduite en comparaison de U3.a et U3.c. Cependant, les

résultats montrent que les proportions relatives de vermiculite et des minéraux chloritiques de U3.b sont équivalentes à celles de l'encaissant U2. Ce résultat est interprété comme une intégration très fine de constituants argileux désordonnés de U3 en U2, qui réduisent de manière relative l'importance de la phase argileuse bien cristallisée. Cela rejoint les résultats de l'analyse granulométrique, et suggère une remobilisation de U3 lors de la mise en place ou du développement de U2. Enfin, pour ce qui est de U4, les cortèges minéralogiques, et en particulier la bonne représentation de la vermiculite, tendent à réfuter l'hypothèse d'une chauffe, ou du moins qu'elle aurait été trop faible pour que l'on puisse la détecter. La présence de goethite dans cette dernière pose toutefois question sur son origine, et précisément si celle-ci provient de U3 ou si sa formation est antérieure.

5.4. Susceptibilité magnétique et spectrocromimétrie

5.4.1. Susceptibilité magnétique

Le Tableau 21 présente les résultats de la susceptibilité magnétique (SM) et de la colorimétrie. La Figure 68 montre les résultats de la SM mesurée (a) sur le profil Est de SD3 et (b) sur les échantillons pédologiques de la totalité du profil. Les prises de mesure réalisées sur le terrain ont été ciblées sur différentes sous-unités de U3 et ses encaissants U1, U4 et U5. Nous n'avons pas analysé U2, puisque son caractère résiduel sur cette coupe ne permettait pas un prélèvement satisfaisant. Les points mesurés ont ensuite été échantillonnés en vue d'analyses complémentaires (micro-prélèvements « μp »).

Les valeurs obtenues sur le terrain pour U3 s'étalent sur une large gamme (4 à 288×10^{-5} uSI), mais elles sont toujours supérieures à celles des unités encaissantes ($< 2 \times 10^{-5}$ uSI). Cela vaut pour U4 (les 5 points qui moulent la base de l'unité ocre, Figure 68), dont les valeurs toutes très faibles sont du même ordre que celles des unités encaissantes U1 et U5. Les résultats des prélèvements pédologiques montrent que U3 se distingue sans conteste, avec des valeurs au moins dix fois supérieures au reste du profil. Toute proportion gardée, les encaissants U4, U2 et U1 montrent un comportement magnétique plus élevé que les unités hydromorphes inférieures.

À l'échelle de l'unité ocre, il existe sur ce profil une très forte hétérogénéité de la SM. Deux points montrent des valeurs très élevées (288 et 186×10^{-5} uSI). Ils sont situés sur des zones dont les teintes sont nettement plus rouges (U3.c), d'aspect rouille, et où des pseudo-agrégats indurés anguleux sont concentrés et bien repérables. La troisième mesure de cette sous-unité a donné en comparaison un résultat très modéré de 26×10^{-5} uSI (μp -22). Elle est située sur une petite surface clairement rouge, mais dont la structuration n'est pas micro-agrégée comme les précédentes, et n'a pas livré de pseudo-agrégats indurés (du moins ils n'ont pas pu être identifiés).

Aucune logique de répartition évidente de la susceptibilité ne ressort des mesures de terrain. La moyenne des mesures de terrain sur U3 est de 52×10^{-5} uSI ($n = 13$) ce qui est plutôt proche des résultats obtenus pour les prélèvements pédologiques ($65-70 \times 10^{-5}$ uSI). Toutefois, il faut prendre en compte plusieurs aspects. D'une part, l'échantillonnage de terrain n'a pas été systématique (mais ciblé) et les conditions de mesures entre terrain et laboratoire diffèrent (humidité résiduelle, densité). D'autre part, il existe probablement une certaine variabilité des mesures liée à la profondeur d'investigation du

capteur et à l'hétérogénéité en profondeur des points testés, qui reste difficile à estimer (Brodard, 2013, p. 207-211). Donc, même si les échantillons pédologiques correspondent à un signal « moyen », puisque réalisé sur un volume homogénéisé, la cohérence entre les mesures de terrain et celles sur sols préparés doit être relativisée. En tout cas, les mesures directement sur coupes apportent des renseignements supplémentaires importants aux mesures sur prélèvements homogénéisés, que sont les valeurs localement très élevées et la grande hétérogénéité de la SM interne de l'unité ocre, au moins sur ce profil.

Bien qu'il n'existe donc pas de seuils fixes à partir desquels on puisse assurer de la chauffe d'un matériau, les susceptibilités magnétiques très élevées ($> 100 \times 10^{-5}$ uSI) sont souvent interprétées comme le fait d'altérations thermiques (Hulin, Broes et Fechner, 2012 ; Hulin, Prilaux et Talon, 2014 ; Brodard, 2013 ; Chianese et al., 2004). En U3, seuls deux points de mesures nous ont donné des valeurs aussi élevées. Néanmoins, le degré de différenciation entre ces valeurs maximales, les valeurs moyennes des échantillons pédologiques de U3, et d'autre part, celles des matériaux glacio-lacustres et des horizons d'altérations, est particulièrement élevé (environ 10 à plus de 100 fois plus élevées). Un tel degré de différenciation magnétique (Maher, 1998), conjointement à la forte hétérogénéité des résultats, nous paraît peu justifiable, du seul fait d'un enrichissement pédogénétique, par transformation ou accumulation relative de minéraux magnétiques (Fine et al., 1989 ; Singer et Fine, 1989 ; Maher, Thompson et Zhou, 1994 ; Grimley et Vepraskas, 2000 ; Hanesch et Scholger, 2005 ; Jordanova, 2017).

5.4.2. Colorimétrie

Les résultats colorimétriques présentés dans le Tableau 21 montrent qu'il existe un certain décalage entre les résultats obtenus pour les encaissants selon les types de prélèvement analysés (pédologiques/micro-prélèvements). Il apparaît ainsi que les micro-prélèvements ne sont pas strictement différenciés selon les paramètres colorimétriques, en fonction des sous-unités pédo-sédimentaires auxquelles ils ont été attribués. Pourtant, la colorimétrie a été réalisée dans les mêmes conditions de laboratoire. Nous les attribuons à des hétérogénéités intra-unitaires, conséquence des petits volumes échantillonnés. Ce phénomène n'est toutefois pas aussi perceptible pour les échantillons de U3. La Figure 69 présente deux projections spatiales des échantillons selon les variables du système colorimétrique CIELAB. Ce système étant une projection en 3D, les deux graphiques doivent être considérés conjointement pour intégrer la totalité de la variabilité colorimétrique des échantillons. En plus des résultats obtenus pour les prélèvements pédologiques, nous avons ajouté pour U3, ceux des micro-prélèvements ainsi que des mesures réalisées sur blocs indurés. Précisons que les mesures sur blocs indurés n'ont pas été systématiques, mais visaient à documenter la forte variabilité de couleur visible à l'œil nu. De plus, nous avons également figuré dans le graphique (b), les données obtenues pour des goethites et des hématites synthétiques, exprimées selon le même système, publiées dans Cornell et Schwertmann (2003, p. 132).

Tableau 21 : Résultats des mesures de susceptibilité magnétique et des paramètres colorimétriques CIELAB des échantillons pédologiques (SD3, MOR1, MOR2 et SD2) et des micro-prélèvements « µp » (SD3) de Chalain.

ID	SM (10 ⁻⁵)	L*	a*	b*	Fe	Fe/Ti
SD3-U1 [0-8]	3,1	35,76	4,7	15,52	6,63	14,22
SD3-U1 [8-16]	2,4	35,8	4,61	15,34	6,73	14,18
SD3-U1 [16-24]	3,8	33,97	5,01	15,81	7,27	15,21
SD3-U2 [24-26]	5,5	34,8	4,66	17,14	9,07	18,95
SD3-U3 [26-32]	64,6	45,11	10,71	30,97	12,86	25,34
SD3-U3 [32-40]	70,1	46,95	9,94	30,55	12,17	24,42
SD3-U4 [40-42]	3,2	32,26	3,79	14,31	9,11	18,71
SD3-U5 [42-50]	1,9	34,12	3,75	11,89	5,33	10,89
SD3-U5 [50-58]	1,1	41,5	3,04	12,07	3,97	8,42
SD3-U5 [58-66]	1,5	41,3	3,12	12	4,09	9,05
SD3-U5 [66-72]	1,5	38,99	3,39	11,25	3,87	9,01
SD3-U6 [72-80]	0,9	26,44	2,99	8,56	3,90	11,53
SD3-U6 [80-88]	0,6	24,42	2,63	7,2	3,19	9,23
SD3-U8 [88+]	0,4	74,65	0,68	15	1,00	9,18
MOR1 [0-10]	4,9	40,68	5,61	19,86	3,31	8,58
MOR1 [20-30]	5,5	48,82	4,91	22,78	2,94	7,63
MOR1 [40-50]	0,6	76,59	0,94	21,2	1,26	9,69
MOR2 [0-10]	4,3	45,24	4,77	19,4	3,31	8,38
MOR2 [20-30]	7,7	45,15	6,65	25,01	3,36	7,94
MOR2 [40-50]	0,9	75,59	1,58	22,69	1,36	8,69
SD2-U2 [28-30]	2,6	36,41	4,07	11,95	3,62	7,14

ID	SM (10 ⁻⁵)	L*	a*	b*
U1 [µp-1]	1,6	24,56	2,58	8,29
U1 [µp-2]	0,9	24,14	2,98	8,59
U1 [µp-3]	0,8	22,42	2,29	7,81
U5 [µp-4]	0,4	27,26	2,42	6,6
U5 [µp-5]	1,2	29,54	3,18	9,05
U5 [µp-6]	0,4	28,07	1,56	6,59
U4 [µp-7]	0,8	22,73	2,75	5,65
U4 [µp-8]	1,1	25,49	2,68	7,94
U4 [µp-9]	0,8	21,11	2,33	6,17
U4 [µp-10]	1	23,9	2,92	7,56
U4 [µp-11]	0,8	25,55	2,94	7,93
U3.a [µp-12]	28,2	39,06	8,94	24,33
U3.a [µp-14]	5,3	36,63	7,03	20,59
U3.a [µp-16]	15,3	36,61	8,85	23,49
U3.a [µp-17]	27,5	48,82	7,84	28,31
U3.a [µp-18]	17,7	38,15	8,76	26,13
U3.a [µp-20]	15,8	42,34	8,13	27,11
U3.a [µp-23]	45,4	39,85	11,35	28,36
U3.b [µp-13]	3,7	39,86	9,09	24,74
U3.b [µp-15]	12,9	32,65	7,2	19,71
U3.b [µp-24]	6,6	43,98	7,34	26,21
U3.c [µp-19]	288,2	39,6	10,01	24,77
U3.c [µp-21]	185,9	43,24	11,23	28,46
U3.c [µp-22]	26,3	44,71	13,2	29,35

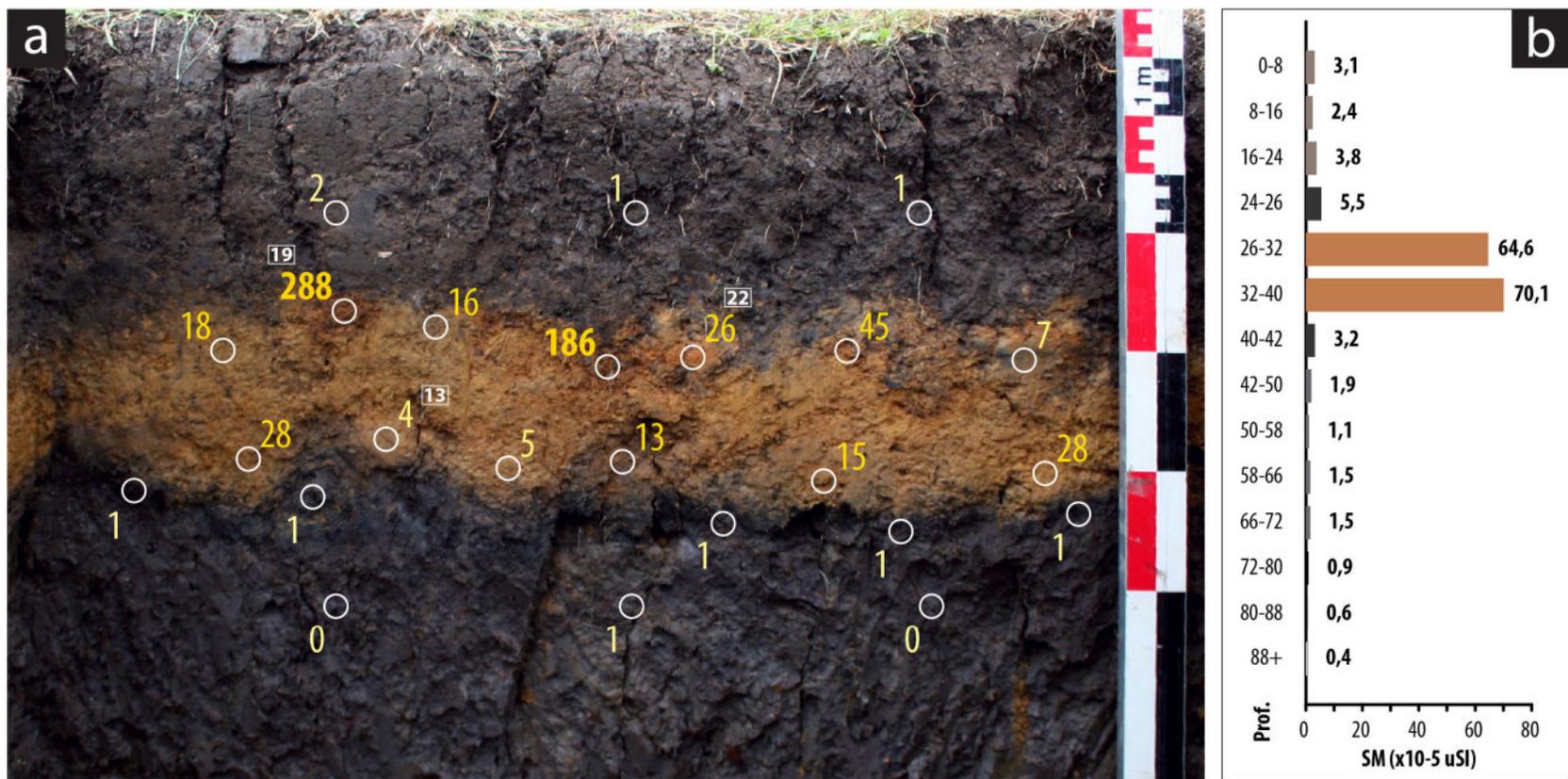


Figure 68 : Mesures de susceptibilité magnétique ($\times 10^{-5}$ uSI) du sondage 3.

(a) Mesures réalisées en différents points ciblés (cercles) sur le profil Est de SD3. Les trois numéros dans les encarts blancs sont les identifiants des micro-prélèvements analysés en DRX (μp 13, 19, 22).

(b) Mesures réalisées sur les prélèvements pédologiques préparés ($< 200 \mu\text{m}$) de la totalité des unités du profil SD3.

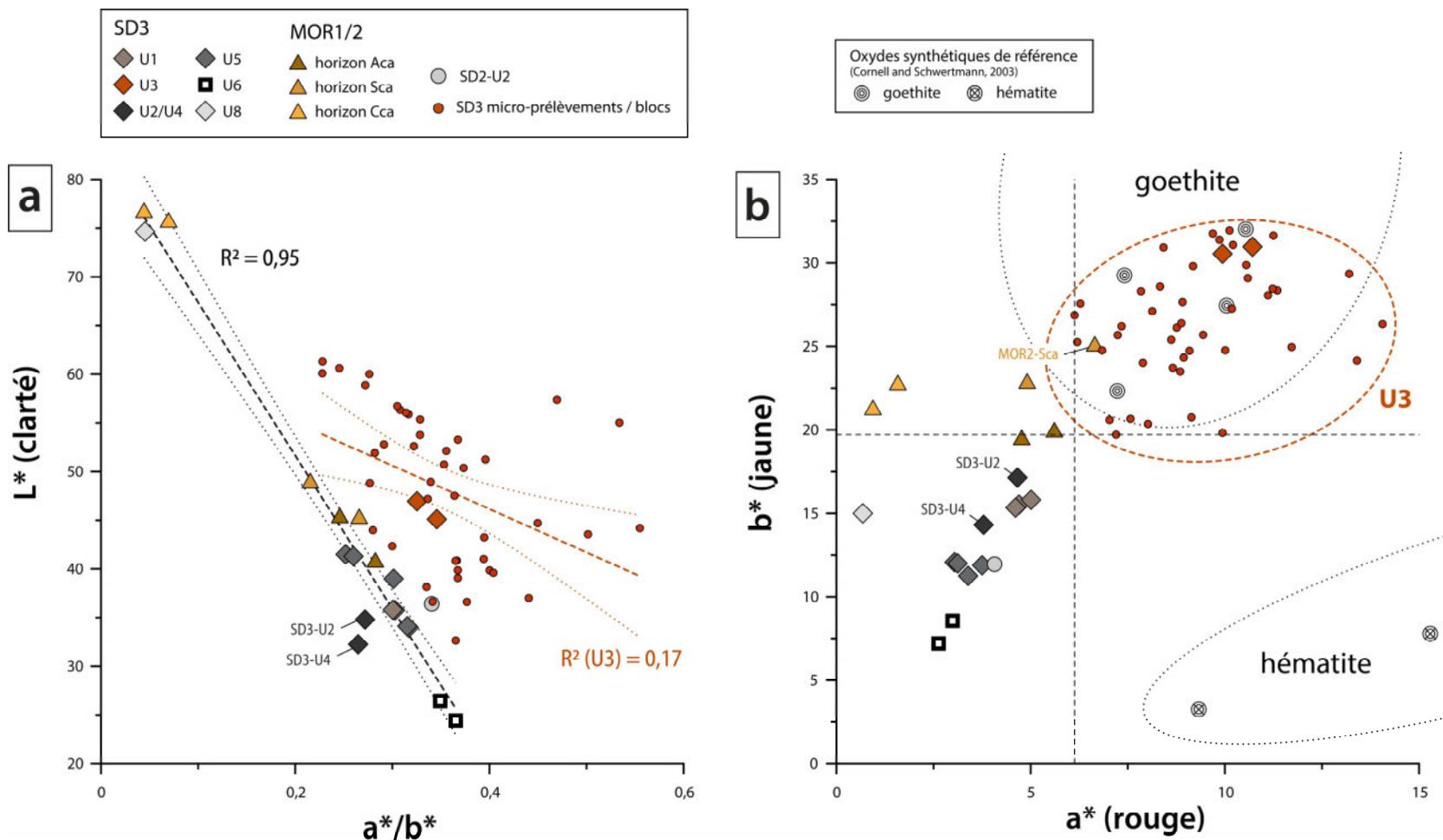


Figure 69 : Graphiques relationnels des paramètres colorimétriques des sols de Chalain.

(a) Graphique du ratio a^*/b^* en fonction de L^* .

(b) Graphique du chroma a^* en fonction de b^* . Les deux lignes de grille (pointillées) correspondent aux minimums de U3. L'ellipse de U3 n'est pas statistique. Les ellipses des oxydes synthétiques sont ouvertes, car elles comprennent les échantillons hors graphique.

Sur le graphique (a), on observe logiquement une forte discrimination des échantillons glacio-lacustres carbonatés (blanchâtres) et des tourbes (noirâtres), par rapport au reste des individus. Hormis les substrats et les tourbes, la clarté ne permet pas de discriminer U3 des autres échantillons. Si l'on exclut les échantillons de U3, on observe une très bonne corrélation linéaire ($R^2 = 0,95$; $n = 19$) entre l'indice de la teinte (ratio a^*/b^*) et la clarté. Les unités U2 et U4 s'en écartent légèrement du fait de teintes tirant légèrement vers le jaune, mais avec une clarté très faible. Peut-être que cela traduit une influence très discrète de la goethite (non visible à l'œil nu), malgré leur caractère global très sombre. Sur cet aspect, U2 et U4 s'opposent clairement avec les échantillons de U3, qui se placent tous à l'opposé de la courbe de tendance linéaire des encaissants. Ainsi, pour une clarté équivalente, les points de U3 montrent un caractère rouge (a^*) clairement plus accusé que les échantillons de référence. Les échantillons de U3 considérés isolément ont une forte dispersion et ne montrent aucune relation significative entre L^* et a^*/b^* . Ce résultat illustre assez bien l'aspect bariolé de l'unité 3.

Sur le graphique (b), qui permet de visualiser l'évolution des teintes seules, le regroupement des échantillons par unités est correct (U1, U5, U6). Il est moindre pour les horizons Sca des deux Calcosols. La teinte jaune discrimine mieux les horizons pédo-sédimentaires (hors substrats) que la teinte rouge, qui varie assez peu entre ces derniers. Ceux-ci ont une bonne corrélation linéaire, avec un coefficient de détermination de 0,84 ($n = 16$). Si l'on considère également $U3_{inf}$ et $U3_{sup}$ la corrélation est mieux ajustée selon une fonction logarithmique, avec un R^2 de 0,92 ($n = 18$). Les échantillons pédologiques $U3_{inf}$ et $U3_{sup}$ s'écartent largement de toutes les autres unités par leurs hautes valeurs a^* et b^* . Pris globalement, ceux des micro-prélèvements et les points des blocs indurés de U3 se distinguent aussi. Leur répartition illustre l'étendue de la gamme des couleurs au sein de l'unité ocre. Comme sur le graphique (a), il n'existe aucune corrélation significative entre a^* et b^* pour les individus de U3 seuls (R^2 linéaire = 0,11 ; $n = 45$). Néanmoins, il faut considérer que cette variabilité a une valeur qualitative, ponctuelle. Ainsi, le décalage des deux échantillons pédologiques vers le haut de l'ellipse (vers les valeurs b^* maximums) marque bien l'importance de la teinte jaune dans le faciès général de U3. De manière plus détaillée, comme le montre l'axe minimum correspondant (axe horizontal), plusieurs individus de U3 ont des teintes jaunes équivalentes à celles des Calcosols. Il s'agit autant de points rattachés aux sous-unités U3.a que U3.b. Sur l'axe a^* , les individus se confondent seulement avec l'horizon Sca de MOR2. On retiendra donc que la teinte rouge, bien qu'elle varie dans des proportions moindres que la teinte jaune, discrimine néanmoins mieux U3 des autres échantillons.

D'autre part, la comparaison avec les valeurs des oxy-hydroxydes de synthèse montre que la majeure partie de l'ellipse de U3, échantillons pédologiques compris, se superpose à celle des goethites. Sur l'axe a^* uniquement, plusieurs individus s'écartent du pôle des goethites, avec des valeurs de l'ordre de celles des deux hématites synthétiques. En considération des observations minéralogiques, ces résultats suggèrent qu'il peut y avoir de l'hématite en faible proportion dans quelques échantillons. Globalement, les résultats colorimétriques confirment que les couleurs de U3 sont principalement régies par la dominance de la goethite sur l'hématite, ce qui est tout à fait cohérent avec les couleurs décrites dès la phase de terrain comme ocrées (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Guillet et Souchier, 1979). Néanmoins, la colorimétrie démontre que l'importance de la teinte rouge est loin d'être négligeable. Outre la grande variabilité des colorations de U3, on observe qu'elle s'écarte du modèle relationnel général mis en évidence pour les autres unités de SD3 et de MOR1-2. Nous interprétons ces résultats

comme des indices contraires à l'hypothèse que les colorations de U3 puissent résulter d'une évolution pédologique seule.

5.4.3. Spectres de réflectance

La Figure 70 présente les courbes des dérivées premières moyennées, des spectres de réflectances du domaine visible (400-700 nm), obtenues pour U4, les deux échantillons pédologiques de U3, et les trois mesures acquises sur U3 ayant les plus fortes teintes rouges (a^* maximum, voir Figure 69.b).

Hormis un important épaulement à hauteur des basses longueurs d'onde, U4 présente un profil assez monotone. Cette signature spectrale est documentée pour de l'illite et de la montmorillonite (Debret et al., 2011). En considération des résultats DRX, il pourrait éventuellement être associé à la vermiculite. L'absence de variations spécifiques aux longueurs d'onde élevées ne permet pas d'associer la présence de matières organiques (> 605 nm ; Balsam et Beeson, 2003 ; Debret et al., 2011). De plus, on remarque pour U4 que la goethite ne peut être identifiée alors qu'elle est bien visible sur les spectres de DRX.

Pour les échantillons pédologiques de U3, les deux pics centrés autour de 535 et 435 nm, démontrent l'influence dominante de la goethite sur le spectre de couleur (Barranco, Balsam et Deaton, 1989 ; Deaton et Balsam, 1991 ; Zhou et al., 2010). Néanmoins, la raie à 435 nm est généralement d'intensité secondaire par rapport à la première, ce qui peut indiquer une superposition d'un ou d'autres constituants (voir p. ex. Ji et al., 2005). En outre, il est envisageable que d'autres oxy-hydroxydes puissent jouer sur les réflexions proches du pic principal de la goethite (ferrihydrite ?), mais d'après les DRX, à part la magnétite et la goethite, aucun autre n'est identifié (Barranco, Balsam et Deaton, 1989 ; Scheinost et al., 1998). Le rehaussement de la première dérivée à 575 nm sur les échantillons U3_{inf} et U3_{sup} indiquerait qu'ils possèdent également de l'hématite (Deaton et Balsam, 1991 ; Zhou et al., 2010). Bien que nous n'ayons pu identifier de l'hématite dans ces derniers échantillons avec la DRX, ce résultat n'est pas contradictoire puisque sa réflectance spécifique permet son identification à des seuils très faibles et inférieurs à ceux de la DRX (de l'ordre de 0,1 % en poids pondéral, voire jusqu'à 0,01 % ; Deaton et Balsam, 1991 ; Zhou et al., 2010). De plus, contrairement à la goethite, aucun autre oxy-hydroxyde de fer courant n'interfère avec l'hématite.

La moyenne des dérivées des échantillons rougeâtres se distingue des échantillons pédologiques par des valeurs élevées entre 545 et 575 nm. Cela caractériserait un mélange de goethite et d'hématite (Madeira et al., 1997), cette dernière étant relativement plus abondante, par rapport aux échantillons pédologiques. Les spectres de réflectance sont donc cohérents avec l'identification de l'hématite dans les échantillons de teintes rouges marquées, mais ils permettent aussi de la déceler dans les échantillons pédologiques homogénéisés, bien qu'elle soit vraisemblablement dans des quantités extrêmement faibles.

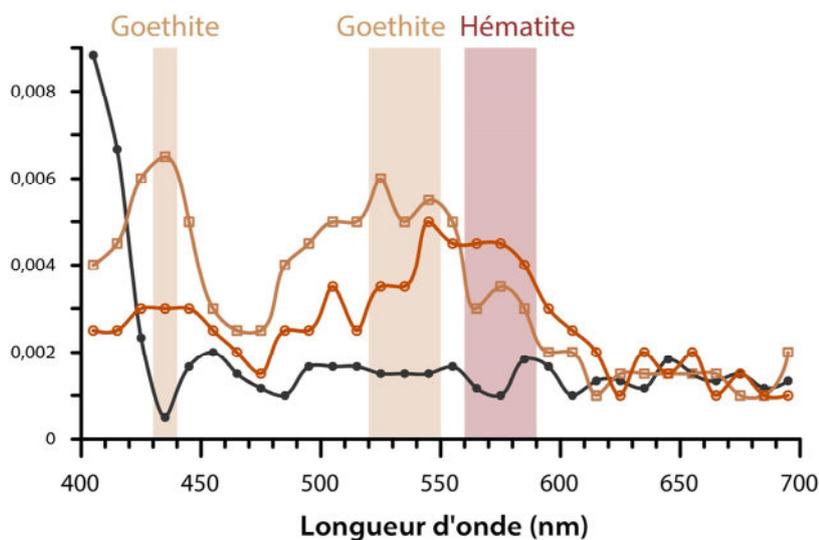


Figure 70 : Sélection de courbes moyennées des premières dérivées des spectres de réflectance du domaine de lumière visible, représentatives de U3 et de U4.

5.4.4. Relations entre la susceptibilité magnétique, la teinte rouge et le fer

La Figure 71.a présente les résultats de la susceptibilité magnétique en fonction du fer total normalisé par Ti. La corrélation entre ces deux paramètres pour les prélèvements pédologiques est moyenne, avec un coefficient de détermination linéaire à 0,60 ($n = 21$). De plus, cette relation est largement influencée par les valeurs extrêmes de U3. Sans ces prélèvements, que ce soit avec une fonction linéaire ou logarithmique, le R^2 dégringole sous 0,10 ($n = 19$). Il n'y a donc pas de relation statistique significative entre les deux. Au-delà du fait que les horizons que nous avons analysés sont de nature très variable (moraine, tourbe, etc.), ce résultat confirme que la quantité totale de fer – si celui-ci est disponible en quantité suffisante, ce qui est visiblement le cas ici – n'est pas un facteur déterminant du développement ou non des particules ferrimagnétiques (Maher, 1998 et la littérature associée ; Thompson et Oldfield, 1986).

Dans les sols, la susceptibilité magnétique est le plus communément reliée à la présence de deux oxydes de fer, qui sont la magnétite et la maghémite. Du fait de leur comportement (ferrimagnétique), elles possèdent une susceptibilité magnétique spécifique très forte, et largement supérieure à celle de la goethite ou de l'hématite (comportement dit antiferromagnétique canté), d'un ordre de grandeur 100 à 1000 fois supérieur (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Maher, 1998 ; Mullins, 1977). Ainsi, leur présence est déterminante, car même à des concentrations très faibles (relativement ou non à d'autres oxydes) elles orientent le magnétisme général d'un matériau (Cornell et Schwertmann, 2003). Ainsi, que cela soit au fur et à mesure du développement pédologique ou par le biais d'une chauffe, la susceptibilité peut s'accroître ou au contraire s'amoinrir (Maki, Homburg et Brosowske, 2006 ; Brodard, 2013 ; Maher, 1998 ; Torrent, Barrón et Liu, 2006). Dans les deux cas, les conditions d'oxydo-réduction semblent déterminantes.

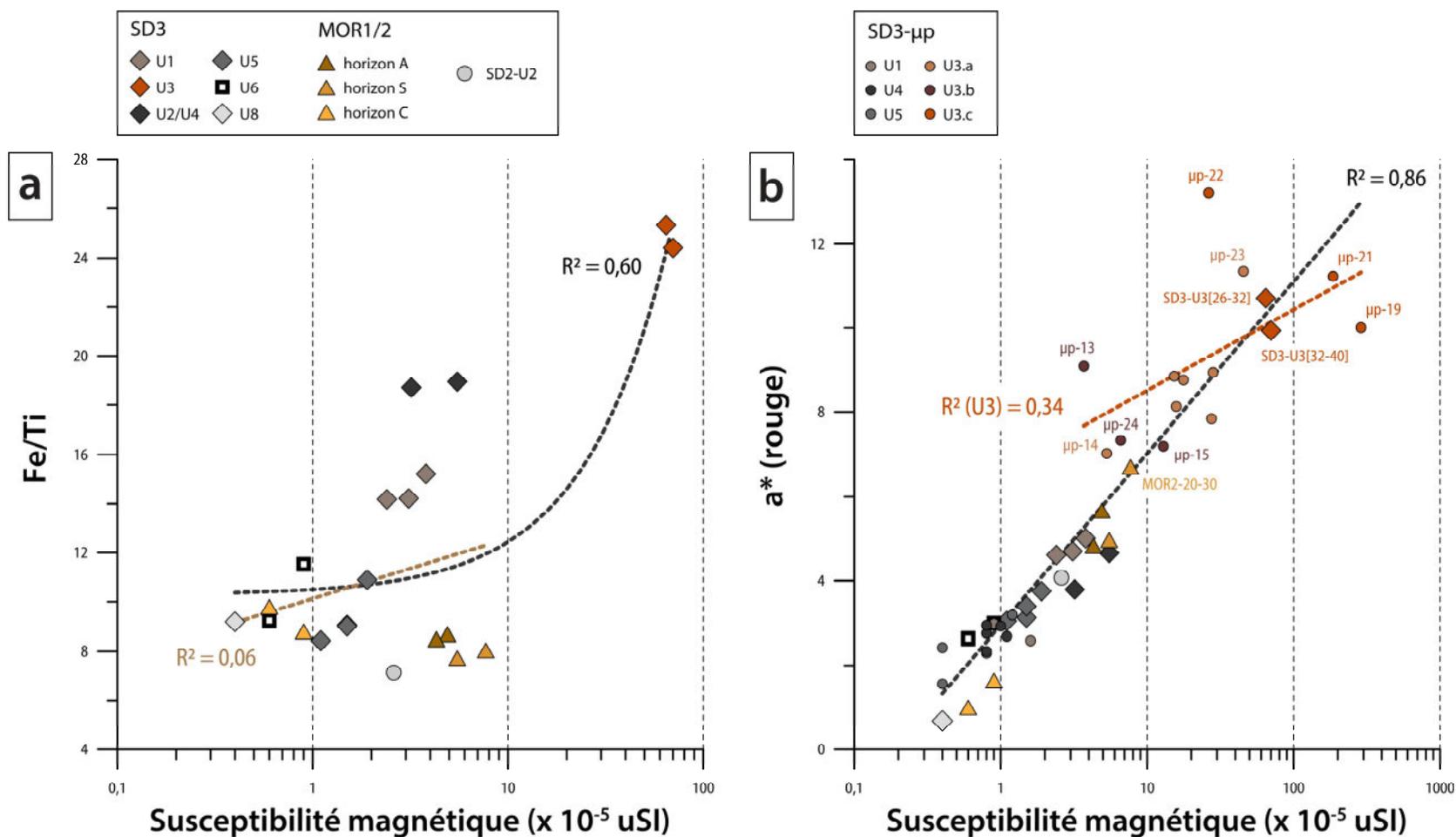


Figure 71 : Graphiques bivariés de la susceptibilité magnétique ($\times 10^{-5}$ uSI ; échelle logarithmique) en fonction (a) du rapport Fe/Ti et (b) du paramètre chromatique rouge a^* . Les courbes de tendances et leur coefficient de détermination R^2 sont calculés pour l'ensemble des échantillons (pointillés noirs), mais aussi pour (a) sans U3 (pointillés bruns), et pour (b) au contraire uniquement les individus de U3 (pointillés oranges). Les courbes de tendance mais aussi les axes des abscisses sont logarithmiques, d'où le fait que les courbes apparaissent linéaires. Inversement, La courbe avec la forme exponentielle correspond à une fonction linéaire.

D'après les résultats de la DRX, la (titano)magnétite est en quantité plutôt comparable entre U3 et U4 (pour les échantillons pédologiques), et même légèrement mieux représentée en U5 et U1. De plus, c'est dans le micro-prélèvement où l'on relève une faible présence d'hématite et où la magnétite est la moins bien définie que la plus forte valeur de susceptibilité est enregistrée ($\mu\text{p-19}$ avec 288×10^{-5} uSI). Par contre, le micro-prélèvement qui possède la teinte rouge la plus marquée, sans hématite identifiée, mais avec plus de magnétite, ne montre qu'une faible susceptibilité ($\mu\text{p-22}$ avec 26×10^{-5} uSI). Ce n'est donc pas la (titano)magnétite, mais d'autres minéraux à caractère ferrimagnétique qui sont responsables des fortes variations mesurées en U3. Puisqu'ils ne sont pas identifiés en DRX, on peut supposer qu'ils correspondent à des minéraux sous forme cryptocristalline ou de dimensions très fines (Cornell et Schwertmann, 2003, part. 7.6.2). La formation par la chauffe de particules magnétiques extrêmement fines (grains au comportement superparamagnétique, d'un diamètre de l'ordre de $0,01 \mu\text{m}$), ayant pour particularité une susceptibilité très largement supérieure à celle de grains de plus grande dimension, à proportion équivalente, est documentée par différents travaux (Hedley, 1970 dans Mullins, 1977 ; Strangway et al., 1967 ; Thompson et Oldfield, 1986 ; Brodard, 2013). Il peut s'agir de magnétite, de maghémite, mais également de particules très fines d'hématite qui disposent alors d'un caractère magnétique inhabituel très affirmé. Compte tenu des observations spectro-colorimétriques et de la DRX, nous suspectons que les fortes anomalies magnétiques puissent correspondre à la présence de cristaux d'hématite ultrafins.

La Figure 71.b présente le graphique relationnel de la susceptibilité magnétique et du paramètre colorimétrique a^* . Le graphique illustre la bonne distinction entre l'unité ocre et l'ensemble des autres échantillons. Seul l'horizon Sca de MOR2 se confond avec la fourchette basse des valeurs de U3. La courbe de tendance de SM/a^* est mieux ajustée selon une fonction logarithmique. Son coefficient de détermination est élevé, à 0,86 ($n = 45$; tous micro-prélèvements inclus). Si l'on exclut les échantillons de U3, le R^2 reste équivalent, à 0,85 ($n = 30$). Inversement, si l'on considère uniquement U3, cette relation n'est pas très bonne, comme le montre la dispersion des valeurs sur le graphique et le plus faible R^2 , qui est au mieux de 0,34 selon une fonction logarithmique ($n = 15$). En effet, les deux échantillons qui possèdent la plus forte teinte rouge ont des valeurs de susceptibilité plutôt modérées ($\mu\text{p-22}$ avec 26×10^{-5} uSI et $\mu\text{p-23}$ avec 45×10^{-5} uSI). Parallèlement, les deux micro-prélèvements avec les valeurs de SM les plus hautes ($\mu\text{p-19}$ et $\mu\text{p-21}$), ont une teinte rouge moyenne, comparable à celle des prélèvements pédologiques. On observe aussi un échantillon classé dans la sous-unité plus bioturbé (U3.b) ayant une susceptibilité très basse, mais associée à un caractère rouge a^* plus élevé ($\mu\text{p-13}$).

Mis à part U3, il apparaît donc une bonne corrélation entre l'augmentation de la susceptibilité magnétique et de la teinte rouge dans les différentes unités analysées. Ces deux paramètres sont relativement mieux marqués dans les unités d'altération que dans les unités hydromorphes et les matériaux glacio-lacustres. En limitant l'altération des minéraux, l'engorgement freine la libération de fer et la production de particules ferrimagnétiques. À l'inverse, dans des conditions aérobiques, ou seulement marquées par des engorgements intermittents, l'altération et la libération du fer sont favorisées, permettant de façon conjointe la cristallisation de particules au comportement magnétique et d'oxy-hydroxydes au pouvoir colorant. L'augmentation progressive du rapport SM/a^* , qui suit une tendance logarithmique, semble bien illustrer l'avancement général de l'évolution pédologique des différentes unités (Maher et Taylor, 1988 ; Zhou et al., 1990 ; Maher, Thompson et Zhou, 1994 ; Maher, 1998 ; Torrent, Barrón et Liu, 2006 ; Li et al., 2017).

Ainsi, on observe en quelque sorte, un « découplage » de ces deux paramètres dans l'unité ocre. La forte variabilité de U3 n'est donc pas seulement le résultat de variations localisées et ponctuelles de la couleur et de la susceptibilité : il existe vraisemblablement une diversité de situations (micro-sites) où les constituants magnétiques et ceux teintés sont plus ou moins distincts et/ou abondants et répartis aléatoirement, ou du moins sans logique apparente. Nous interprétons ces résultats comme la conséquence d'une altération thermique des matériaux, postérieurement remaniés et affectés conjointement par des phénomènes mécaniques et des processus d'oxydo-réduction, tous deux non uniformes.

5.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium

Le Tableau 22 présente les résultats des dosages des différentes extractions du fer, de l'aluminium et du silicium, selon la méthode Tamm en obscurité (extrait codé OX) et Mehra-Jackson (codé CBD), réalisés par le laboratoire INRAE d'Arras. Le tableau présente les calculs des formes élémentaires dosées et de quelques rapports qui nous renseignent sur ces dernières (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Baize, 2018). Les analyses ont porté sur les prélèvements pédologiques, avec un échantillon des unités U2, U3, U4 et U5.

Comme nous l'avons vu, les quantités de fer total (Fe_T) sont assez élevées dans l'unité ocrée, mais également dans les encaissants U2 et U4 par rapport à U5. Cette dernière unité se différencie des trois unités sus-jacentes, sur plusieurs aspects. Sa proportion en fer libre est relativement plus basse (Fe_{CBD}/Fe_T), autrement dit, son fer se trouve principalement intégré dans les réseaux des silicates ($\approx 60\%$). De plus, elle possède une fraction plus importante de fer amorphe ou peu cristallisé (Fe_{OX}/Fe_{CBD}). Pour les trois unités supérieures, les proportions de fer libre (Fe_{CBD}/Fe_T) se montrent plutôt élevées, avec un maximum en U3. Le fer amorphe ou mal cristallisé est minimum dans U3, et intermédiaire avec U5 pour U2 et U4 (Fe_{OX}/Fe_{CBD}). L'accroissement de la part de fer libre et pour celui-ci, de la part des oxydes bien cristallisés, indique un degré d'altération croissante, telle que suit : $U5 < U2 < U4 < U3$ (Baize, 2018 ; Lelong et Souchier, 1979). Cette dynamique apparaît cohérente avec les caractéristiques des unités. L'altération relativement limitée en U5 peut s'expliquer par son caractère réducteur. Au contraire, pour U3, l'altération des minéraux silicatés est importante, et le fer libéré est en large majorité présent sous des formes cristallines bien exprimées. Cela est en accord avec les précédents résultats ayant montré la bonne définition de la goethite, ainsi que la présence de magnétite et bien qu'en proportions globales faibles, de l'hématite.

Le rapport Fe_{OX}/Fe_{CBD} de U3, légèrement inférieur à 0,1 est cohérent avec les observations faites pour divers types de sols rubéfiés, traduisant un degré de maturité très avancé (Arduino et al., 1986 ; Torrent, Schwertmann et Schulze, 1980 ; Jouaffre et al., 1991 ; Cornell et Schwertmann, 2003). Dans ce contexte de terrains humides, ce faible ratio serait un bon critère supplémentaire pour confirmer l'hypothèse thermique, puisque dans les sols rédoximorphes, celui-ci serait généralement plus élevé ($> 0,4$ d'après Cornell et Schwertmann, 2003). Nous manquons de référentiel de comparaison pour ce qui concerne les unités U2 et U4. Néanmoins, les taux importants de fer libre nous questionnent, car dans les vertisols, il semble que celui-ci soit souvent peu abondant, car piégé dans les réseaux des structures

minérales (AFES, 2009 ; Bonneau et al., 1964 ; Fedoroff et Fiès, 1968). En tout cas, ces résultats semblent montrer que U2 et U4 sont aussi caractérisés par un degré de maturation pédologique notable. Le rapprochement de leurs caractéristiques avec celles de U3 est notable étant donné que leurs caractéristiques physiques les rapprochent plutôt de U5.

Tableau 22 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si des échantillons de Chalain.

	Unité 2 (24-26)	Unité 3 (26-32)	Unité 4 (40-42)	Unité 5 (42-50)
Argiles	30,7	9,8	46,3	42,8
Limons	58,1	50,8	53,4	56,4
Sables	11,3	39,4	0,3	0,8
Carbone organique total (COT ; g/kg)	71,8	34,8	20,3	49,2
Fer total (Fe_T)	9,07	12,86	9,11	5,33
Fer "libre" total (Fe_{CBD})	5,17	8,40	5,56	2,21
Fer "libre" amorphe ou mal cristallisé (Fe_{OX})	0,75	0,73	0,69	0,44
Fer des silicates ($Fe_{Si} = Fe_T - Fe_{CBD}$)	3,90	4,46	3,55	3,12
Fer des oxydes bien cristallisés et/ou fer complexé humique ($Fe_{CBD} - Fe_{OX}$)	4,42	7,67	4,87	1,77
Rapport Fe_{OX} / Fe_{CBD}	0,15	0,09	0,12	0,20
Rapport Fe_{CBD} / Fe_T (%)	57,0	65,3	61,0	41,5
Rapport $(Fe_{CBD} - Fe_{OX}) / Fe_T$ (%)	48,7	59,6	53,5	33,2
Aluminium total (Al_T)	4,21	4,97	5,03	4,85
Aluminium "libre" (Al_{CBD})	0,72	1,65	0,70	0,46
Aluminium "libre" (Al_{OX})	0,89	2,00	0,71	0,63
Aluminium des silicates ($Al_{Si} = Al_T - Al_{OX}$)	3,32	2,97	4,33	4,22
Rapport Al_{Si} / Al_T (%)	78,9	59,8	86,0	87,0
Rapport Al_{CBD} / Al_T (%)	17,1	33,2	14,0	9,5
Rapport Al_{OX} / Al_T (%)	21,1	40,2	14,0	13,0
Silicium total (Si_T)	10,76	10,01	12,43	13,02
Silicium "libre" (Si_{CBD})	0,14	0,25	0,14	0,12
Silicium "libre" (Si_{OX})	0,14	0,53	0,12	0,07
Rapport Si_{CBD} / Si_T (%)	1,3	2,5	1,1	0,9
Rapport Si_{OX} / Si_T (%)	1,3	5,3	1,0	0,6

Les taux d'aluminium total (Al_T) sont assez proches pour toutes les unités. L'aluminium est de manière prédominante intégré dans les réseaux des minéraux silicatés. Contrairement au fer, U5 et U4 montrent des résultats très similaires pour l'aluminium. Pour l'échantillon U3, Al_{Si} reste majoritaire, mais les formes d'aluminium extraites (Al_{OX} et Al_{CBD}) sont nettement plus importantes que pour les échantillons encaissants. Ces résultats, et notamment le fait que Al_{OX} soit supérieur à Al_{CBD} , indiquent la présence d'aluminium amorphe ou faiblement cristallisé (Fey et Le Roux, 1977 ; Shang et Zelazny,

2008). Les échantillons encaissants en possèdent également, mais ces formes sont deux à trois fois plus abondantes en U3. L'altération thermique peut expliquer la libération de l'aluminium suite à la destruction des minéraux argileux (Singh et al., 1991). Les valeurs intermédiaires de Al_{OX} et Al_{CBD} en U2, par rapport à U3 et U4-U5, pourraient s'expliquer par une réintégration des matériaux de U3. En outre, étant donné que du point de vue minéralogique, U5 et U4 se distinguent seulement par la présence de goethite en U4, il est très probable que la plus forte valeur obtenue pour Al_{CBD} corresponde à une fraction d'aluminium de substitution provenant des cristaux de goethite (Fey et Le Roux, 1977 ; Cornell et Schwertmann, 2003 ; Shang et Zelazny, 2008). Par ailleurs, les fractions notables d'aluminium libre, de même que pour le fer, peuvent expliquer la fixation accrue de certains ETM dans ces unités (Kabata-Pendias, 2000 ; Cornu et al., 2005 ; Trolard et al., 1995 ; Van Oort et al., 2017).

Le silicium total est légèrement plus abondant en U5 et U4 qu'en U3 et U2. Seul l'échantillon U3 se distingue par des extraits dosés plus élevés que dans les autres échantillons. Ce résultat peut également s'expliquer par la destruction de phyllosilicates ayant libéré une part de silicium.

5.6. Caractérisations micromorphologiques et microscopiques

Trois prélèvements de sédiments en blocs orientés, centrés sur l'unité ocre, ont été réalisés. La Figure 72 présente leur emplacement sur les profils de SD3. Les imprégnations et préparations en lames minces (LM) de format 14 x 5 cm ont été réalisées par le laboratoire PACEA. Trois lames pétrographiques (LP) non couvertes, prélevées sur les unités U2, U3 et U4 ont également été confectionnées, pour être analysées en microscopie corrélative avec le MEB-EDS. On notera que la richesse en argiles à comportement (semi-)gonflant du matériau encaissant a rendu cette préparation laborieuse, du fait de l'important retrait au séchage. Ce phénomène a limité l'observation micromorphologique, du fait de l'arrachement et de l'effritement des agrégats plus ou moins bien enrésinés. Il sera nécessaire de mettre en place un protocole d'échantillonnage et de préparation adapté pour pallier ce problème lors des futures analyses. Des observations et des analyses élémentaires ont aussi été effectuées sur les blocs indurés. La Figure 73 montre les scans des blocs indurés.

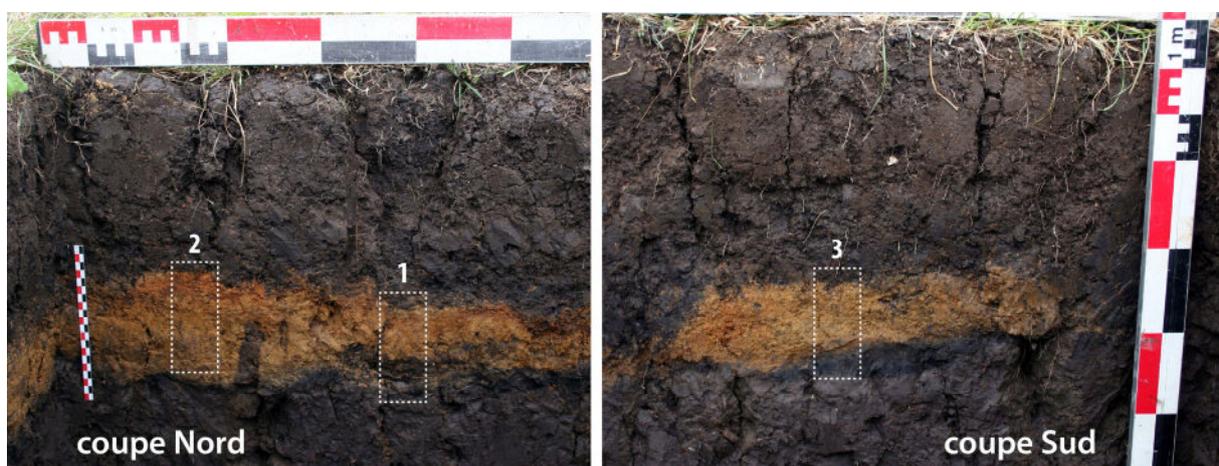


Figure 72 : Emplacements des blocs prélevés pour la réalisation des lames minces du sondage 3.

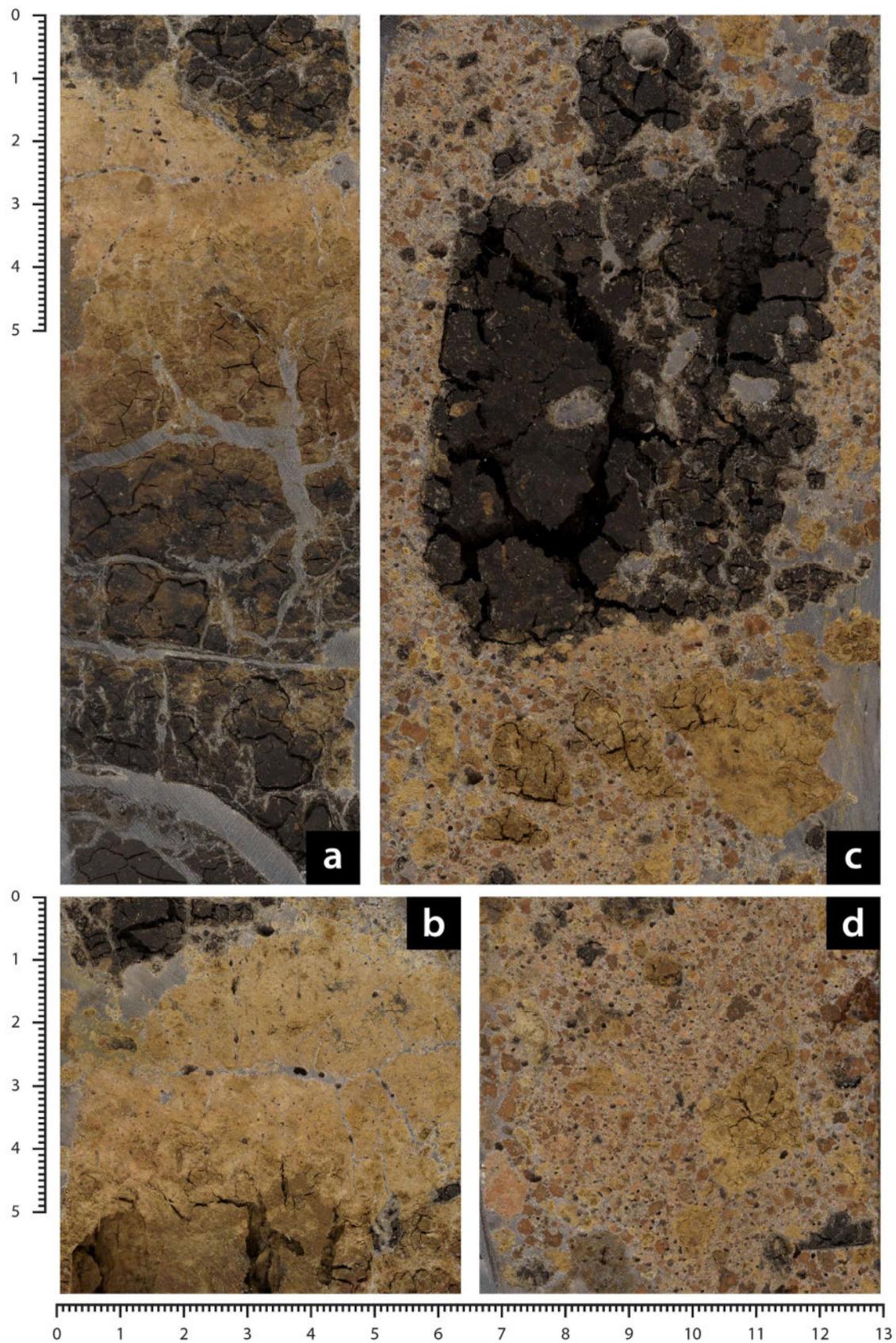


Figure 73 : Scan des blocs indurés de l'unité illustrant les deux types de faciès de U3.

(a) et (b) Faciès subcontinus et homogènes des blocs de LM1. Noter les fissurations larges et caractéristiques de l'unité verticale U4. (c) et (d) Faciès agrégé ou granulaire des blocs de LM2. Noter l'imposante masse de terre noirâtre encaissante intégrée dans U3. Toutes les images sont à une échelle centimétrique identique.

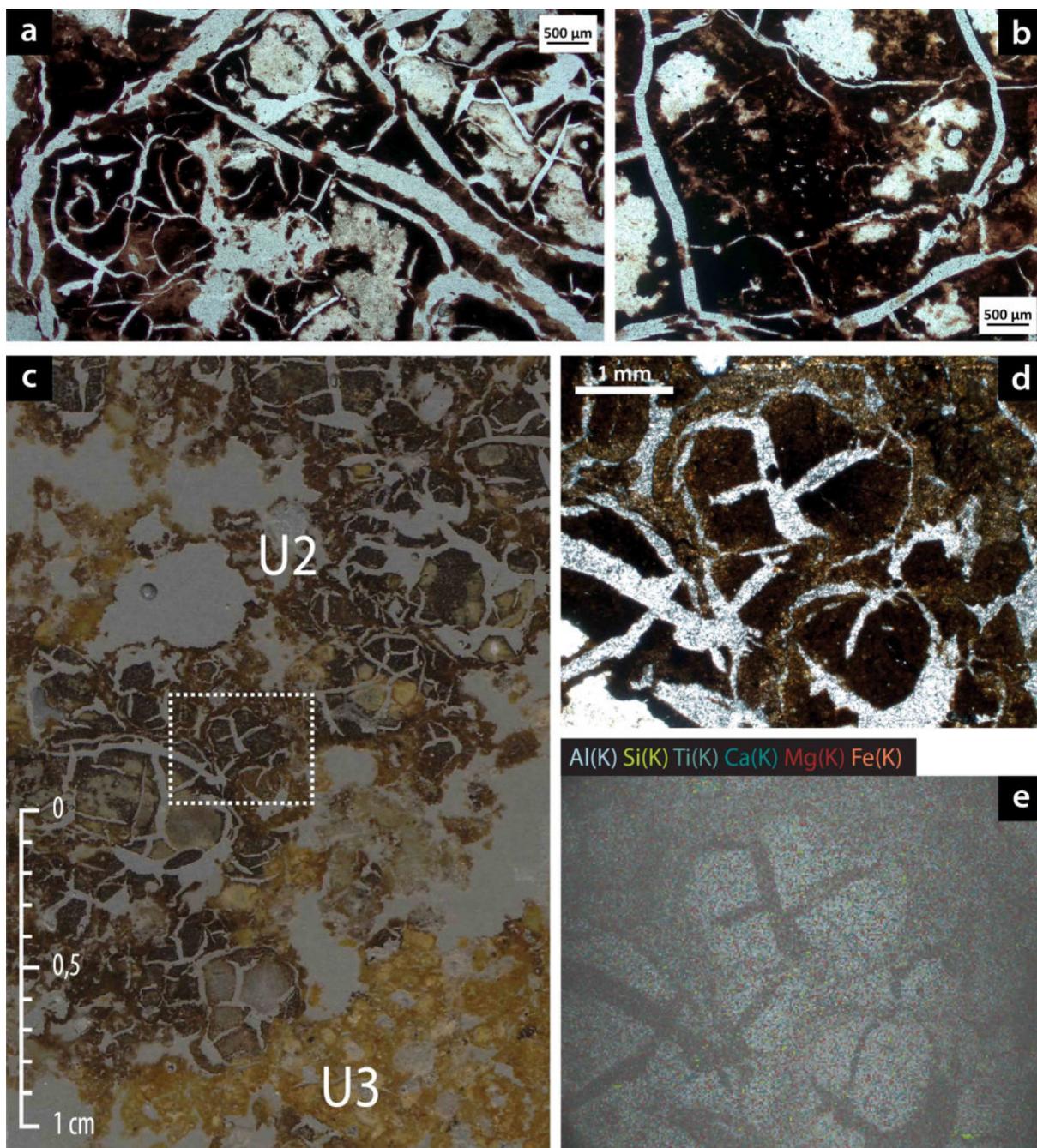


Figure 74 : Caractéristiques microscopiques des unités encaissantes U4 et U2.

(a) et (b) Faciès microscopiques de l'encassant U4, montrant la structure sphéroïde caractéristique (vues PPL).

(c) Faciès mésoscopique de U2 au sommet de U3 (scan de la lame pétrographique).

(d) Vue rapprochée des agrégats de U2 arrondis et fissurés suite au séchage, gainés de matériaux argileux brun très sombre (vue PPL ; correspond à l'encart en pointillé sur la figure c).

(e) Même emplacement, image compilée de l'analyse cartographique élémentaire au MEB-EDS.

5.6.1. Les unités encaissantes U4 et U2

Les unités pédo-sédimentaires U2 et U4 sont en microscopie globalement très semblable, comme cela a été observé sur le terrain. Elles sont presque exclusivement formées de matériaux très fins, argileux de couleur noire à brun très sombre. La masse est très homogène et ponctuée de manière très diffuse par des cristaux extrêmement fins et difficilement identifiables sans l'emploi du MEB-EDS. Il s'agit essentiellement de quartz dont les dimensions ne dépassent quasiment jamais celle des limons fins (20 μm), ce qui est en accord avec les résultats granulométriques. La porosité est essentiellement structurale, liée à la contraction des matériaux suite au séchage. Celle-ci engendre la formation de vides planaires et d'agrégats anguleux prenant des formes en coins (structure sphéroïde ; Figure 74.a-b). Outre cette porosité, la densité des agrégats est très élevée, et les vides intra-agrégats sont très rares. Nous n'observons aucun indice de matériaux organiques. La teinte sombre est généralisée, ce qui irait dans le sens que cette teinte résulte des complexes organiques intimement liés aux constituants argileux. Ces observations sont cohérentes avec les traits microscopiques généraux indiqués pour les sols à propriétés vertiques (Kovda et Mermut, 2018).

L'unité U2 se distingue toutefois en certains endroits de l'unité U4, par sa morphologie structurale (observée sur les trois lames). Elle se présente sous une forme granulaire, de dimensions millimétriques à pluri-millimétrique, et plus moins dispersée et mélangée aux matériaux ocrés de U3 (Figure 74.c). Au sommet de LM2, de tels micro-agrégats sont observés dans la continuité du faciès massif de U2 (identique à U4), ce qui évoque une désintégration mécanique de ce dernier faciès. Dans ce type de matériaux très argileux, l'origine de ce faciès est difficile à préciser (cycles de dessiccation-humidification, dépôts de matériaux saturés en eau, remaniement biologique, anthropique), mais elle caractérise la proximité d'une surface, ancienne ou actuelle (Fedoroff, Courty et Guo, 2018 ; Kovda et Mermut, 2018 ; Deák et al., 2017). Une analyse cartographique élémentaire au MEB-EDS sur des micro-agrégats très arrondis gainés dans un faciès plus brunâtre montre que, mis à part la différence de densité (liée à la rétractation des agrégats), leur composition est globalement similaire aux matériaux qui les entourent (Figure 74.d-e).

5.6.2. L'unité ocrée U3

En microscopie, l'unité ocrée présente deux faciès particulièrement différenciés. Le premier faciès, observé sur LM1 et LM3, est relativement homogène en termes de constitution, de structure et de teinte. U3 s'y présente comme une unité de teinte globalement ocrée-jaunâtre et subcontinue, mais avec une porosité notable. Les constituants sont très largement argileux à argilo-silteux, avec de nombreux microcristaux de quartz épars. La porosité est dans le détail difficile à définir. Elle semble pour une part très importante, correspondre au réseau fissural lié au séchage des matériaux argileux (Figure 76.a-b). On observe ainsi l'apparition de micro-masses plus denses (légèrement plus opaques), détournées par leurs fissurations, et entremêlées à des plages peu marquées par ces phénomènes. De nombreuses microfissurations et chenaux plus ou moins irréguliers ou continus ainsi que divers vides subsphériques s'ajoutent à ces derniers. La microstructure de ce faciès apparaît ainsi assez complexe, dans le sens où, malgré la porosité, il n'y a pas véritablement d'agrégats qui s'y individualisent. Le faciès et les types de vides n'évoquent pas non plus une agglomération d'agrégats « fondus ». La structure de ce faciès

n'est donc ni clairement agrégée ni véritablement continue ou massive, leur classification nous pose donc un véritable problème (Baize et Jabiol, 1995, p. 134-135). Ceci nous ramène à notre interprétation initiale concernant le prélèvement de LM3, celui d'un dépôt sédimentaire en masse (voir Figure 61). En outre, cette structure particulière suggère que les structures argileuses ne sont pas complètement effondrées par la chauffe, ce qui est vraisemblablement cohérent avec leur teinte générale ocre-jaunâtre, peu rubéfiée. L'analyse au MEB-EDS montre dans cette unité, la présence de structures feuilletées ordonnées pseudo-hexagonales (Figure 77). Ces structures sont fortement enrichies en fer en comparaison du fond matriciel, elles correspondent vraisemblablement aux chlorites secondaires identifiées en DRX.

Dans la partie sommitale de U3, on observe néanmoins quelques chenaux discontinus de quelques millimètres de large, et comblés de matériaux noir-brunâtre encaissants, qui sont interprétés comme des cavités de lombrics. Une porosité en chenaux beaucoup plus, fine, millimétriques, traduit également une bioturbation racinaire. D'autre part, on relève sur ce faciès des traits rédoximorphes, irrégulièrement répartis, sous la forme de revêtements et d'hyporevêtements (imprégnations) rouilles (en XPL) des chenaux et de cavités (Figure 75.a et b). Puisque le fond matriciel dans lequel se développent ces traits pédologiques est clairement teinté (ocre-jaunâtre), il est probable qu'ils résultent d'une accumulation absolue plutôt que d'un appauvrissement basal (Vepraskas, Lindbo et Stolt, 2018). Ces traits traduisent l'existence de périodes intermittentes de saturation en eau, postérieures à la formation de U3. De plus, on observe de façon ponctuelle et difficile à quantifier, la présence de ponctuations ou de concentrations diffuses plus ou moins rougeâtres ou opaques en PPL, qui prennent des teintes rouges le plus souvent très vives en XPL (Figure 75.c-d-e-f). Les concentrations diffuses peuvent couvrir des surfaces de quelques centaines de microns, mais celles dispersées sont souvent inférieures à 10-20 μm . Il s'agit vraisemblablement de fines particules d'hématite plus ou moins bien cristallisées, voire éventuellement du fer trivalent amorphe (Stoops, 2020). Leur morphologie peut certainement expliquer la difficulté à identifier l'hématite en DRX.

Le second faciès, observé sur LM2, présente une microstructure granulaire moyennement à fortement séparée (Figure 76.c-d). Les micro-agrégats sont de formes variées, arrondies à sub-anguleuses, avec des formes à dominance sub-sphériques. Ils sont de dimensions variées, de la dimension des silts grossiers aux sables, voire même de taille supérieure. Ils montrent des couleurs assez variées, brunâtres, jaunâtres, rougeâtres, rosâtres. Les micro-agrégats rouges foncés à rouges pâles sont largement représentés, donnant à l'ensemble cette teinte plus marquée. Certains sont très sombres, d'aspect comparable à U2-U4. D'autres sont également brun sombre et possèdent une structure compacte, mais sans indices de fissurations liés à la rétractation des argiles comme les précédents. Ils sont quelquefois associés à des traces rouge sombre qui suggèrent qu'ils sont chauffés. Ils indiqueraient des conditions de chauffe plus réductrices, mais ils restent toutefois très rares. Entre ces micro-agrégats, des particules ou des agrégats plus ou moins composites de dimensions très fines sont dispersés (infra-millimétriques). Ceux-ci paraissent moins denses que les précédents micro-agrégats et montrent des teintes globalement plus brun-jaunâtre. Quelquefois, ces matériaux sont présents en revêtements discontinus autour d'agréats très rouges. Nous interprétons ces micro-agrégats comme étant les pseudo-particules (non dispersables) identifiées par l'analyse granulométrique.

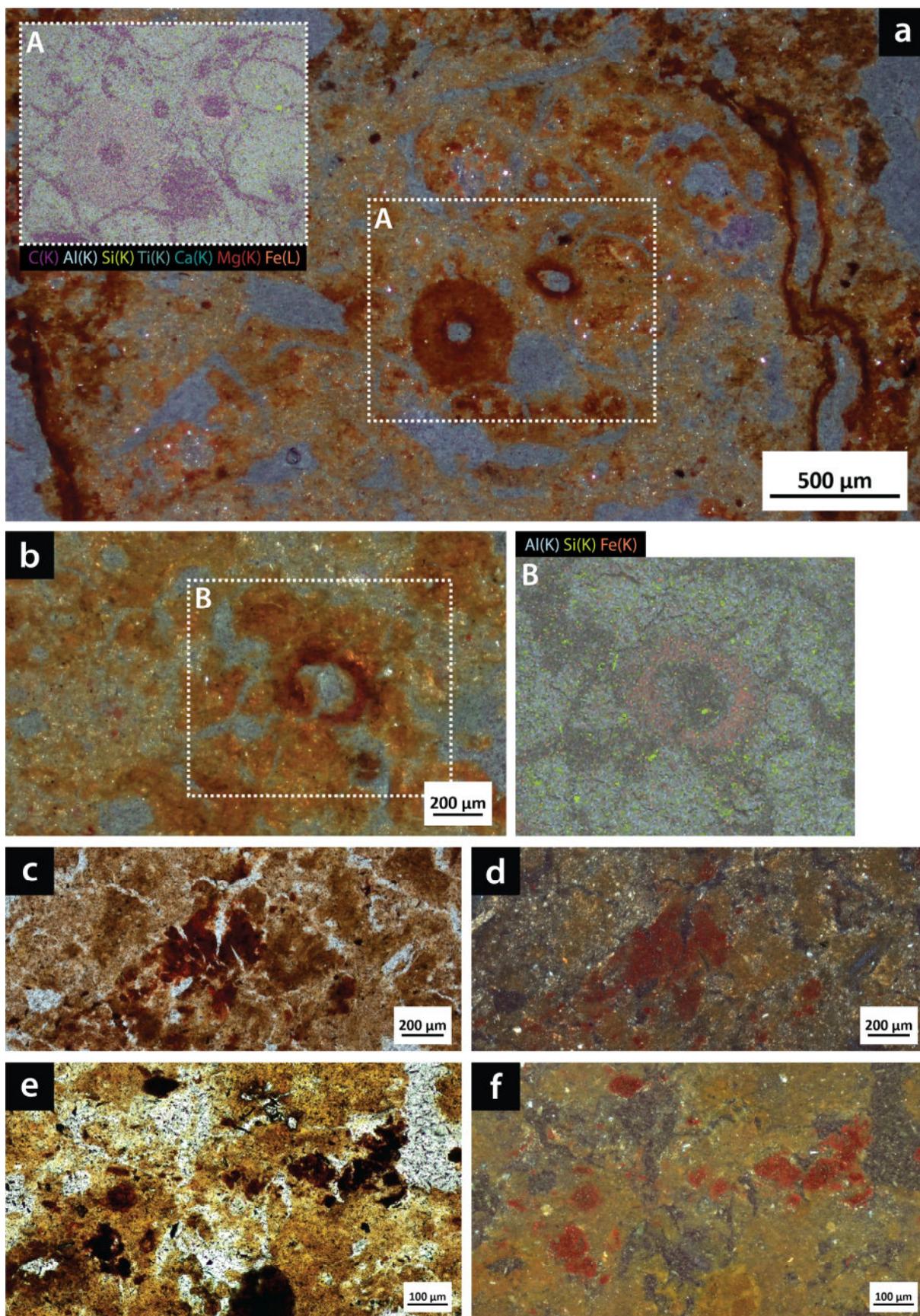


Figure 75 : Traits rédoximorphes et formes du fer dans le faciès subcontinu de U3 (LM1 et LM3)
 (a) et (b) Revêtements et hyporevêtements de chenaux enrichis en fer (XPL et cartographie élémentaire MEB-EDS).
 (c) et (e) Concentrations diffuses d'oxydes de fer, certainement d'hématite (PPL). (d) et (f) Idem en XPL.

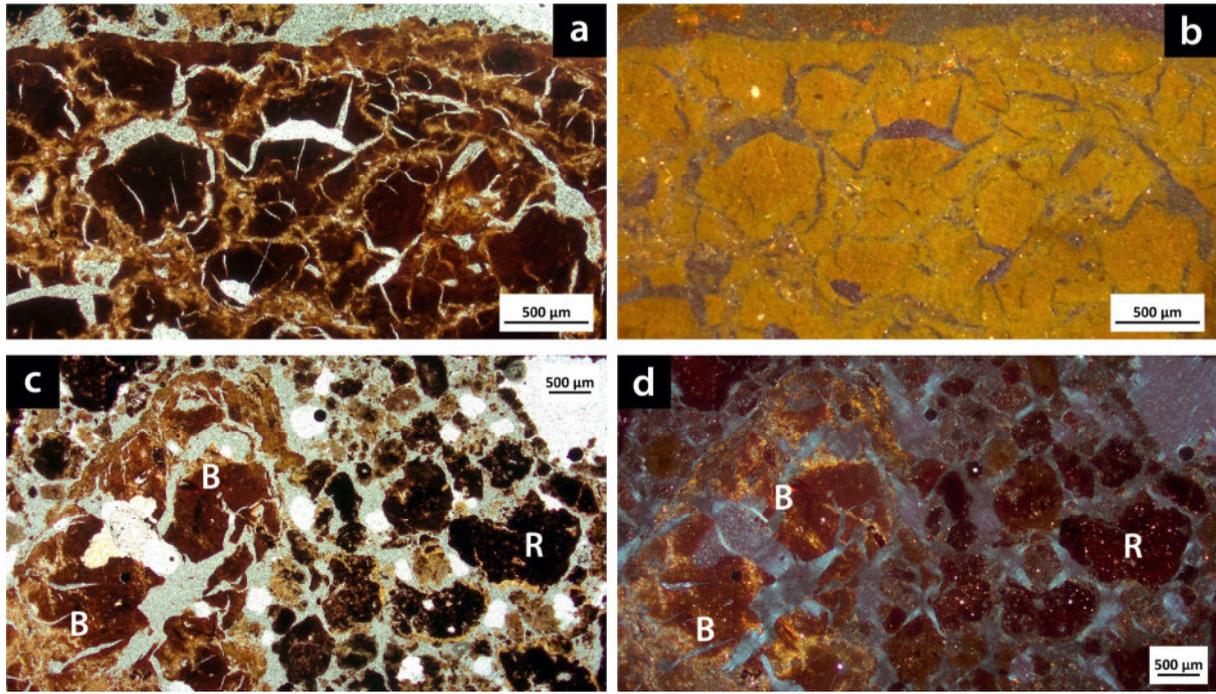


Figure 76 : Illustration de la micromorphologie des deux faciès de U3.

(a) et (b) Faciès subcontinuum observé au sein d'un agrégat ocre-jaunâtre (vues respectivement en PPL et XPL). Noter la porosité engendrée par les fissurations et la contraction des matériaux argileux.

(c) et (d) Faciès granulaire montrant les agrégats denses très rouges (R) moulés de matériaux argileux brun-jaunâtre ; et d'un agrégat brunâtre (B) relativement désintégré (vues respectivement en PPL et XPL)

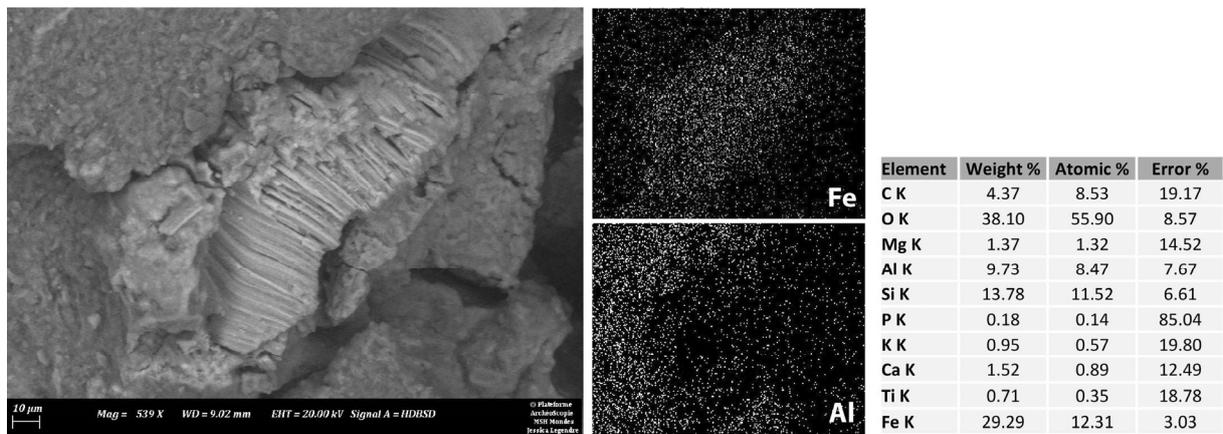


Figure 77 : Exemple de phyllosilicate récurrent de U3 fortement enrichi en oxy-hydroxydes de fer (image, cartographie de Fe, Al, et analyse élémentaire au MEB-EDS).

En mélange avec ce faciès granulaire, on retrouve des agrégats de dimensions beaucoup plus importantes, dont le diamètre mesure jusqu'à plusieurs centimètres. Leurs teintes sont clairement moins variées que les micro-agrégats, ils sont tantôt brunâtre tantôt plus ocre-jaunâtre. Leur porosité structurale est assez similaire à celle du premier faciès. De plus, sur un des blocs indurés du prélèvement LM2, nous observons une masse quasi quadrangulaire, d'environ 8-10 x 5-6 cm, d'orientation verticale, et totalement intégrée dans le faciès granulaire ocre-rougeâtre (Figure 73.c). Au sommet de cette masse, on observe à nouveau le faciès granulaire, mais cette fois avec des agrégats grossiers qui correspondent

à l'encaissant U2, ainsi que les particules arrondies de U2 décrites dans la partie précédente (Figure 74). Ce phénomène nous paraît difficilement explicable sans une intervention anthropique. Il nous évoque fortement une motte enfouie par un travail aratoire. La nature de la motte, celle de son recouvrement et sa profondeur, semble exclure que ce phénomène résulte des mises en culture récentes. Ceci amène un argument en faveur d'une origine anthropique de ces faciès granulaires.

La transition de la base du faciès subcontinu de U3 avec U4 est en microscopie assez diffuse (LM1 et LM3). Nous n'avons pas pu observer la transition sous le faciès granulaire de U3. Pour le prélèvement LM1, où nous avons noté sur le terrain un effet de fragmentation et de désagrégation basal de U3 dans U4, la transition est encore plus progressive sur les blocs (Figure 73.a). Le passage entre le faciès ocre-jaunâtre de U3 à U4 se fait sur plusieurs centimètres, avec un changement progressif de la teinte, qui passe par des couleurs brunâtres claires à foncées (PPL et lumière naturelle). À l'échelle microscopique, la transition reste très diffuse et irrégulière entre les deux unités. Localement, nous observons que le faciès de U3 parfois ocre-rouille et intimement mêlé, voire semble se fondre avec U4, qui apparaît sous la forme de revêtements argileux assez épais, moulant les agrégats nettement anguleux de U4 qui apparaissent là gris sombre (s'agit-il d'agrégats de U5 ou d'un artefact lié à des différences d'épaisseur des lames ? Figure 78.a). Nous ne sommes pas capables d'expliquer les faciès que nous observons, et compte tenu des difficultés d'induration lors de la préparation des lames minces, il convient de rester prudent sur leur interprétation. Néanmoins, ils nous posent question quant aux modalités d'intégration et d'effacement du faciès de U3 en U4. Autrement dit, nous nous demandons si U4 ne pourrait pas en partie résulter d'une évolution des produits de U3.

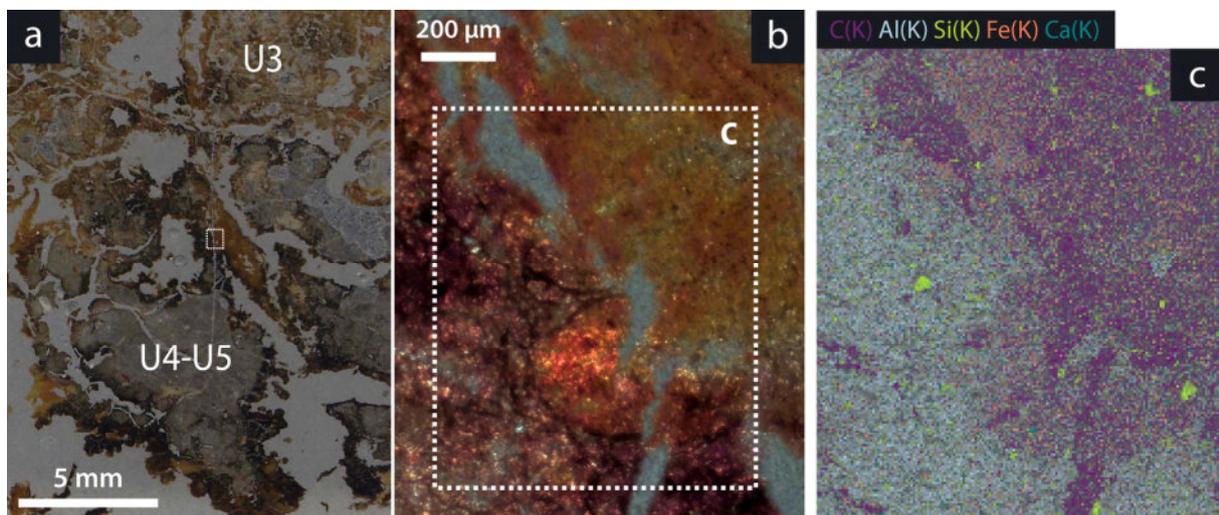


Figure 78 : Illustration de la micromorphologie complexe à la base de U3 et de la transition avec U4.

(a) Scan de la lame mince pétrographique.

(b) Interface entre un faciès ocre-rouille de U3 et U4 (l'emplacement correspond à l'encart sur l'image précédente ; vue en XPL). On observe une concentration d'oxydes de fer (rouge très brillant) qui paraît incrustée dans les matériaux U4 sombres.

(c) cartographie élémentaire MEB-EDS

Les observations micromorphologiques permettent donc d'observer deux faciès dont les processus de mise en place apparaissent tout à fait opposés. D'un côté, un faciès qui correspondrait à une masse relativement cohérente de matériaux modérément chauffés, mais de manière assez homogène (et seulement légèrement affecté par la pédoturbation postérieure) ; de l'autre, un faciès très hétérogène, dont les constituants traduisent des intensités (et des modalités) de chauffe assez variées, résultant de remaniements mécaniques notables, dont vraisemblablement en partie par une action anthropique. Ces résultats sont cohérents avec les observations macroscopiques des profils de SD3. Ils illustrent encore la complexité morphologique de U3.

5.6.3. Caractérisations élémentaires des micro-agrégats (p-XRF)

La diversité des micro-agrégats identifiés dans le faciès granulaire de U3, sur le prélèvement LM2, nous a incités à essayer de mieux caractériser ces constituants. Une série d'analyses élémentaires au p-XRF a été réalisée sur les blocs indurés, en ciblant différents micro-agrégats. La surface plane des blocs indurés facilite grandement la mise en œuvre, par contre, elle n'élimine pas la variabilité interne (effet pépite) ou liée à la densité des particules analysées. Un collimateur réduisant la surface d'analyse à 3 mm de diamètre a été employé, ainsi, les agrégats analysés devaient être au moins de cette dimension. L'emploi de ce collimateur a pour défaut de ne pas permettre une quantification élémentaire totale. Les résultats sont donc transformés selon la méthode additive logratio (ALR) avec le package *alr* sous le logiciel R (Delbey, 2018). Le titane a été employé comme dénominateur pour la transformation. Les données transformées sont traitées par une analyse en composantes principales (ACP) sur les indices de corrélation. Le magnésium, principal composant de la résine, a été exclu de l'analyse. Les autres éléments retrouvés dans sa composition sont dans des taux jugés négligeables en comparaison des matériaux analysés (d'après les prélèvements pédologiques). Les éléments majeurs et une sélection d'éléments traces jugés pertinents vis-à-vis des précédentes analyses, soit un total de 14 variables, ont été retenus pour l'ACP. Les micro-agrégats de U3 ont été classés selon leur couleur : beiges, bruns, jaunes, roses, rouges, noirs. Les agrégats noirs sont considérés comme chauffés et distincts de ceux encaissants. Au total, 46 micro-agrégats ont été analysés.

La Figure 79 présente le résultat graphique de l'ACP et la contribution des variables (cosinus carrés) pour les deux premiers facteurs. La projection spatiale sur les deux axes illustre quasiment 70 % de la variabilité totale, ce qui est acceptable compte tenu du matériel analysé. Le premier facteur est corrélé positivement avec les variables Rb (13,9 %), Si (13,7 %), K (11,8 %), Sr (10,8 %) et Zn (9,0 %), et négativement avec As (9,9 %) et Fe (9,7 %). Pour le deuxième facteur, ce sont les variables Ti (26,9 %) et P (22,6 %) qui contribuent majoritairement pour l'axe positif, et dans une moindre mesure Ca (9,4 %) et Al (9,0 %). Les variables corrélées négativement à ce facteur ne contribuent que de façon minoritaire (Fe et Sr à environ 5 %). Le troisième facteur (non présenté), qui représente 10,2 % de la variabilité totale, oppose Al (34,0 %) à Ca (22,8 %).

Le regroupement des individus par catégorie est assez bien marqué. Il est illustré par la dissociation des ellipses de confiances (probabilité statistique à 1σ). Seules les catégories *rouges* et *sombres* se recouvrent nettement. Le premier axe discrimine clairement ces deux dernières catégories et moins les *bruns* et *jaunes* (corrélés à As et Fe), qui sont opposés aux groupes *encaissants* et

beiges (corrélées à Rb, Si, K). Les trois individus *roses* sont peu discriminés sur ce facteur, par contre, ils sont positivement bien associés au deuxième facteur, soit aux variables Ti et P. De plus, les *roses* sont surtout bien corrélés au troisième facteur, avec Ca. Le deuxième axe permet aussi dans une certaine mesure, de distinguer les catégories *rouges-sombres* (valeurs positives), des *bruns* et *jaunes* (négatives).

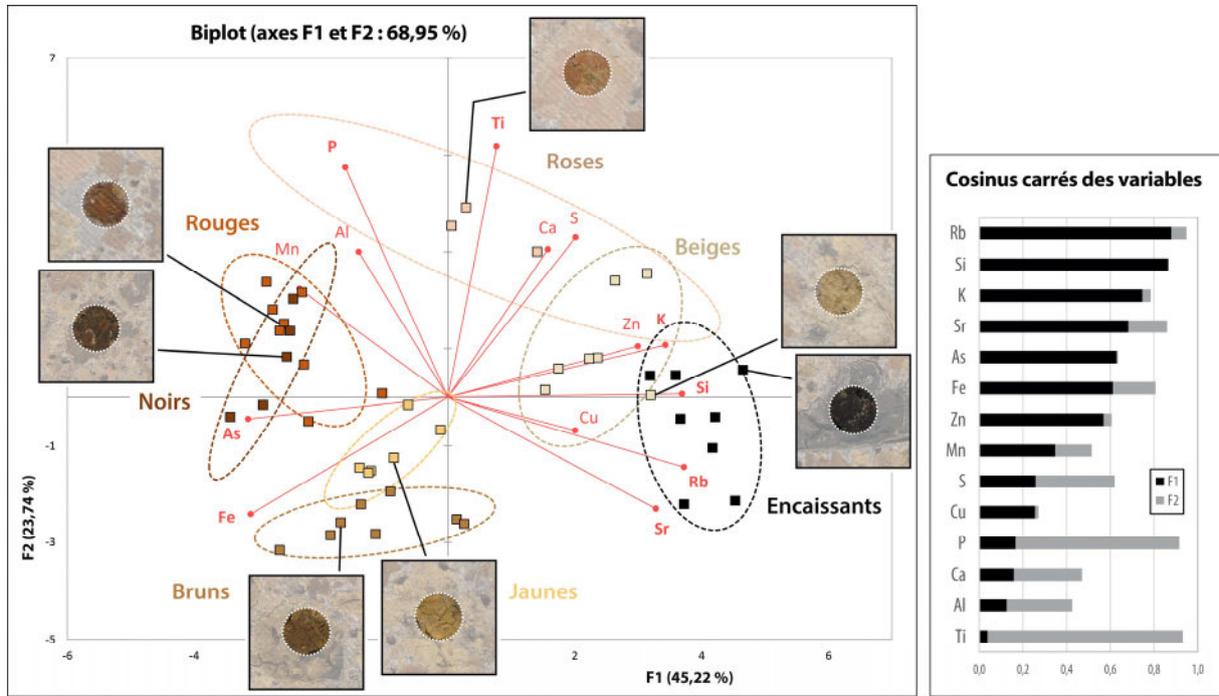


Figure 79 : Analyse en composantes principales sur les compositions élémentaires des micro-agrégats du faciès granulaire de U3.

Les ellipses correspondent aux intervalles de confiance à la probabilité 1σ .

Les corrélations élémentaires du premier facteur (positives et négatives) sont cohérentes par rapport aux analyses élémentaires effectuées sur les prélèvements pédologiques. Les variables corrélées positivement correspondent à celles les plus abondantes (relativement) dans les unités encaissantes, et en particulier U4. Les éléments corrélés négativement sont ceux qui caractérisent U3. L'analyse confirme que les agrégats noir sombre, sans porosité fissurale, ne sont pas des agrégats encaissants. La première dérivée spectrale d'un de ces agrégats noirs montre un pic à 555 nm, ce qui confirme la présence d'oxy-hydroxydes de fer. Leur teinte traduit vraisemblablement une cuisson réductrice.

D'autre part, le rapprochement des agrégats de faciès beiges de ceux encaissants est notable, puisqu'on peut supposer que cette couleur claire indiquerait une décoloration, et donc une relative lixiviation. Leur association avec les éléments K et Rb ne va donc a priori pas dans ce sens. La question se pose donc s'ils résultent seulement d'un appauvrissement en composants teintés (fer) ou plutôt d'une chauffe très modérée. Il nous paraît très probable que ces deux hypothèses se conjuguent. L'association entre le petit groupe d'échantillons de couleur rosâtre et le calcium pose aussi question puisque les carbonates de calcium sont généralement un frein au développement de la rubéfaction. Néanmoins, les échantillons que nous avons analysés de U3 ne sont pas carbonatés. Plusieurs hypothèses pourraient être envisagées : une composition et donc une origine sédimentaire différente du reste des échantillons ;

une cuisson modérée ou dans des conditions atmosphériques différentes ; ou encore, une différenciation de la couleur postérieure à la chauffe (Delbey, 2018 ; Velde et Druc, 1999 ; Maniatis et al., 1983). On notera que les agrégats roses sont assez fréquents dans le faciès granulaire, mais de dimensions généralement très réduites (d'où le faible nombre d'individus analysés). Cela pourrait aller dans le sens d'une chauffe, et donc d'une induration, plus faible. Finalement, au vu de la disposition des classes de couleurs sur ce premier facteur, il serait envisageable que la composition élémentaire des micro-agrégats soit corrélée à un gradient d'intensité de la chauffe, qui serait croissant tel que suit : encaissants, beiges, roses, jaunes-bruns, noirs-rouges. Néanmoins, nous voyons qu'en microscopie, il n'est pas si évident de dissocier clairement les faciès qui sont du ressort de l'altération thermique seule, de ceux influencés par des phénomènes post-dépositionnels.

5.7. Cuissons expérimentales

5.7.1. Colorimétrie

Plusieurs séries de cuissons expérimentales en laboratoire ont été réalisées à partir des échantillons préparés et homogénéisés à la maille de 200 μm , des unités U5 et U4. Chaque échantillon a été chauffé une seule fois, pendant une durée (1, 2, 4 et 8 h) et un palier de température fixés (200, 300, 400, 450, 500, 550, 600 et 800°C). La Figure 80 présente les projections des mesures réalisées sur les échantillons expérimentaux, qui sont confrontés aux résultats colorimétriques de U3 (échantillons pédologiques, micro-prélèvements et blocs indurés).

La Figure 80.a présente l'évolution des échantillons uniquement en fonction de leurs teintes (a^* et b^*). On observe au fur et à mesure de l'augmentation des températures de chauffe, un accroissement global des teintes. Les deux échantillons suivent une évolution assez parallèle, mais U4 présente une tendance générale où les teintes sont toujours plus rouges que celles de U5. De plus, on remarque que pour un même palier de température/durée, U4 acquiert systématiquement, et cela dès 300°C, des teintes plus prononcées que U5. Par exemple, U4 développe pour une chauffe de 2 h à 450°C, des teintes presque aussi importantes que celle de U5, chauffé 4 h à 600°C ou 2 h à 800°C. D'autre part, on observe que la durée de cuisson influence fortement l'évolution des teintes pour un même palier de température. Pour l'unité U5, ce phénomène est particulièrement remarquable pour les cuissons à 450, 550 et surtout 500°C. Par exemple, pour ce dernier seuil de température, on note qu'une chauffe d'une heure produit des teintes qui ne diffèrent pas des cuissons de 200-300°C (quelle que soit la durée) alors qu'une chauffe de 8 h engendre des teintes équivalentes de celles obtenues à 800°C. Ce phénomène est moins important pour U4, et ce sont surtout les seuils de 400 et 450°C qui sont concernés. La projection des mesures réalisées sur U3 montre un rapprochement entre certaines gammes de températures/durées obtenues pour U5, qui s'échelonnent entre 4 h de chauffe à 450°C et 2 h à 600°C. Par contre, aucun des échantillons expérimentaux de U4 ne s'inscrit dans l'étendue des mesures de U3.

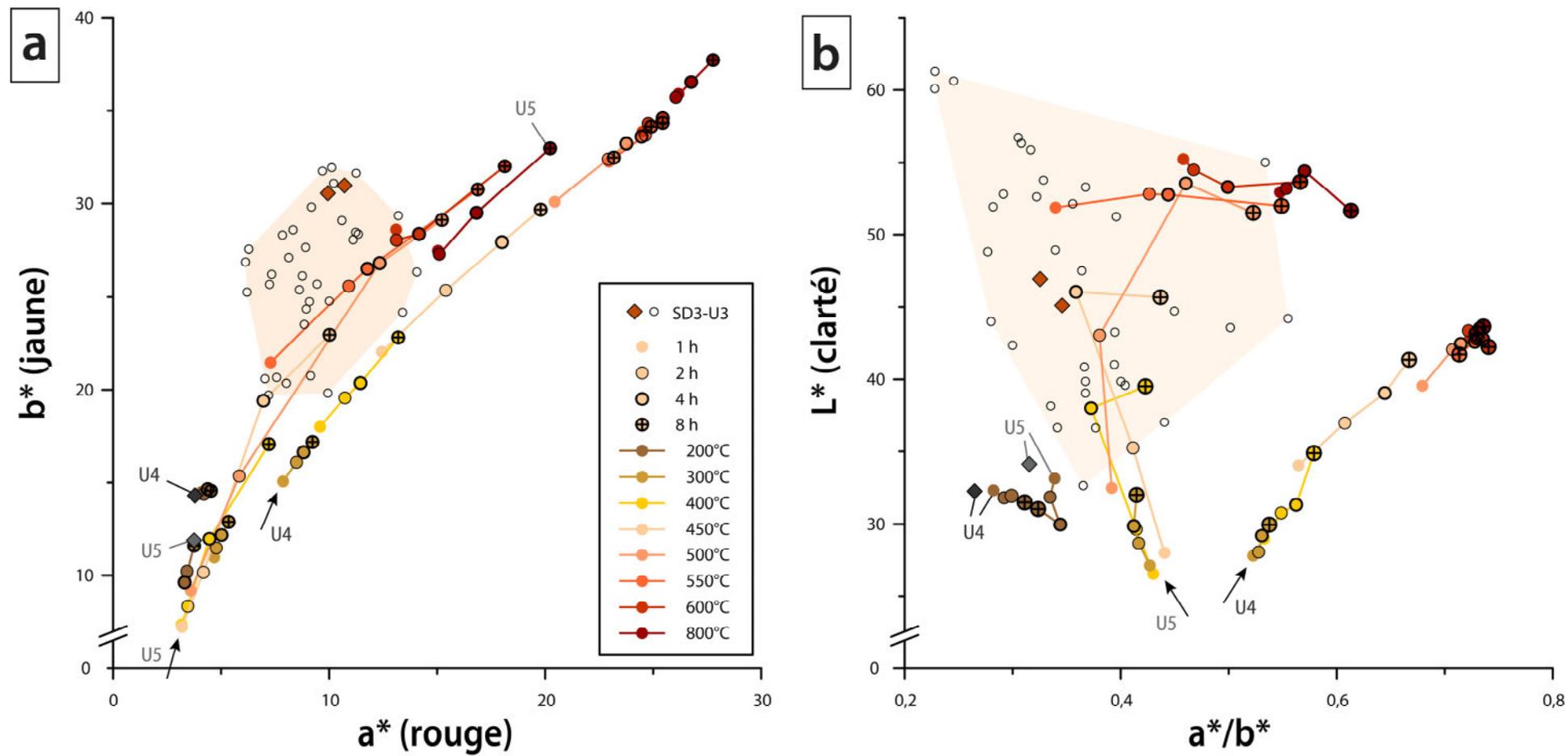


Figure 80 : Représentation graphique des résultats colorimétriques des cuissons expérimentales des échantillons U5 et U4 de SD3.

Le graphique de la Figure 80.b permet d'apprécier la totalité de la variabilité colorimétrique. Les valeurs croissantes sur l'axe a^*/b^* illustrent l'influence croissante de la teinte rouge des échantillons. On remarque néanmoins que dans tous les cas les valeurs des teintes jaunes restent toujours prédominantes sur les teintes rouges ($a^*/b^* < 1$). Avec cette représentation, on observe que l'évolution des couleurs des échantillons U5 et U4 suit des voies nettement différentes. Les cuissons de U4 marquent un accroissement progressif de l'influence du rouge, et les résultats s'écartent encore plus nettement des valeurs de U3 que sur le graphique précédent. Quant aux cuissons de U5, elles montrent que le rapport a^*/b^* n'évolue que très peu pour les gammes de températures inférieures à 550°C. Ce paramètre n'augmente nettement que pour les cuissons de températures plus élevées ou pour des durées de cuisson prolongées (8 h). Les échantillons de U5 présentent cependant une augmentation plus rapide et plus forte de la clarté des échantillons. Les valeurs enregistrées pour U3 couvrent une étendue importante, qui illustre la variabilité des teintes de cette unité. Les échantillons expérimentaux de U5 qui traversent la plage des valeurs de U3 s'échelonnent entre 4 h de chauffe à 400°C et 4 h de chauffe à 600°C (comprenant les durées de 8 h pour 400 à presque 550°C). Cette fois-ci, les valeurs des échantillons pédologiques sont proches des cuissons expérimentales, et précisément de l'échantillon chauffé 4 h à 450°C. Si l'on omet les trois échantillons de U3 qui possèdent les teintes les plus rouges, alors l'étendue des échantillons expérimentaux correspondants se situe au maximum de température de 550°C, pour les durées de 1 et 2 h.

Ces résultats nous permettent de proposer que l'unité ocrée ait connu des températures globales de cuisson comprise entre 400°C et un maximum de 600°C. Au vu de l'importance de matériaux chauffés, il est vraisemblable que celle-ci a dû être relativement longue, et certainement largement supérieure à une heure de cuisson (voir p. ex. Forget et al., 2015). Si l'on considère les valeurs moyennées des prélèvements pédologiques, et surtout que l'on exclut les échantillons dont les couleurs sont certainement influencées par des phénomènes redox postérieurs, il est possible que les températures n'aient pas dépassé de manière prolongée les 550°C. Il faut évidemment considérer qu'il s'agit d'indices acquis dans des conditions théoriques contrôlées de laboratoire. Cela étant, ces gammes de températures sont cohérentes avec les hypothèses proposées sur la base seule des analyses minéralogiques.

D'autre part, la nette divergence des comportements de U5 et U4 est étonnante compte tenu de la proximité globale des deux unités du point de vue de leur composition minéralogique. U4 se différencie seulement par la présence de goethite, alors que U5 ne possède que de la (titano)magnétite. On pourrait penser que la tendance à acquérir plus rapidement des teintes plus rouges par U4 pourrait s'expliquer par cette différence. Cependant, les deux oxydes sont théoriquement censés se transformer en hématite, dans les mêmes gammes de température, autour de 300-400°C, pour des chauffes en conditions oxydantes (voir références Partie 2-5.3.2.3, p. 213). Néanmoins, en contexte pédologique, du fait de l'irrégularité ou d'autres particularités des structures cristallines (substitutions, dimensions des particules), ces seuils peuvent plus ou moins varier.

5.7.2. Susceptibilité magnétique

La Figure 81 présente les résultats des mesures de susceptibilité magnétique (SM) obtenues sur les échantillons de U4 des cuissons expérimentales. Une chauffe à 200°C n'a quasiment aucune influence sur la SM initiale du matériau ($\approx 1 \times 10^{-5}$ uSI). Dès 300°C, on observe une augmentation certaine de la susceptibilité, qui de plus s'accroît progressivement avec l'allongement des durées de cuisson. Les valeurs maximales sont atteintes pour les chaufes aux seuils de 400-450-500-550°C, mais avec une certaine variabilité de l'influence de la durée. La SM décroît légèrement à 600°C. Elle s'abaisse plus nettement pour le seuil de 800°C, ainsi qu'avec l'avancée des durées de chauffe. Au seuil de 800°C, toutes les valeurs de SM sont inférieures à celles enregistrées à 300°C.

Compte tenu de la forte variabilité des mesures de susceptibilité magnétique acquise pour l'unité ocrée, il est difficile d'en tirer des conclusions vis-à-vis de sa formation. Néanmoins, les gammes de valeurs maximales obtenues expérimentalement sont équivalentes à celles des échantillons pédologiques de U3 ($65-70 \times 10^{-5}$ uSI) ainsi que la moyenne de l'ensemble des mesures de terrain de U3 (52×10^{-5} uSI). Ces tendances sont donc globalement cohérentes avec les estimations proposées d'après les résultats colorimétriques. En outre, elles sont nettement inférieures aux valeurs extrêmes des concentrations rouilles de U3, ce qui conforte l'hypothèse que le développement de ce fort signal magnétique ne résulte pas seulement de la cuisson.

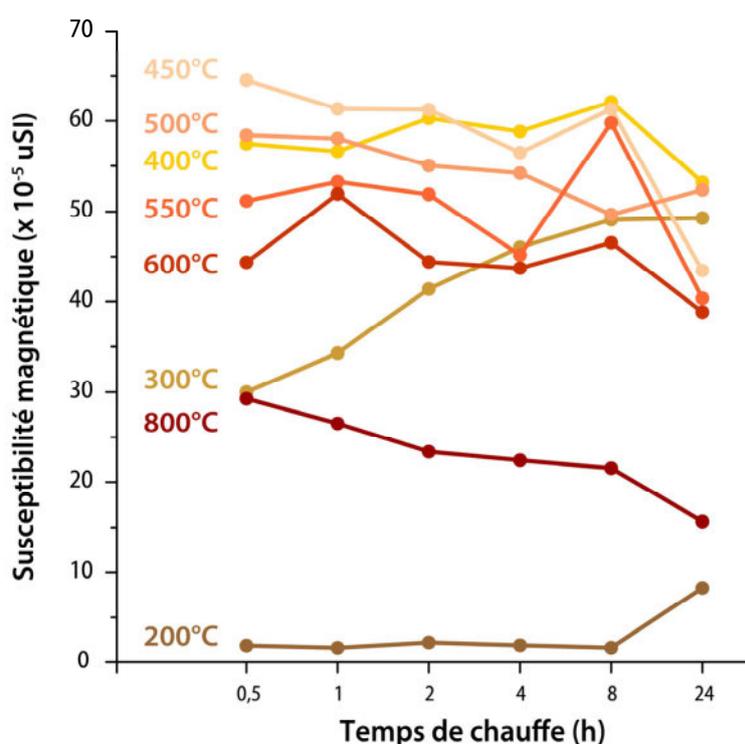


Figure 81 : Évolution de la susceptibilité magnétique des échantillons de U4 en fonction des durées et des températures des cuissons expérimentales.

5.7.3. Minéralogie (DRX)

Pour vérifier l'évolution des compositions minéralogiques en fonction de la chauffe, quelques échantillons de U4 ayant été cuits au four à moufle ont été analysés en DRX. La Figure 82 présente une sélection des diffractogrammes représentatifs analysés. Le Tableau 23 montre les cortèges minéralogiques identifiés pour les échantillons des cuissons expérimentales, qui sont comparés à ceux de U3.

Tableau 23 : Synthèse des cortèges minéralogiques identifiés dans les échantillons des cuissons expérimentales. Les indices d'abondance des minéraux des prélèvements pédologiques sont légèrement adaptés pour donner plus de précisions en l'absence de U5 et de U1.

Interprétation du degré d'abondance relatif : +++ ou ++++ : forte à très forte

++ : moyenne

+ : faible

(+) : assez/très faible (pics potentiels ou mal définis)

- : non identifié

	U4	U3.b [μp-13]	U3.pédo	U3.c [μp-19]	U3.c [μp-22]	Cuissons expérimentales (Unité 4)					
						400°C		500°C		600°C	
						1 h	8 h	1 h	8 h	1 h	8 h
Quartz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Vermiculite	++	(+)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaolinite	(+)	(+)	-	-	-	(+)	(+)	-	-	-	-
Type-Chlorite	++	++	+	(+)	+	++	++	++	++	++	++
(Titano)Magnétite	+	+	(+)	(+)	+	+	+	(+)	(+)	-	-
Maghémite	-	-	-	-	-	(+)	(+)	(+)	-	-	-
Goethite	+	+	++	(+)	+	-	-	-	-	-	-
Hématite	-	-	-	(+)	-	-	-	-	(+)	(+)	(+)

On observe que la goethite a disparu à 400°C, mais que la magnétite est encore identifiable jusqu'à 500°C, bien que dans des proportions légèrement plus faibles. On suspecte la formation de maghémite, mais sa détermination n'est assurée par aucune raie de diffraction secondaire. La maghémite peut apparaître comme phase intermédiaire, entre 200 et 500°C, lors de la transformation de la magnétite en hématite (Cornell et Schwertmann, 2003, p. 402-404). Ce phénomène est décrit pour les cristaux de magnétite de faible dimension, ce qui est généralement le cas de la magnétite pédogénétique (Maher et Taylor, 1988). Ces résultats semblent donc cohérents avec ce schéma. Quant à l'hématite, elle n'est vraiment identifiable en DRX qu'à partir de 600°C. De plus, on note que le pic de la vermiculite a totalement disparu à 400°C, des oscillations diffuses aux angles de diffraction légèrement plus élevés caractérisent typiquement son effondrement (Harris et al., 1992 ; Harris et White, 2008). La kaolinite, elle, n'a pas disparu à 400°C, mais c'est le cas à 500°C. Le pic de diffraction attribué au minéral chloritique ne diminue pas, même après une chauffe de 8 h à 600°C. Ces différents résultats sont tous cohérents avec les données de la littérature.

Ces analyses DRX sont globalement en accord avec les précédentes hypothèses que nous avons proposées concernant les niveaux d'intensité de la chauffe. Elles confirment également que la présence de goéthite, tant dans U3 que dans U4 (et a fortiori dans U2), est la conséquence d'un développement postérieur à la chauffe. Il est également possible que cela soit le cas pour une partie de la magnétite. Le seul point qui pose vraiment problème est celui du comportement du type-chlorite, qui ne diminue pas pour les paramètres de température et de durée analysés. Dans le détail, il semble même que le pic soit mieux défini dans les deux échantillons chauffés à 600°C, après une légère réduction aux températures de 400-500°C (la position et la forme du pic sont aussi légèrement modifiées). Sa persistance à ces températures et même son léger renforcement est en fait cohérent avec le fait qu'il s'agisse de chlorites secondaires, pédologiques (Kohut et Warren, 2002). Des variations dans l'intensité des pics des chlorites seraient notamment liées à l'oxydation du fer en position interfoliaire. Dans le cas présent, cette variation reste toutefois discrète.

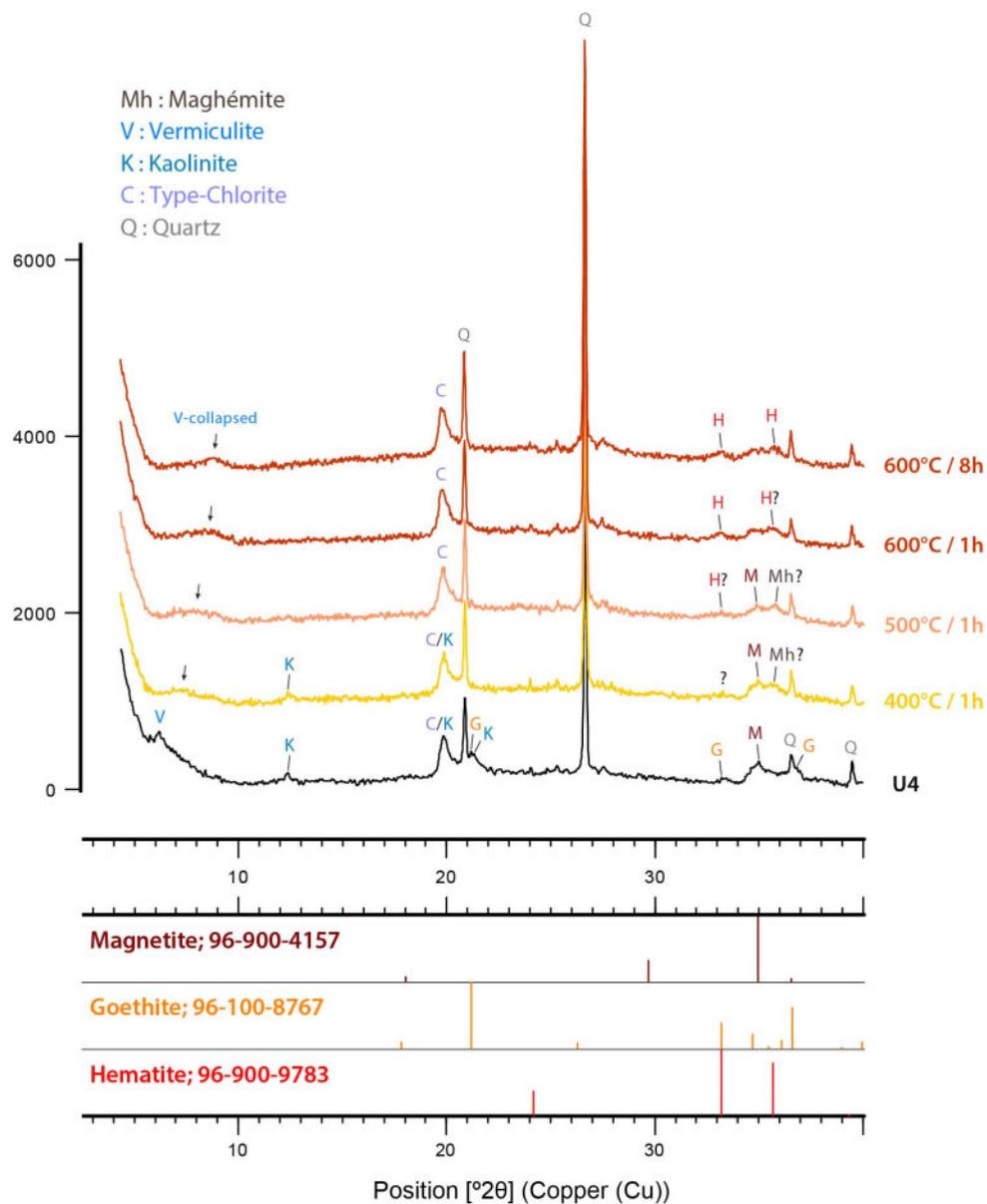


Figure 82 : Sélection de diagrammes de diffraction aux rayons X d'échantillons de U4 chauffés à différents seuils de température et de durée.

Cependant, dans les échantillons de U3, et plus particulièrement dans le micro-prélèvement où l'hématite est identifiée, le pic chloritique est nettement réduit. Pour ce dernier échantillon, il est envisageable que sa diminution s'explique par un lessivage des matériaux fins (structure indurée micro-agrégée), mais pour les autres, cela n'est pas si évident. D'autre part, l'hypothèse de chauffés généralisées au-delà du seuil de 600°C, qui auraient réduit les chlorites, n'est pas soutenue par les précédents résultats (hématite ponctuelle et en quantité faible, colorimétrie). Ceci nous amène à faire l'hypothèse qu'une partie des minéraux chloritiques présents dans U4 se sont formés ou transformés postérieurement à l'évènement de chauffe. Selon cette hypothèse, le net enrichissement en fer de U4 par rapport à U5 (qui ne peut pas être seulement expliqué par la plus grande abondance des formes oxyhydroxydes) correspondrait à son intégration dans les réseaux des structures chloritiques (formation de chlorite ferrifère). L'enrichissement pourrait provenir du fer libéré par l'altération thermique de U3. Les légères différences granulométriques de la fraction argile entre U4 et U5 pourraient aussi résulter de cette évolution minéralogique. Ceci permettrait enfin d'expliquer la nette discordance des évolutions colorimétriques de U4 et de U5, observées lors des cuissons expérimentales. La composition du matériau « parental » de U3 serait donc à l'origine beaucoup plus proche de celle (actuelle) de U5 que de celle de U4. Malheureusement, nous avons seulement réalisé les analyses minéralogiques pour les échantillons expérimentaux de U4, il sera nécessaire de les compléter par l'analyse de ceux U5.

5.8. Résultats des analyses paléo-environnementales

5.8.1. Étude anthracologique

Les prélèvements pour les caractérisations paléobotaniques ont été préparés selon le protocole d'analyse des carporestes par Caroline Schaal⁸⁰ (tamisage par flottation jusqu'à la maille 500 µm). Le Tableau 24 présente les résultats des déterminations anthracologiques. Nous avons observé tous les charbons supérieurs à 1 mm (n = 70). Ils présentent fréquemment une vitrification assez marquée et leur préservation anatomique est assez médiocre, rendant difficile leur identification. La majorité des fragments collectés sont de dimensions trop faibles pour être analysés. Les sédiments particulièrement argileux et aux caractéristiques expansibles sont certainement très nuisibles à leur préservation (ceux-ci montrent de nombreuses cassures plus ou moins émoussées). Néanmoins, l'échantillon ayant livré le plus de fragments est U3_{sup}, mais ils sont en grande majorité indéterminables. C'est l'unité encaissante U2 qui a livré le plus de charbons identifiables. Tous échantillons confondus, nous avons pu identifier quatre taxons ligneux : frêne (*Fraxinus* sp.), bouleau (*Betula* sp.), aulne (*Alnus* sp.), et un saule ou peuplier indéterminé (*Salicaceae*). Deux fragments semblent correspondre à des cœurs de branche (présence de moelle). On notera la présence d'un fragment de bouleau dont l'anatomie correspond à du bois racinaire, mais il s'agit d'un fragment de bois non carbonisé. Quelques tiges d'angiospermes monocotylédones carbonisées sont également possibles, mais incertaines (indéterminés). Les essences identifiées sont tout à fait cohérentes avec une végétation locale. Elles peuvent être retrouvées sur des terrains fortement marqués par l'engorgement, seulement saisonnièrement inondés, ou associés à une nappe d'eau permanente profonde liée aux ruissellements (Beaufils, 1983). Compte tenu du contexte

⁸⁰ UMR 6249 Chrono-environnement.

du prélèvement, il n'est pas possible d'assurer leur contemporanéité. Néanmoins, ces résultats montrent qu'il existe un potentiel d'analyse certain puisque les prélèvements réalisés sont d'un volume assez faible.

Les carporestes des mêmes prélèvements ont été analysés par C. Schaal. Le nombre de restes retrouvé est faible (n = 30). Seules deux graines présentes sous forme carbonisée ont été retrouvées dans le prélèvement U3_{sup} : *Carex* sp. et *Chenopodium album*.

Tableau 24 : Tableau des résultats de l'étude anthracologique.

En gras le nombre d'individus (N) et en italique leur masse correspondante exprimée en mg (m).

Unité	Unité 2 [24-26]		Unité 3 sommet		Unité 3 [26-32]		Unité 3 [32-40]		Unité 4 [40-42]	
Type de prélèvement	Prélèvement en vrac		Prélèvement à vue (concentration charbonneuse)		Prélèvement en vrac		Prélèvement en vrac		Prélèvement en vrac	
Volume du prélèvement	1,5 L		-		2 L		2 L		3 L	
	N	m	N	m	N	m	N	m	N	m
<i>Fraxinus</i> sp.	9	105	1	168						
cf. <i>Fraxinus</i> sp.	6	13			2	6				
<i>Alnus</i> sp.	1	2								
<i>Betula</i> sp.	1	14								
<i>Betulaceae</i> cf. <i>Betula</i>	2	3								
<i>Betulaceae</i> cf. <i>Alnus/Betula</i>			1	3						
<i>Betulaceae</i>	1	1	1	36						
cf. <i>Betulaceae</i>	2	11	2	41						
<i>Salicaceae</i>	2	2								
Angiosperme dicotylédone	12	23	4	25	4	3				
Indéterminables/indéterminés	> 20	34	6	50	> 50	26	> 10	3	4	13
Bois non carbonisés :										
<i>Betulaceae</i> cf. <i>Betula</i> (racinaire)	1	99								
Angiosperme dicotylédone			1	3						

5.8.2. Analyse palynologique

Une étude palynologique a été menée par Hervé Richard. Six échantillons du sondage 3, provenant d'un prélèvement en rail propre à cette étude, ont été préparés. Pollens et microfossiles non polliniques (MNP) ont été identifiés et décomptés. La Figure 83 synthétise les résultats des identifications palynologiques, avec les taxons regroupés par catégories écologiques simplifiées. Le nombre total de pollen et de MNP illustre que la préservation est très variable selon les unités analysées. L'unité U4 présente un potentiel quasi nul et ne permet aucune interprétation, ce que l'on aurait tendance à imputer à sa richesse en argiles gonflantes. On notera tout de même que de nombreuses particules carbonisées ont été relevées dans U4. L'unité U3 montre au contraire une préservation assez bonne du matériel sporo-pollinique, qui pourrait s'expliquer par sa granulométrie plus grossière et la faible proportion relative des minéraux argileux.

L'unité U5 est très largement dominée par les fougères, et les spores d'aquatiques n'occupent qu'une place mineure. Les pollens d'herbacés restent très faibles par rapport aux taxons arboréens. Malgré les faibles totaux d'individus, l'assemblage sporo-pollinique des trois échantillons de U5 reste assez similaire. Plusieurs interprétations pourraient être proposées vis-à-vis de ce spectre. Les fougères pourraient trahir l'existence d'ouvertures ponctuelles du milieu ou dans le secteur de la moraine frontale, qui pourraient être reliées à la mise en place de ces colluvions. L'unité 3 montre un assemblage relativement diversifié en comparaison de U5. Les herbacées sont légèrement mieux représentées, mais les taxons arboréens sont toujours majoritaires. Par contre, les spores de plantes aquatiques deviennent particulièrement abondantes. Ce phénomène est difficile à expliquer compte tenu de la localisation du sondage par rapport au lac et de leur nettement plus faible présence en U5. Est-ce que ce phénomène pourrait marquer un haut niveau lacustre prolongé et donc une avancée vers les terres des terrains humides ? Outre cela, on remarque surtout l'apparition des taxons indicateurs de milieux cultivés (*Cerealia*), pâturés (*Plantago lanceolata* et *P. major/media*, *Artemisia*) ainsi qu'une spore de champignon coprophile (*Sporormiella*). Ces résultats indiquent la présence d'activités agro-pastorales à faible distance du secteur du sondage SD3, voire sur les lieux mêmes. Le cortège pollinique de U1 montre une légère augmentation des herbacés et quelques indicateurs culturaux et pastoraux, mais ces derniers sont moins bien représentés que dans U3.

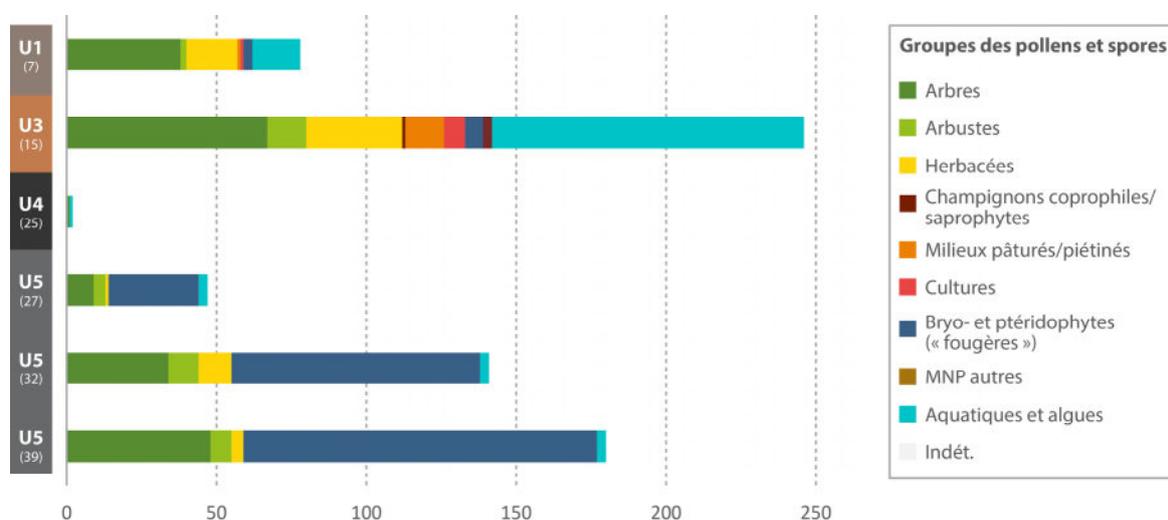


Figure 83 : Diagramme pollinique simplifié de SD3.

5.8.3. Analyse de la signature spectrale des matières organiques par SPIR

La préservation des restes botaniques de la séquence pédo-sédimentaire étudiée s'étant révélée relativement mauvaise, quoique loin d'être infructueuse, nous avons cherché à tester d'autres approches pour nous renseigner sur le contexte paléo-environnemental lié à la mise en place de l'unité ocrée. Une première série d'analyses par spectroscopie proche infrarouge (SPIR) a été réalisée par Damien Ertlen⁸¹, afin de tester le potentiel dans ce contexte pédo-sédimentaire. La SPIR est une méthode d'analyse qui permet notamment de caractériser la signature des matières organiques des sols (Ertlen et al., 2010, 2015). Leur comparaison avec des référentiels d'horizons organiques de surface actuels, développés sous différentes végétations connues, permet via des traitements statistiques de prédire le type de végétation dont elles sont issues. Il faut évidemment tenir compte du fait que ce signal, extrait à partir d'une même unité pédo-sédimentaire, ne représente qu'une « moyenne » relative aux matières organiques accumulées au cours du temps, et potentiellement formées à partir de différents types de végétation. À cette variabilité s'ajoutent des processus pédologiques et sédimentaires entraînant l'enfouissement et la dégradation progressive de ces MO. Six prélèvements des unités supérieures de SD3 ont été analysés. Ils ont ensuite fait l'objet d'une discrimination statistique bivariée (analyse canonique) entre un groupe « prairie » et un autre « forêt », qui repose sur un référentiel de 1178 horizons de surfaces actuels, provenant de 75 sites (jeu de données et traitement statistique par D. Ertlen). La Figure 84 présente les résultats obtenus.

Si l'on considère que les MO de U1 (horizon A) correspondent principalement à des apports « récents », à une échelle séculaire, le résultat sous le groupe prairie paraît cohérent vis-à-vis de la documentation historique disponible. Que ce soit sur la carte de l'état-major (1866, Feuille de Lons-le-Saunier), sur la carte IGN (SCAN 50® Historique) et les photographies aériennes des années 1950, ou les cartes postales plus anciennes (Pétrequin et al., 2000), les secteurs directement en amont du littoral crayeux se présentent comme un paysage de prairie ouvert ou sont renseignés comme marais. Sur la carte de Cassini (XVIII^{ème} s.), dont la précision de l'information est évidemment plus limitée, il n'y a pas d'indication de boisements hormis sur les plateaux attenants au lac. Les deux échantillons de U5 correspondent aux prélèvements de la base (66-72) et du sommet (42-50) de l'unité. Les matières organiques y présentent aussi un signal clairement caractéristique d'un milieu prairial. La différence par rapport aux résultats palynologiques peut s'expliquer du fait que la SPIR permet de restituer un signal environnemental beaucoup plus local. On observe ensuite un changement radical entre le sommet de U5 et U4, ce dernier montrant une signature typique d'une végétation forestière. U2 est classée à l'intermédiaire des deux groupes de référence.

L'échantillon de l'unité ocre obtient quant à lui un score positif élevé, qui s'écarte relativement des scores des référentiels de surfaces forestières. De tels résultats ont déjà été observés dans de nombreux cas de paléosols (enfouis), datés de différentes périodes de l'Holocène (Ertlen, 2009, chap. 10). Cependant, l'explication de ce phénomène de décalage avec les référentiels spectraux actuels n'est pas connue. Plusieurs hypothèses explicatives ont été formulées, notamment la possibilité que ce type de réponse traduise l'existence d'un écosystème particulier non référencé, ou le fait d'une préservation

⁸¹ Université de Strasbourg, UMR 7362 LIVE.

différentielle des MO selon qu'elles proviennent d'une végétation forestière ou prairiale (ibid.). Compte tenu de la combustion (incomplète) de U3, la possibilité d'une dégradation plus importante des composés organiques les moins fortement intégrés aux matières minérales reste possible. Ces points devront nécessairement être précisés pour pouvoir assurer les résultats de la méthode SPIR. En attendant, l'hypothèse que le développement de U4 et de U3 soit associé à un milieu boisé doit être considérée.

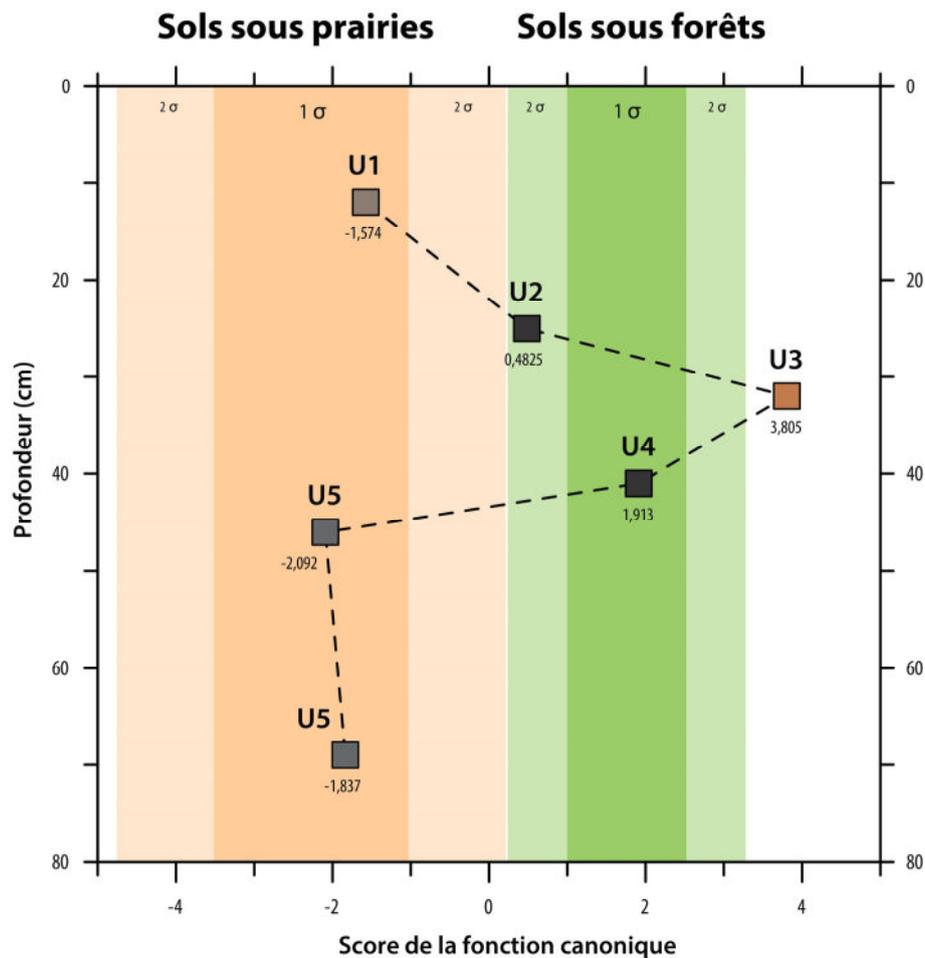


Figure 84 : Résultats du classement statistique (score de fonction canonique discriminante) des spectres du proche infrarouge des matières organiques du profil SD3 de Chalain.

5.9. Du profil pédologique au bassin versant de Chalain-ouest : premiers résultats

5.9.1. Prospection géophysique

Compte tenu des caractéristiques magnétiques de l'unité ocrée, et de sa présence à relativement faible profondeur, il est apparu pertinent de mener une prospection géophysique pour tenter de cerner l'extension du phénomène. Ce travail a été réalisé par Christian Camerlynck⁸² avec un CMD Mini-Explorer. Une zone de 30 x 50 m incluant l'emplacement de SD3 a été définie en vue d'un premier test. Un second secteur plus important a été cartographié lors de la campagne de 2022 (100 x 120 m). Les résultats du signal de phase sont présentés sur la Figure 85.

Sur la cartographie du secteur de SD3, on observe un gradient général est-ouest du signal de phase, qui correspond à une dérive de l'appareil, causée par les fortes températures lors de la prospection. Outre cela, on observe un certain nombre d'anomalies de valeurs élevées (taches blanches ou rouges). Le même phénomène est observé dans le second secteur. Ces anomalies sont observables sur une bande parallèle à la rive du lac, distante d'environ 150 à 200 m de sa limite actuelle. Quelques-unes de ces taches ont été sondées à la tarière ou par sondage, pour vérifier la présence d'anomalies comparables à celle de SD3, ce qui a été confirmé à chaque fois.

L'anomalie repérée au sondage SD3 se révèle tout à fait remarquable, puisqu'elle s'étale sur près de 8 m. Des sondages à la gouge ont été effectués tous les mètres pour vérifier l'extension spatiale de cette anomalie. Ils se sont révélés positifs avec l'anomalie géophysique, bien que l'unité ocrée soit apparue très irrégulière. Elle n'est parfois identifiée que sous la forme d'agrégats de terre ocrée dispersés, tandis que dans un cas, nous avons relevé une épaisseur de presque 30 cm de terre ocrée. Leur association aux unités encaissantes U2-U4 n'est pas systématique, parfois aucune, parfois seule l'une d'entre elles a pu être identifiée. Les traces ocrées sont retrouvées jusqu'à une profondeur maximum de 50 cm, toujours au-dessus des colluvions réductiques. D'autre part, on note que l'emplacement de SD3 se trouve à une extrémité de l'anomalie magnétique, ce qui apparaît finalement cohérent avec les observations des profils, qui montrent la disparition progressive de l'unité ocre en direction du sud-ouest.

Sur cette parcelle, qui correspond à une surface de 1500 m², la cartographie magnétique montre que ces anomalies couvrent environ 87 m², soit 5,8 % de la surface, ce qui n'est pas négligeable. Les autres anomalies identifiées ont des dimensions de quelques mètres voire moins. Nous avons vu que le signal magnétique de l'unité 3 est assez irrégulier, il sera donc nécessaire de faire le lien entre ces deux échelles d'analyses pour préciser les modalités de leur repérage cartographique.

⁸² Sorbonne Université, UMR 7619 METIS.

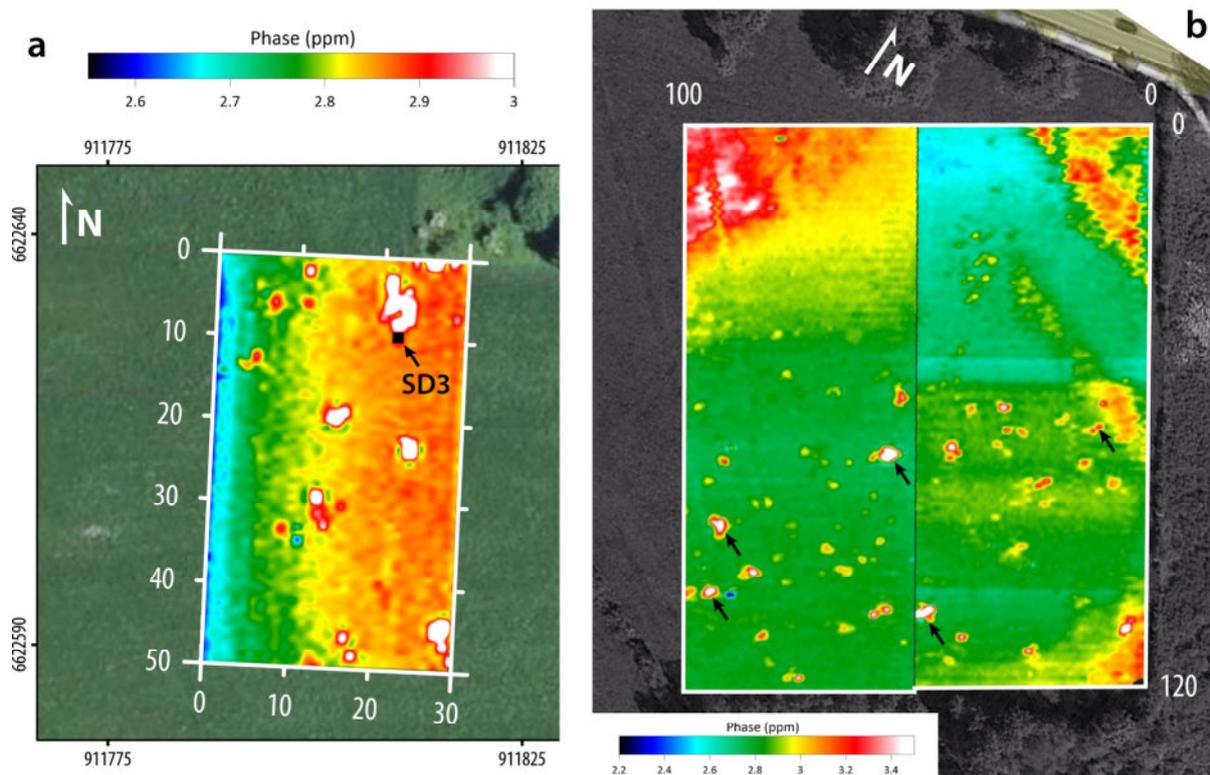


Figure 85 : Résultat de la cartographie magnétique du secteur du sondage 3 (a) et celui de la campagne 2022 (b). Cartographie du signal de phase (configuration dipôles verticaux, écartement de 1,18 m). Le carré noir représente la surface de SD3. Les flèches pointent les anomalies vérifiées.

5.9.2. L'anomalie ocrée-rubéfiée du sondage 7

En 2022, une autre anomalie a été sondée (SD7 ; voir l'emplacement en Figure 55). Sa morphologie s'est révélée globalement proche de celle de SD3, quoique légèrement plus rouge sombre. En comparaison de cette dernière, elle a fourni des charbons de bois épars, mais bien visibles en coupe, et d'autres formant des concentrations importantes et clairement associées aux sédiments ocrés. Des faciès assez singuliers ont été identifiés, qui mériteraient d'être détaillés. Nous nous bornerons à dire que certains d'entre eux évoquent des traits rédoximorphes, sous la forme de concentrations ferriques rouilles, par exemple au niveau d'une interface texturale nettement plus argileuse (voir l'effet de « plancher » rougeâtre de la Figure 86.a). Une trace de coupe d'outil particulièrement nette et dentelé a été relevée (Figure 86.b). Elle tronque sub-verticalement l'unité noirâtre encaissante, et elle est associée à une « motte » de terre rubéfiée, avec un comblement interstitiel argileux sombre bleuté verdâtre (comparable à U5). À un autre endroit, nous observons que l'unité ocre rubéfiée montre plusieurs recouvrements subparallèles et subhorizontaux qui s'enfoncent ou traversent l'unité noirâtre. Il est certain que ces traces ne sont pas très régulières, mais elles nous évoquent le passage d'outils aratoires. Outre ces phénomènes particuliers, nous retrouvons les caractéristiques générales identifiées sur l'anomalie ocrée de SD3.

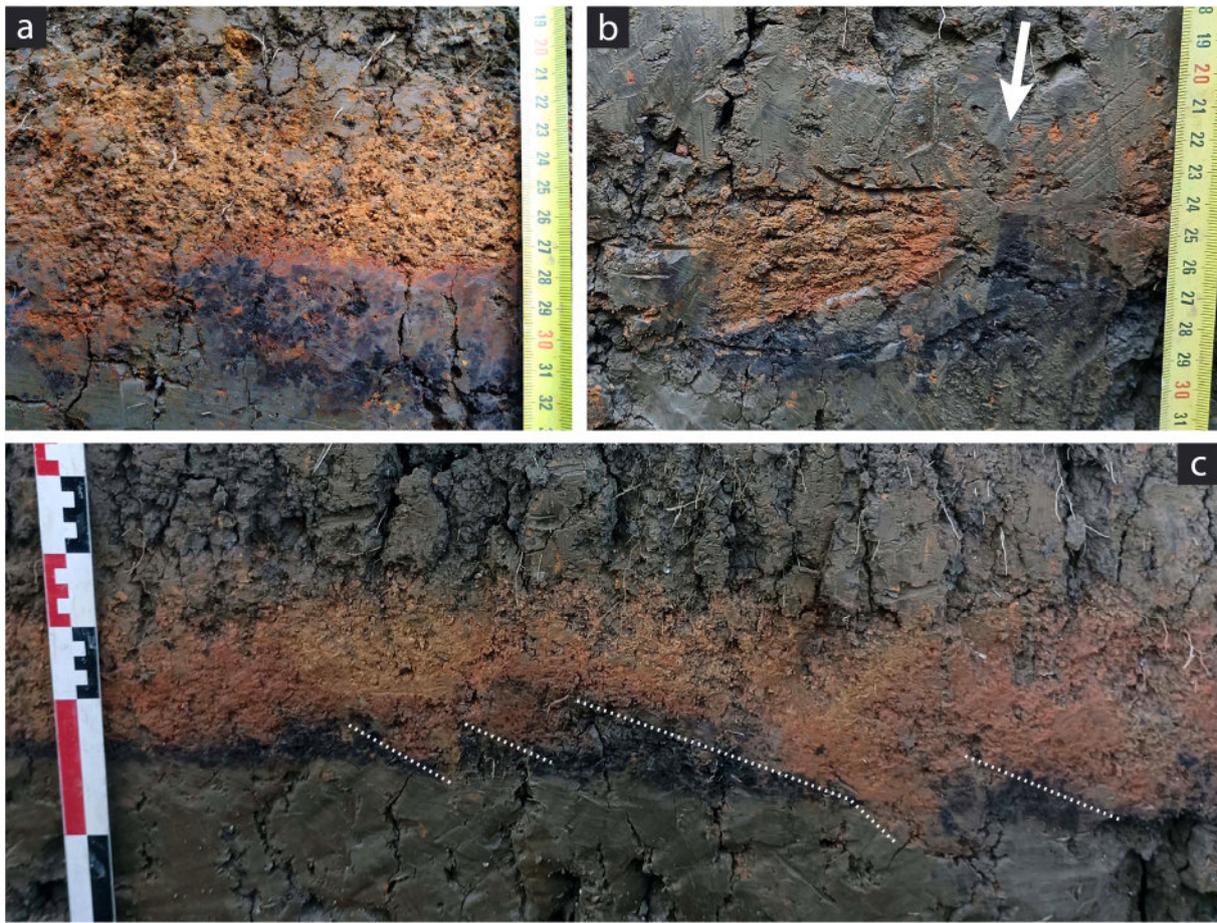


Figure 86 : Illustration des phénomènes marquants identifiés sur l'anomalie ocrée-rubéfiée de SD7.

- (a) Noter la rubéfaction plus marquée au niveau de l'interface avec l'unité argileuse noirâtre inférieure ; cette dernière montre ici une forme granulaire assez fine.
- (b) Morphologie interprétée comme une trace aratoire, recoupant l'unité noirâtre verticale et remaniant une petite masse de terre ocrée-rubéfiée.
- (c) L'unité rubéfiée recoupe nettement l'unité noirâtre verticale inférieure selon des plans subparallèles.

5.9.3. Des anomalies diachroniques : état des lieux des prospections géoarchéologiques et de la chronologie des anomalies ocrées

La poursuite des prospections nous ont permis d'identifier dans le secteur nord-ouest de Chalain (voir Figure 55), la présence d'une unité argileuse noire plastique tout à fait comparable à U2-U4, mais stratigraphiquement distincte, puisque à la base des colluvions grisâtres réductiques (équivalents de U5). Elle surmonte une unité argileuse à tendance verdâtre de quelques centimètres d'épaisseur, qui recouvre le toit des matériaux carbonatés glacio-lacustres. Ces derniers sont localement varvés, indiquant une dynamique de formation lacustre dominante, en comparaison de SD3. Des traces ocrées, sous la forme de tâches ou de nodules millimétriques épars ont été observées dans cette unité noirâtre U6bis, ainsi que de très nombreux charbons de bois (Figure 88). Ces traces évoquent le phénomène que nous avons étudié, mais leur caractère particulièrement ténu invite à la précaution pour les interpréter. En particulier compte tenu des observations qui montrent le caractère ambigu entre les phénomènes d'altération thermique et les processus rédoximorphes. Néanmoins, les investigations de terrain au cours

de l'été 2023, ont permis d'identifier dans cette unité profonde, la présence d'anomalies ocrées-rougeâtres assez volumineuses et globalement comparables à celles que nous avons étudiées (Figure 89).

Les résultats des opérations 2021 et 2022 concernant la stratigraphie et la chronologie des formations pédo-sédimentaires péri-lacustres sont synthétisés dans la Figure 87. Le Tableau 25 présente les datations absolues obtenues pour ces différentes anomalies. Elles confirment que ces anomalies correspondent (au moins) à deux phases chronologiques bien distinctes : le haut Moyen Âge et le début du Néolithique récent/final.

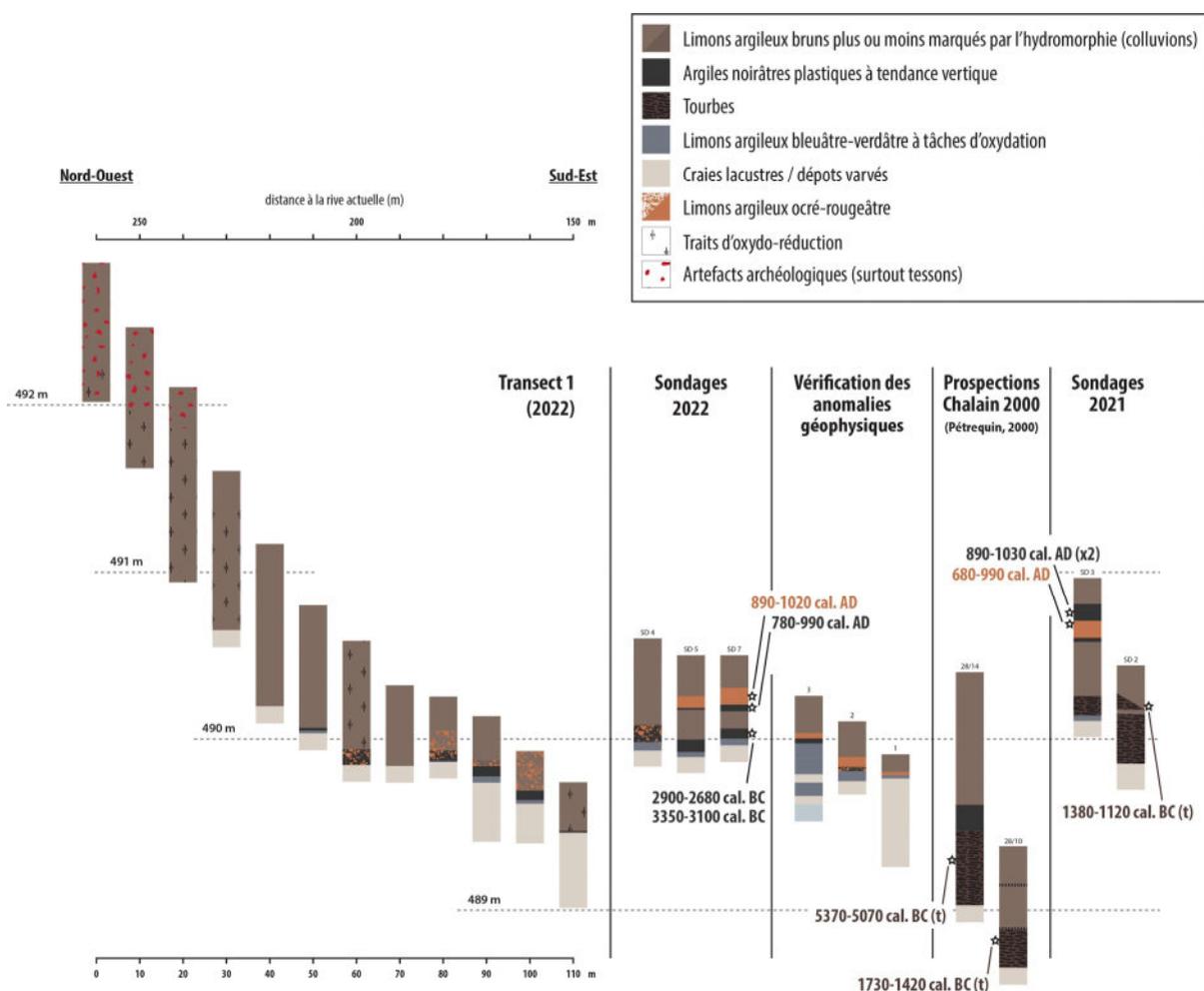


Figure 87 : Synthèse stratigraphique des prospections géoarchéologiques de 2021 et 2022 de la rive ouest de Chalain. La mention (t) indique une datation effectuée sur les sédiments tourbeux.

Trois datations radiocarbone ont été réalisées en association avec l'unité ocrée du sondage 3 : deux sur des charbons d'essences différentes provenant de U2, et un micro-charbon indéterminable provenant de U3. Ce dernier a donné une datation légèrement plus ancienne, ce qui est stratigraphiquement cohérent, néanmoins son intervalle de probabilité est très mal défini. Les deux autres dates sont

statistiquement strictement contemporaines. Un résultat identique a été obtenu pour l'anomalie de SD7, avec une date à peine plus ancienne pour le charbon provenant de U4 que celui de U3. Ces résultats sont cohérents puisque leur contexte stratigraphique est globalement similaire, bien que les deux secteurs soient relativement éloignés (700 m). La datation calibrée combinée de ces cinq dates nous donne l'intervalle de probabilité : 890-1000 cal. AD, ce qui correspond à la fin du haut Moyen Âge.

Tableau 25 : Datations radiocarbone associées aux anomalies pédo-sédimentaires ocrées et vertiques de Chalain.

Opération	Sondage-Unité	Taxon	Age BP brut	Intervalle calibré (2 σ)	ID Lab
Chalain 2021	SD3-U2	Fraxinus sp.	1075 \pm 30	890-1030 cal. AD	Poz-147996
Chalain 2021	SD3-U2	Betulaceae	1075 \pm 30	890-1030 cal. AD	Poz-148049
Chalain 2021	SD3-U3	Indét.	1190 \pm 60	680-990 cal. AD	Poz-148403
Chalain 2022	SD7-U3	Fraxinus sp.	1080 +/- 30	890-1020 cal. AD	Beta-639713
Chalain 2022	SD7-U4	Feuillu indét.	1130 +/- 30	780-990 cal. AD	Beta-639710
Chalain 2022	SD7-U6bis haut	Populus/Salix	4510 +/- 30	3350-3100 cal. BC	Beta-639711
Chalain 2022	SD7-U6bis bas	Populus/Salix	4220 +/- 30	2900-2680 cal. BC	Beta-642336

Les charbons de bois de l'unité argileuse noirâtre (U6bis) à la base des colluvions réductiques nous donnent des résultats assez proches, mais non contemporains. De plus, on remarque leur inversion stratigraphique. Les charbons proviennent de concentrations relativement notables, et l'unité est latéralement associée (SD7) à de rares traces ocrées millimétriques. Les futures datations permettront de confirmer leur contemporanéité avec les unités ocrées épaisses qui viennent d'être mises au jour, ce qui fait peu de doute compte tenu de leur proximité (environ 75 m) et de la géométrie générale des formations dans ce secteur. Ces deux dates sont donc nettement plus anciennes que les précédentes et correspondent au Néolithique récent/final. Elles sont toutes les deux contemporaines des périodes d'occupations des sites palafittiques. Le site de Chalain 3, ayant permis de documenter plusieurs occupations dont la chronologie recouvre celles obtenues (Horgen, Ferrières, Clairvaux récent), se situe à un peu plus d'une centaine de mètres environ en direction du lac. Compte tenu de l'écart des dates et de leur stratigraphie, il n'est pour le moment pas possible d'être plus précis quant à leur attribution. On observera néanmoins que les anomalies ocrées nouvellement découvertes montrent un léger décalage stratigraphique (Figure 89.a). Deux d'entre elles, qui ne sont néanmoins pas superposées, semblent intercalées par un niveau de colluvions grisâtre d'une dizaine de centimètres, qui indiqueraient un certain décalage temporel, au sein même de ces anomalies profondes. Tout ceci sera précisé par les recherches en cours.

D'autre part, les résultats géoarchéologiques montrent que le secteur nord-ouest de la rive occidentale de Chalain n'a pas connu la même dynamique pédo-sédimentaire que le secteur central (SD3) et sud-ouest, à ces périodes anciennes. Dans ces secteurs, les formations tourbeuses sont datées de l'Atlantique et du Subboréal. La géomorphologie générale du bassin versant avec le rapprochement de la moraine frontale, et donc une pente légèrement plus marquée dans le secteur nord-ouest peut

expliquer que la sédimentation minérale ait pu être plus marquée. Toutefois, la faible puissance stratigraphique des dépôts reste remarquable. Et surtout, la faible épaisseur qui sépare les formations glaciaires des unités attribuées au Néolithique. À l'échelle d'une si longue période, et dans un secteur de pied de versant, il nous paraît difficilement concevable qu'aucun horizon de sol ne se soit développé (à moins que le niveau du lac ne fût particulièrement élevé ?). Ce hiatus pédo-sédimentaire des premiers millénaires de l'Holocène reste encore à expliquer.

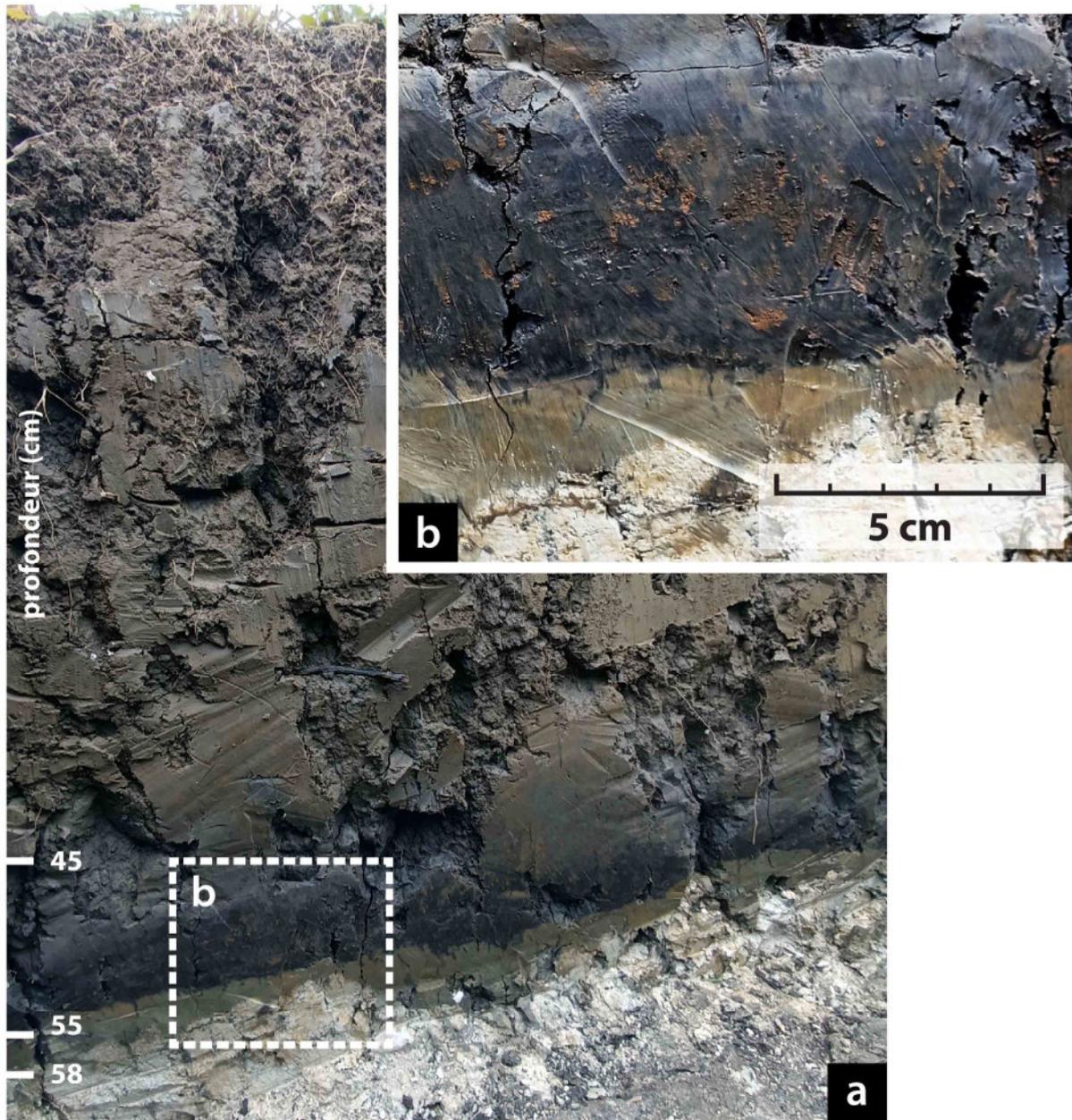


Figure 88 : Traces ocrées diffuses au sein d'une unité argileuse noirâtre verticale datée du Néolithique (SD7). Traits pédologiques d'oxydation ou résidus microscopiques d'altérations thermiques ?

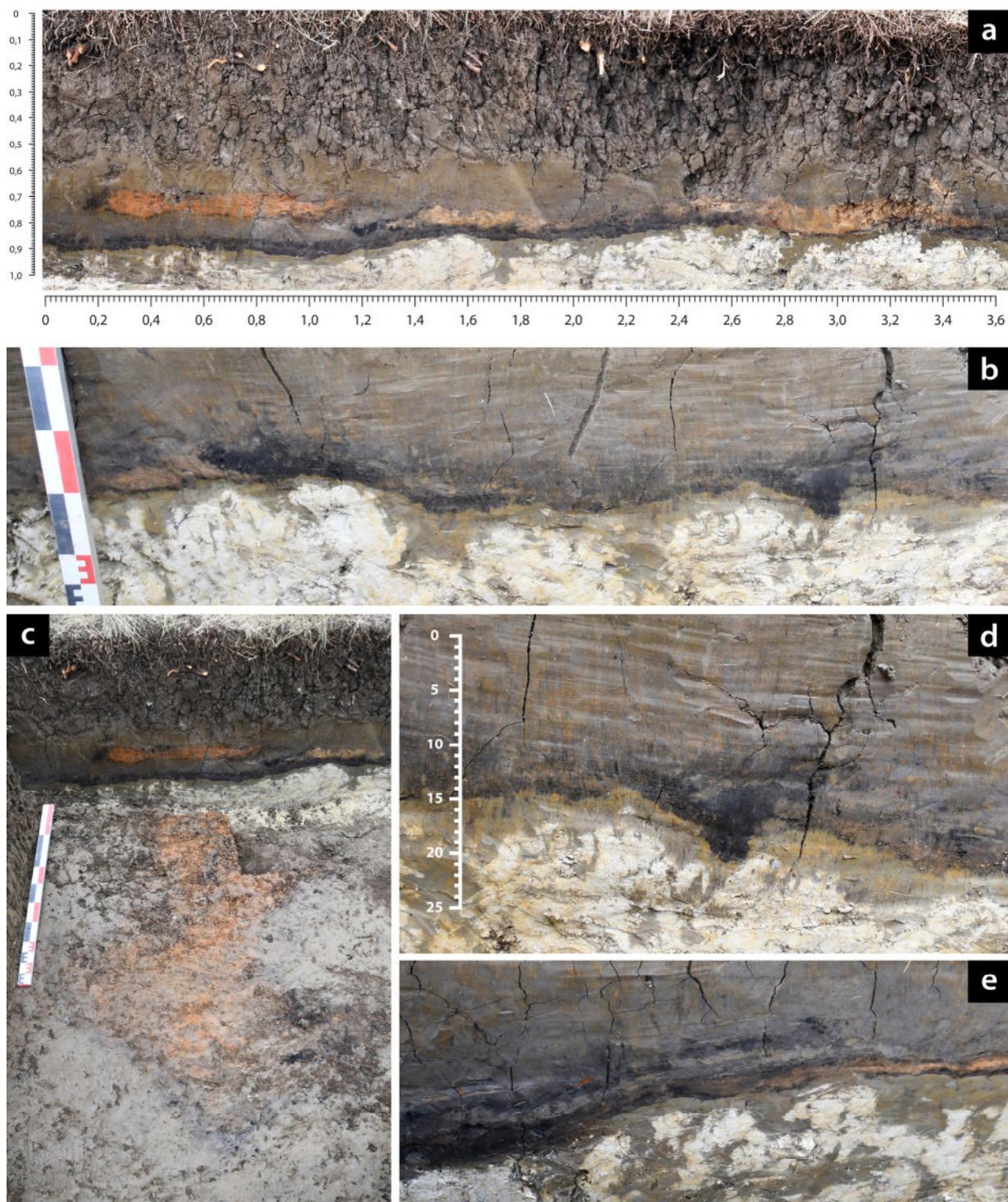


Figure 89 : Anomalies pédo-sédimentaires ocrées-rubéfiées mises au jour dans l'unité stratigraphique attribuée au Néolithique (fouille 2023).

(a) Prise de vue générale (échelle en m). Noter les décalages stratigraphiques entre les unités ocrées-rubéfiées, et leurs bordures latérales prenant la forme d'une argile noirâtre plastique. (b) Vue rapprochée de l'unité noirâtre verticale localement ponctuée de traces ocrées. Noter sa base relativement franche, mais très irrégulière (bosselée) et sa limite supérieure au contraire assez progressive avec les argiles grisâtres réductiques. (c) Traces rubéfiées en cours de fouille (au premier plan). Noter la forme quasi quadrangulaire ourlée de façon diffuse d'argiles noires. (d) Vue de détail d'un enfoncement de l'unité verticale dans les dépôts inférieurs (échelle en cm). Possible marque d'un outil relativement épais (environ 3 cm de large) ? (e) Vue rapprochée des dépôts micro-lités à micro-bioturbés grisâtres intercalés dans les argiles noirâtre verticales. Noter aussi la forte irrégularité des dépôts carbonatés glacio-lacustres et argileux inférieurs.

6. Discussion

6.1. Processus de formation de l'unité ocrée

Les résultats de l'observation fine de l'anomalie pédo-sédimentaire ocrée, ainsi que ceux des analyses physico-chimiques nous ont permis d'observer sa relative complexité et sa singularité. Selon les approches considérées, différentes hypothèses peuvent être formulées pour expliquer leur formation.

Les résultats des analyses minéralogiques, à travers la disparition de certains phyllosilicates, sans qu'il y ait d'enrichissement relatif en d'autres minéraux, constituent un argument fort vers l'hypothèse d'une chauffe. Cependant, la rareté de l'hématite alors que la goethite est bien représentée pourrait s'y opposer. L'importance de l'accroissement de la susceptibilité magnétique par rapport aux autres unités paraît difficilement explicable par une évolution pédologique. Mais, il apparaît que les plus forts enrichissements en particules magnétiques se trouvent au niveau de faciès macroscopiques dont la morphologie évoque celle de traits d'oxydation pédologique. Les approches microscopiques démontrent également l'existence de traits rédoximorphes, ainsi que la complexité de ces faciès, à une tout autre échelle. Néanmoins, elle n'offre pas d'argument direct en faveur d'une combustion (absence notamment de charbons). Les résultats granulométriques sont cohérents avec l'hypothèse d'une chauffe (formations des pseudo-particules), mais ils pourraient a priori aussi être interprétés comme le résultat de phénomènes pédologiques. Les analyses élémentaires montrent un enrichissement en fer et en éléments traces qui vont dans le sens d'une évolution influencée par la dynamique hydrologique. L'évolution de certains éléments peut cependant être interprétée en lien avec une chauffe, comme la diminution du soufre et du cuivre. Mais, d'après les ratios élémentaires, il y aurait également une argilisation marquée dans cette unité, ce qui est contradictoire avec les observations minéralogiques et contraste avec la diminution des argiles granulométriques. Les résultats des dosages des formes du fer et de l'aluminium peuvent s'accorder avec les effets d'altérations thermiques, mais nous manquons de référentiel de comparaison sur des structures de chauffe. La présence des charbons de bois constitue un autre argument, mais celle-ci paraît très variable, et ils peuvent être difficiles à identifier sur les coupes (comme l'illustre le contraste flagrant avec l'anomalie du sondage SD7).

Considérés ensemble, ces résultats permettent de conclure que la formation de l'unité ocrée résulte d'au moins deux processus majeurs, d'abord une chauffe de la terre, puis, une évolution secondaire des matériaux principalement sous l'influence de la dynamique hydrologique. Si certains des phénomènes mis en évidence peuvent assez clairement être reliés à l'un ou l'autre processus, d'autres sont plus ambivalents. Le cas des pseudo-particules notamment, que nous aurions tendance à imputer à une cuisson relativement poussée de certains agrégats d'après la micromorphologie, mais que sur le terrain, nous avons plutôt supposé être un début de concrétionnement lié à la dynamique de circulation de l'eau. Il est possible que ces deux processus en soient la cause, mais aussi qu'ils aient pu s'influencer l'un l'autre. De façon comparable, l'évolution de la susceptibilité magnétique aussi pourrait avoir été favorisée dans des microsites, par les oxydes de fer plus ou moins bien cristallisés par la chauffe.

Mais ces deux phénomènes n'expliquent pas tout. Les différents faciès observés sur les profils pourraient caractériser des modalités de mise en place plus ou moins variées, et cela à une fine échelle

spatiale. D'un côté, certains faciès paraissent en place, et semblent avoir été altérés de façon globalement assez homogène, quand d'autres, semblent avoir subi un remaniement mécanique plus ou moins fort. Cela est confirmé par les observations micromorphologiques, qui montrent de plus que ces différences de faciès ne sont pas si évidentes à caractériser en macroscopie. En outre, une partie de ces remaniements pourraient résulter d'interventions anthropiques, du moins, nous ne savons pas les expliquer autrement. D'autre part, il apparaît que ces mélanges concernent somme toute relativement peu de matériaux encaissants. À ce titre, la présence d'une petite masse de terre encaissante complètement enfouie dans les matériaux ocrés est d'autant plus significative.

6.2. Processus de formation des encaissants vertiques

D'autre part, l'origine des unités encaissantes vertiques (U4-U2) nous pose clairement question. Sur le terrain, ces unités étaient plutôt interprétées comme les traces plus ou moins diffuses d'un paléosol, ou de sortes de mouillères au sein desquels les traces ocrées auraient pu être favorablement préservées. La possibilité qu'elles résultent d'une cuisson, en l'occurrence d'une cuisson réductrice a été proposée, mais ces caractéristiques physiques, qui tranchent d'autant plus avec la précédente, ne donne aucun indice en faveur d'une cuisson. Cependant, leurs agencements complexes avec l'unité ocre, de même que le simple fait que U2 apparaisse en position supérieure à U3, ne sont pas évidents à interpréter d'un point de vue sédimentaire. Les résultats des analyses se montrent de plus assez ambivalents. Les taux de matières organiques très faibles en U4 et U2, qui sont inférieurs à ceux de U5, ne concordent pas avec l'hypothèse d'un paléosol. Les faibles taux d'azote, de soufre, et de carbone organique, inférieurs à ceux de U3 pourraient aller dans le sens d'une chauffe, quoique dans le cas de cuissons réductrices, cela est plus discutable. Mais, ni la minéralogie ni la susceptibilité magnétique ne vont dans ce sens. Or, dans le cas de chauffées réductrices, on pourrait s'attendre à ce que la production de minéraux ferrimagnétiques, magnétite ou maghémite, soit nettement favorisée et donc que la susceptibilité augmente. Par ailleurs, les expérimentations de cuissons amènent à observer un comportement particulier de U4, et suggèrent que U3 résulte plus certainement de la chauffe d'un matériau aux caractéristiques proches de U5 que de U4. Cela est difficile à expliquer compte tenu de leur stratigraphie vis-à-vis de U3. Mais cela l'est aussi du fait que U5 et U4 sont du point de vue minéralogique assez proche. Ces résultats nous amènent à proposer que le développement de ce complexe vertique résulte soit : d'une évolution secondaire de l'unité U5, sous l'influence directe des matériaux chauffés ; d'une évolution secondaire de matériaux peu ou modérément chauffés (absence ou très faible altération de la vermiculite et de la kaolinite), mais là encore, sous l'influence des modifications induites par les matériaux chauffés.

Cette évolution postérieure, aurait été permise par l'accumulation du fer, de l'aluminium, mais également d'une part de silicium libéré des minéraux argileux par la chauffe, qui dans ce contexte initialement très argileux et relativement confiné, car peu pentu, n'auraient pas été évacués. Leur accumulation, possiblement conjointe à une modification dans le régime des écoulements superficiels liés à l'unité ocrée moins argileuse (réduction de l'activité de l'eau, ruissellement et ressuyage accéléré), aurait permis la néoformation (réhydroxylation) ou la transformation des minéraux argileux déjà présents (agradation). Cette hypothèse permettrait d'expliquer l'enrichissement relatif marqué en aluminium et en fer de U2-U4 par rapport à U5, mais aussi les changements granulométriques de la

fraction argile, l'identification de minéraux chloritiques fortement enrichies en fer, alors que l'on se trouve dans un contexte largement dominé par l'influence du calcium, et enfin, les phénomènes de transitions particuliers observés en lames minces. Les faciès observés sur certaines des anomalies ocrées en profondeur, qui montrent les prolongements argileux noirâtre latéraux, nous semblent bien aller dans ce sens.

La prise en compte de cette hypothèse amène toutefois à de nouvelles questions. Par exemple, doit-on en conclure que la motte de terre encaissante incrustée dans l'unité ocrée résulte d'une évolution postérieure, ou traduit-elle des remaniements postérieurs ? Quid de la trace que nous interprétons comme aratoire dans le sondage SD7 (Figure 86.b), et dont le colmatage intermédiaire est formé d'argile grisâtre réductrice ? Il resterait aussi à expliquer pourquoi cette évolution serait plus ou moins flagrante selon les cas, et quels paramètres concourent à cette variabilité morphologique. Nous aurions tendance à imputer cela aux conditions et à la vitesse d'enfouissement de ces anomalies, mais nous n'avons pas encore suffisamment de données pour le préciser. En l'absence d'enfouissement rapide, les anomalies ocrées auraient été relativement plus sensibles au ruissellement de subsurface, et aux assèchements réguliers, au moins saisonniers, processus qui auraient fortement favorisé l'hydrolyse et la trans(formation) des minéraux argileux, résultant en la formation de ces unités noirâtres. Il apparaît en tout cas flagrant que certaines des anomalies identifiées à la base des séquences paraissent relativement peu affectées par ce phénomène, tandis que l'on observe des niveaux argileux noirâtres où les traces ocrées sont particulièrement diffuses. Dans l'attente de nouvelles analyses qui confirmeront ou infirmeront cette interprétation, nous considérons que ces unités verticales sont intimement associées à la formation des anomalies ocrées.

6.3. Interprétation des anomalies pédo-sédimentaires

Les traces identifiées à Chalain, que nous avons qualifiées d'anomalies de manière un peu générique, pour ne pas présumer de leur origine, apparaissent effectivement assez singulières. Elles présentent notamment un certain degré de variabilité, percevable à différentes échelles d'analyses, qui comme nous l'avons vu, complexifient leur compréhension. Cela étant, le processus de chauffe apparaît comme le point majeur et initial de leur formation. Comment l'interpréter ?

À l'échelle du profil du sondage SD3, certains indices pourraient aller dans le sens de structures foyères, comme la présence de charbons en position sommitale, ou les concentrations parfois plus rubéfiées en surface. Néanmoins, les autres caractéristiques ne vont pas dans ce sens, et montrent une grande irrégularité et un brassage notable. Quant à l'hypothèse des foyers d'essartages, elle n'est pas soutenue par les résultats anthracologiques qui montrent la concentration de plusieurs essences, et ne nous permettent pas d'identifier de bois racinaire. Le fait le plus frappant est l'importance du volume de matériaux en terre affectés par la chauffe, et d'autant plus face à la très faible quantité de végétaux carbonisés. Ce volume est déjà notable à l'échelle seule du sondage de superficie réduite. L'extension de l'anomalie géophysique associée à ce sondage, ainsi que les carottages à la tarière confirment l'importance et l'irrégularité de ces traces. Un autre point qui semble notable est que ces traces indiquent des conditions de chauffe très largement oxydantes. Ceci paraît difficilement explicable dans le cas d'une surface chauffée en place.

D'autre part, les autres carottages et sondages et les prospections géophysiques confirment l'importance et la récurrence spatiale de ces phénomènes. La dispersion sur une grande surface des anomalies magnétiques, suggère une multitude d'évènements, dont la contemporanéité ne peut pas être démontrée a priori. Cependant, la stratigraphie générale des formations pédo-sédimentaires et les premières datations radiocarbone vont dans le sens d'une chronologie relativement courte. Deux périodes très éloignées sont distinguées, qui apparaissent assez cohérentes avec leurs situations stratigraphiques respectives. Par contre, il n'est pas certain que les cartographies magnétiques mettent seulement en évidence les phénomènes attribués à la période médiévale. Certains carottages laissent penser que les niveaux profonds (au toit des matériaux glacio-lacustres) pourraient se retrouver à faible profondeur, du fait de l'érosion postérieure, actuelle (voir Figure 87). Outre ces réserves, les résultats indiquent que, bien que ces traces soient discontinues et dispersées (d'un point de vue spatial), il ne s'agit pas de phénomènes aléatoires.

Ces différentes observations ne vont pas vraiment dans le sens de phénomènes naturels, dont par ailleurs nous n'expliquons pas comment ils pourraient engendrer de telles morphologies. La configuration de ces anomalies, tant à l'échelle d'un de ces faits (macroscopique et microscopique), que leur configuration spatiale, nous paraissent clairement s'accorder avec ceux de vestiges de fourneaux en terre, dans le cadre de pratiques agricoles, c'est-à-dire des vestiges d'écobuages.

L'hypothèse de cette pratique permet d'expliquer à la fois le caractère relativement homogène de certains faciès, par la cuisson de masse de terre en conditions oxydantes, ainsi que les plus ou moins forts remaniements mécaniques, comme le fait des travaux aratoires et des activités postérieures, intervenants à différents degrés, en différents endroits de la surface du sol. Une telle hétérogénéité de situations nous paraît tout à fait correspondre avec l'hypothèse d'une surface labourée (Papy, 1987 ; Manichon, 1988 ; Coulomb, Caneill et Manichon, 1993 ; Gebhardt, 1999). L'hypothèse d'un horizon cultural permettrait également d'expliquer que certaines unités verticales montrent une surface inférieure particulièrement franche (excepté quelques petites traces racinaires, voir Figure 88). Cette observation est difficile à interpréter dans le cadre d'une hypothèse sédimentaire (les constituants des formations encaissantes sont globalement similaires et sans réelle discontinuité granulométrique) que dans celui d'une hypothèse pédologique (absence d'horizonation). Les dernières fouilles des anomalies profondes ont permis d'observer que la base de cette unité noirâtre montrait en certains endroits des formes bosselées et creusées, tronquées, évoquant des surfaces d'arrachements, qui vont tout à fait dans le sens de cette interprétation. Il s'agirait donc, non pas d'une discontinuité sédimentaire, mais de la surface de fond du décapage initial de l'écobuage (surface d'arrachage des mottes de terre), sur laquelle les matériaux chauffés se sont redéposés. De plus, l'hypothèse agricole permet de fournir une explication aux très faibles taux de matières organiques, d'azote et de soufre (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979 ; Hébert, 1979 ; Dalal et Mayer, 1986) alors que nous peinons à identifier des indices de chauffe. Les labours postérieurs pourraient aussi avoir facilité l'acquisition de ces caractéristiques verticales là où ils ont été répétés, mais cela reste à démontrer (Feller, Albrecht et Tessier, 1995). Enfin, les expérimentations de cuissons et la colorimétrie donnent des résultats qui sont compatibles avec les gammes de températures indiquées pour des structures en fourneaux.

6.4. Les écobuages médiévaux

Sur la seule base des observations géoarchéologiques, il est impossible d'assurer que les deux traces d'écobuage datées (SD3 et SD7) soient strictement contemporaines. En outre, compte tenu de la distance qui les sépare, il nous paraît extrêmement peu probable qu'elles résultent de la même opération. Aussi, le dépouillement des inventaires des travaux antérieurs montre que des traces comparables sont retrouvées sur une vaste superficie de la cuvette péri-lacustre. On peut supposer qu'au moins une partie de ces traces résultent des mêmes phénomènes, mais leur attribution chronologique reste très incertaine, compte tenu de leurs différents contextes stratigraphiques. Par ailleurs, si l'on considère l'hypothèse que le développement des caractères vertiques est postérieur à la combustion, alors il est envisageable que l'écobuage ne soit pas la seule opération menée, à l'échelle d'une structure. La morphologie des indices que nous interprétons comme traces aratoires, malheureusement trop ponctuelles, pourrait en effet suggérer des activités culturelles, dont peut-être des écobuages antérieurs, plus ou moins espacés dans le temps. C'est du moins ce qui nous paraît le plus probable pour expliquer conjointement la formation des faciès vertiques et les effets de troncatures et de réintégration de ces derniers dans les niveaux ocrés. En prenant compte de ces différents aspects, il nous semble plus prudent de considérer que ces vestiges correspondent à une série d'évènements ponctuels, répétés en différents lieux de la cuvette péri-lacustre, et possiblement parfois aux mêmes endroits, mais relativement circonscrit dans le temps (échelle décennale à séculaire ?). Cela étant, nous faisons l'hypothèse que ces vestiges s'inscrivent dans un même mouvement général de valorisation agro-pastorale du secteur, dans lequel l'emploi de l'écobuage occupait une place notable.

Les données palynologiques acquises au sein même des traces d'écobuage montrent la présence de céréales et d'indicateurs agro-pastoraux, ce qui apporte un indice fort dans le sens de l'interprétation agricole. De plus, certaines traces aratoires indiqueraient une possible « reprise de labour ». Toutefois, ces vestiges de fourneaux ne sont pas complètement remaniés. Leur épaisseur en témoigne, et surtout leurs caractéristiques physiques, qui montrent que si les remaniements mécaniques peuvent être importants, ils ne sont pas généralisés. Au contraire, c'est même l'hétérogénéité des faciès structuraux qui nous frappe. Il nous semble que cela constitue de bons arguments en faveur d'une mise en culture temporaire. L'écobuage aurait été suivi d'une seule année de culture, et éventuellement d'une ou plusieurs autres, mais après un certain laps de temps (mais peut-être pas nécessairement par écobuage). Cela nous semble être l'hypothèse la plus à même d'expliquer que l'on observe tantôt des masses de terre cuite quasi préservées (mottes), tantôt des faciès très perturbés par les labours. Il est nécessaire de multiplier les observations sur d'autres structures pour confirmer ce schéma général.

Un point qui est difficile à restituer est celui de l'état végétal antérieur à l'écobuage et son évolution ultérieure. Les résultats de la caractérisation des matières organiques par la SPIR indiqueraient la présence d'un milieu boisé. Le comportement particulier de l'unité ocrée invite toutefois à la prudence. Puisque la combustion des matières organiques n'a pas été complète, il est possible que ce résultat illustre le signal des MO les plus récalcitrantes (Ertlen, 2009, p. 36, 2022). Reste à définir leur nature et leur origine. Néanmoins, si les unités vertiques ne résultent pas directement de la chauffe, mais seulement de l'enrichissement postérieur, ce signal devrait être moins « faussé » que celui de l'unité ocrée. À titre d'hypothèse, on peut envisager que ces opérations d'écobuages aient été menées dans un milieu plutôt boisé. Cela conviendrait avec le fait que les charbons proviennent d'au moins quatre

essences différentes, mais là aussi, nous devons rester prudents. Ceci étant, l'application des fourneaux à un milieu boisé est tout à fait envisageable, bien qu'il faudrait alors considérer que ces vestiges de fourneaux relèvent plutôt d'une pratique d'essartage à couvert que d'un écobuage des mottes de gazon. L'analyse en cours des phytolithes permettra certainement d'apporter des données pour discuter de cette question (collaboration Aline Garnier).

La Figure 90 présente en parallèle des résultats radiocarbone, les fluctuations des niveaux lacustres à l'échelle centro-européenne, ainsi que les résultats d'une séquence palynologique inédite provenant du lac de Chalain (Angeli A., Gauthier E. et Richard H. ; emplacement en Figure 55). Outre les réserves précédemment formulées, si l'on fait l'hypothèse statistique que les fourneaux identifiés résultent d'un même évènement, celui-ci se déroulerait à plus forte probabilité au cours du X^{ème} siècle AD. Cette période correspond d'un point de vue climatique au début de la période de réchauffement et d'abaissement de l'humidité de l'optimum climatique médiéval (Büntgen et Tegel, 2011 ; Magny, 1993, 2013). En considération du contexte pédologique fortement marqué par l'humidité, il est possible que ces conditions aient ouvert la voie ou au moins facilité la mise en œuvre des opérations, et en particulier pour la primo-étape du décapage des terrains.

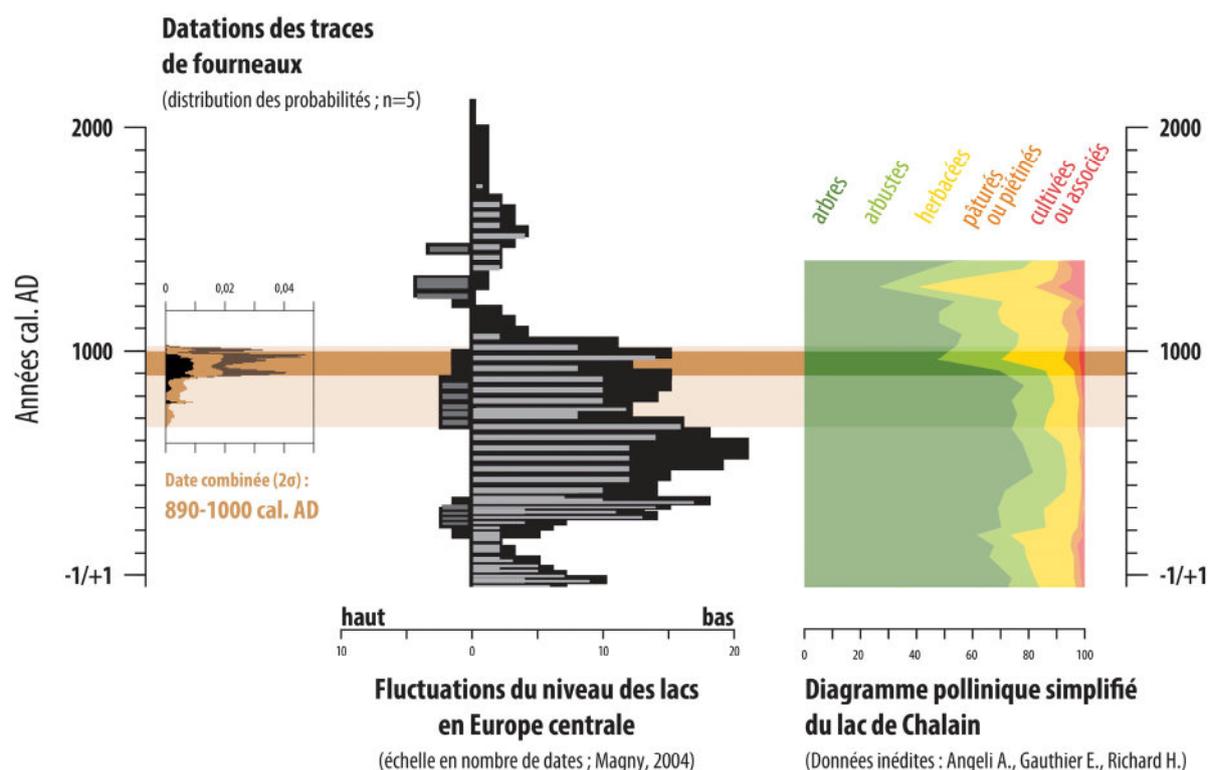


Figure 90 : Contexte environnemental général des écobuages médiévaux.

Cette attribution chronologique est également contemporaine de changements très bien marqués dans le diagramme pollinique de Chalain. On observe un recul marqué des taxons arboréens au profit des herbacés, ainsi qu'une légère augmentation des taxons marqueurs d'activités agropastorales. On note aussi un léger développement des arbustes par rapport aux arbres, qui traduit le développement de

la forêt secondaire. Dans le détail, ce net changement est accompagné d'une réduction assez drastique du hêtre, qui passe de plus de 40 % à environ 15 % de la somme pollinique, alors que le chêne, le noisetier et le saule augmentent en comparaison très légèrement. Ces changements affectent donc principalement les versants et les plateaux périphériques des terrains humides. Ils ne sont donc pas directement reliés aux traces d'écobuage. Néanmoins, il apparaît plus ou moins, à partir de cette période et pendant environ trois siècles, une relative stabilité entre la part des taxons arboréens et non arboréens (avant l'ouverture du milieu nettement plus franche observée vers 1300 cal. AD). La faible répétitivité des emblavures sur un même terrain, qui expliquerait donc la relativement bonne préservation de ces vestiges, pourrait alors peut-être traduire une volonté d'étendre les prairies pour l'élevage (tout en profitant au passage de quelques récoltes). Il n'est pas si facile de faire le lien entre les données diachroniques de l'analyse pollinique, et l'image restituée de ces pratiques d'après les données géoarchéologiques. L'affinement de la chronologie de ces phénomènes permettrait peut-être de préciser cette hypothèse.

La documentation archéologique et historique contemporaine de ces vestiges agricoles est malheureusement très limitée, pour ne pas dire inexistante. Dans ce secteur de la Combe d'Ain, nous avons seulement connaissance d'une mention du Château fort de la commune de Châtillon au X^{ème} siècle, situé au-delà du cours de l'Ain. Il existe une motte castrale implantée sur la moraine frontale de Doucier qui pourrait potentiellement être contemporaine. Néanmoins, de par sa situation géographique celle-ci n'avait certainement aucune visibilité sur les rives ouest de Chalain (d'après les traitements de visibilité en SIG). D'autre part, sur les relevés LiDAR, il existe un certain nombre d'anomalies topographiques linéaires qui caractérisent des parcelles historiques dont certains pourraient potentiellement être médiévaux. Un enclos avec une possible organisation en chicane est également relevé, qui pourrait être en lien avec une activité pastorale (comm. pers. Jérôme Spiesser). Ces indices devront être vérifiés. On mentionnera enfin l'existence d'un vestige monoxyle enregistré comme un fragment de pirogue, découvert au début du XX^{ème} siècle, dont la datation radiocarbone l'attribue à l'époque Carolingienne (690-890 cal. AD⁸³). Ces dimensions et sa morphologie invitent cependant à douter de cette interprétation, il s'agirait plus vraisemblablement d'une auge (selon l'avis général des intervenants), malheureusement, sa provenance exacte n'est pas connue.

Cette quasi-absence d'indices d'occupation pour la période carolingienne est un phénomène assez général, mais qui n'est vraisemblablement pas seulement le fait d'un biais archéologique (Chevassu, 2021). En l'état, il nous semble tout à fait possible qu'à cette période la combe d'Ain ait constitué un secteur relativement marginal, où l'occupation humaine était de faible densité. La disponibilité des terres n'était alors certainement pas une contrainte majeure. Dans ce cadre, la mise en évidence de ces traces de pratiques agricoles temporaires prendrait tout son sens. La question serait maintenant de savoir quelle place occupaient réellement ces pratiques par rapport au système d'agriculture des occupants. Les fournelages sur ces terrains humides étaient-ils complémentaires à des pratiques d'essartages dans les massifs forestiers environnants ? (Gauthier et Richard, 2008).

⁸³ 1215 BP ±-30 ans ; GIF-11109 (Bongni, 2000) ; Informations Laurence Glemarec et Jacqueline Léopold (Muséum National d'Histoire Naturelle - Musée de l'Homme).

6.5. Les écobuages néolithiques

Nous disposons pour le moment de peu d'informations concernant les traces du Néolithique. Néanmoins, leur similarité morphologique générale avec les vestiges médiévaux, ainsi que les premiers résultats de la fouille de 2023, vont clairement dans le sens qu'elles résultent de phénomènes similaires. Nous interprétons ces unités ocrées comme des plaques de terre cuites, témoins de fourneaux agricoles.

Un des phénomènes remarquables par rapport aux traces médiévales est la répétitivité apparente du phénomène au même emplacement (Figure 89.a). Sur la coupe présentée, on observe que chacune des trois traces ocrées s'inscrit avec un léger décalage stratigraphique, dont dans un cas, intercalé par un niveau de colluvions grisâtre. Ces opérations se produisent donc dans un certain intervalle de temps, qu'il faudra préciser. Ces observations ne sont pas contradictoires avec les premiers résultats radiocarbone, qui indiqueraient que ces phénomènes s'étalent sur plusieurs siècles.

Sur cette coupe, on remarque également la présence d'une couche argileuse noirâtre, seulement séparée des dépôts carbonatés glaciaires par un mince niveau de colluvions gris-verdâtre bariolées, qui colmate les fortes perturbations de ce substrat. Nous interprétons cette unité noirâtre de manière similaire aux traces verticales précédentes, c'est-à-dire le résultat d'une transformation post-dépositionnelles des produits de l'écobuage. En revanche, dans ce cas le processus aurait la particularité d'être très avancé. La différence de préservation entre les différents phénomènes observés à l'échelle de cette seule coupe pose question. En l'état, il n'est pas possible d'y répondre, mais plusieurs pistes peuvent être envisagées : vitesse d'enfouissement, régime hydrodynamique post-dépositionnel, variabilité des modalités de combustion, répétition des mises en culture, etc.

Une observation importante doit être prise en compte par rapport aux structures médiévales, celui de leur situation stratigraphique, légèrement inférieure. L'écart n'est certes pas grand, mais leur calage altitudinal les situe entre environ 489,5 à 490 m NGF, c'est-à-dire dans les mêmes côtes que les tourbes des sondages SD2 et SD3 (Figure 87). D'après les résultats des travaux antérieurs, des craies lacustres sont relevés jusqu'à des altitudes comprises entre 490 et 490,5 m (p. ex. sondage 19/16 ; Pétrequin et al., 2000), ce qui implique que la hauteur du lac à du ponctuellement au moins atteindre les 491 m d'altitude (Magny et al., 2011). De plus, des couches « d'anmoor » sont enregistrées à des côtes qui dépassent les 491 m NGF (p. ex. sondage 18/22). Ceci nous amène à conclure que ces traces de feux se situent dans un intervalle altitudinal susceptible d'être affecté par les eaux lacustres, de façon saisonnière, mais vraisemblablement aussi de manière prolongée (lors de périodes de dégradation climatique). Un travail de vérification précis de ces données altitudinales est en cours. Certains faciès argileux micro-lités et micro-bioturbés, intercalés dans la stratigraphie (Figure 89.e), qui traduisent des dépôts à l'état boueux voire sous une faible lame d'eau (subaquatiques), nous semblent confirmer cette hypothèse.

Cela étant, la relative épaisseur et l'homogénéité des couches ocrées s'opposent à une concentration de matériaux post-dépositionnelle, et va dans le sens qu'elles sont globalement en place (ce point pourra être vérifié en micromorphologie). Nous aurions donc tendance à penser que la préservation de cette succession de traces, certainement exceptionnelle, pourrait bien résulter d'une conjonction de facteurs liés à la topographie, l'altitude et les probables transgressions lacustres, même très ponctuelles. En

outre, il faut prendre en considération les spécificités de la mise en œuvre de l'écobuage, qui débute par un pelage extensif de la surface du sol. Ceci pourrait expliquer les nettes perturbations au toit des dépôts glaciaires, et surtout le hiatus pédo-sédimentaire du début de l'Holocène. Une partie des dépôts antérieurs au Néolithique, dont le volume ne nous est pas connu, auraient également pu être largement perturbés et érodés par ces opérations. Une des difficultés pour la suite des recherches sera de tenter de comprendre et d'identifier ces variations entre érosion et fossilisation. Pour nous, ces traces de pratiques agricoles n'en sont que plus exceptionnelles.

La Figure 91 présente les données chronologiques des occupations littorales de Chalain et de Clairvaux au Néolithique, accompagnées des résultats palynologiques et des fluctuations des niveaux des lacs à l'échelle européenne, et de celles de deux stations lacustres de Chalain. Sans rentrer dans le détail, on notera que chacune des deux datations chevauche ou s'inscrit juste derrière une période de haut niveau lacustre (Magny, 2013, 2014). De plus, elles recouvrent précisément deux pics d'apparition de céréales et de développement des taxons herbacés (bien que le premier soit plus discret). Étonnamment, ces pics sont décalés par rapport aux périodes de plus forte densité d'occupation.

Ces vestiges d'écobuages sont pour nous la preuve que l'agriculture était pratiquée sur les terres jouxtant directement le lac de Chalain, du moins sur les terrains hydromorphes à dominante minérale. Nous n'avons pas encore la preuve formelle que ce sont bien des céréales qui aient été cultivées, mais il nous paraît raisonnable de l'envisager, ce que la confrontation au diagramme palynologique suggère. Cela démontre que les conceptions de « terres à » (céréales, pâturages, bois, etc.) sont bien relatives. Ici, ce sont les terres couramment considérées comme incultes, du fait de leur humidité et de leur lourdeur, qui l'ont été. Il faut évidemment prendre en compte que l'écobuage était probablement le seul moyen efficace pour ouvrir de tels sols à l'exploitation culturale.

Ces découvertes pourraient aussi avoir des implications non négligeables vis-à-vis de la dynamique d'occupation. Premièrement, par rapport à l'implantation des sites, au moins pour les groupes ayant pratiqué l'écobuage, à travers la visibilité directe sur les récoltes (sans considérer que cette raison soit exclusive). Deuxièmement, celui de l'abandon des sites, qui pourraient avoir été abandonnés à cause du fait de l'enneigement des terres cultivées (ou cultivables) du fait de remontées du plan d'eau (durables ou non), qui peuvent être brutales. Le degré de contrainte est ici d'une tout autre ampleur par rapport à l'humidité engendrée par les écoulements superficiels et les engorgements par la capillarité.

Tout ceci ne réfute pas l'hypothèse de l'abattis-brûlis, mais cela montre que d'autres possibilités sont envisageables. Un des aspects qui nous semble important d'essayer de définir pour la suite est si ce sont les mêmes groupes néolithiques qui pratiquaient l'un ou l'autre de ces systèmes. On remarquera en effet que les deux premières datations se situent de part et d'autre du point de basculement démographique (vers 3100-3000 cal. BC), qui est présumé conjoint d'une transformation des techniques d'exploitation agricole (Pétrequin, 1992 ; Pétrequin et Pétrequin, 2021). Tout ceci ne constitue évidemment que de premières pistes de réflexion, qui visent surtout à montrer le potentiel archéologique de ces découvertes.

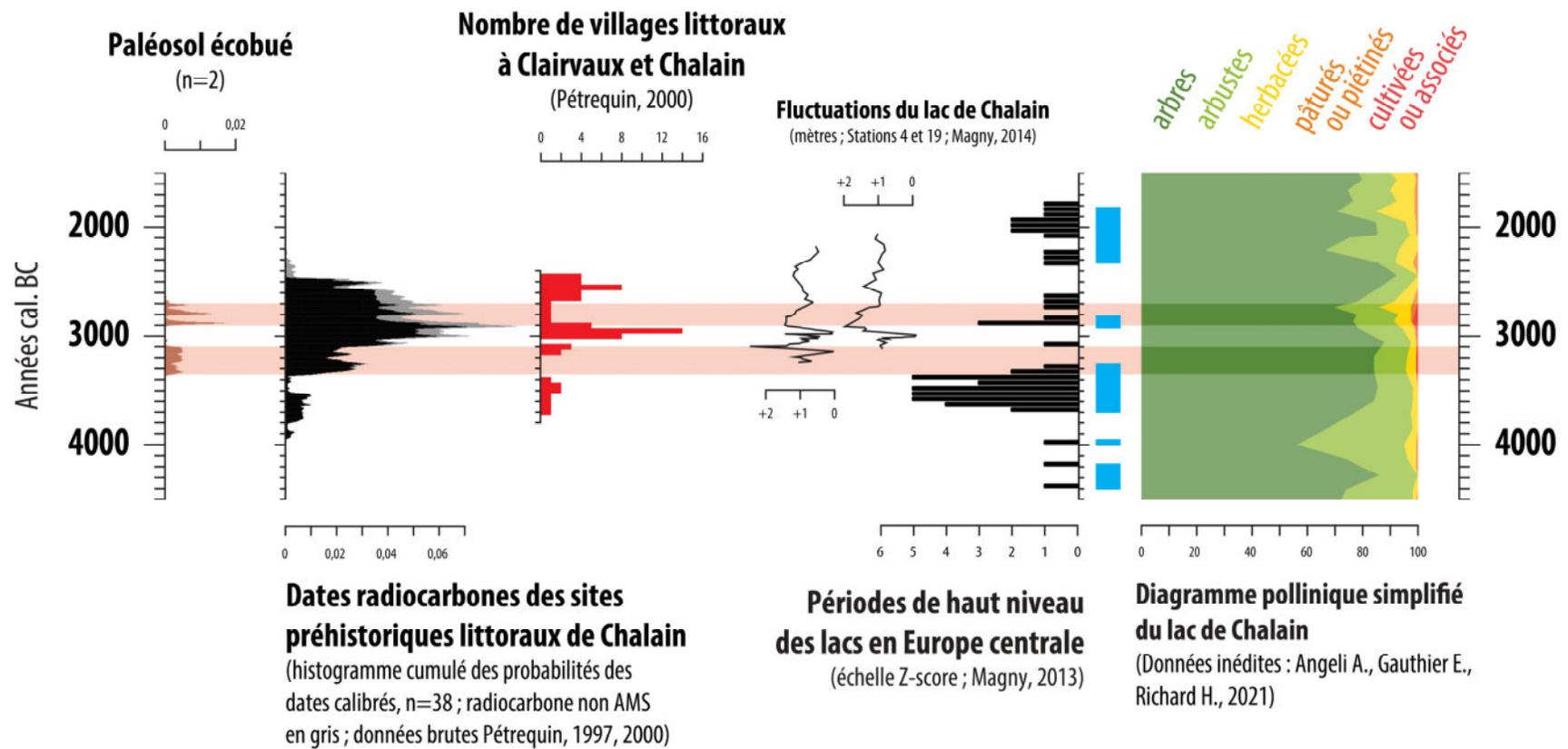


Figure 91 : Contexte archéologique et environnemental chronologique des premiers indices d'écobuage néolithiques.

Enfin, on ajoutera que le phénomène de « vertisolisation » qui semble se produire postérieurement à l'écobuage nous pose également de nombreuses questions. Celui-ci apparaîtrait comme un contrecoup notable à l'écobuage, puisqu'il s'oppose spécifiquement au bénéfice de cette pratique, à savoir l'ameublissement et l'assèchement de l'horizon écobué. À quelle vitesse ce phénomène se produit-il ? A-t-il pu avoir un impact quant à la valorisation agricole des terrains ? Ce phénomène devra donc être étudié avec grande attention par la suite, pour l'assurer définitivement, comprendre ces mécanismes précis et tenter de mesurer son importance réelle à l'échelle de la pédogenèse de ces terrains.

Partie 6 :
**Cendres et terres brûlées néolithiques aux marges
des Marais de Saint-Gond (Marne)**

1. Préambule

La localité présentée dans cette partie a retenu notre attention lors de notre dépouillement de rapports d'opérations préventives. En effet, la notice d'un diagnostic archéologique préventif (2003) mentionnait la présence de traces de feu à la base d'une séquence tourbeuse, donc susceptible d'être assez anciennes, et ceci, dans le secteur d'une vaste zone humide assez singulière, car implantée au pied d'un plateau aux sols relativement secs, le plateau de Champagne crayeuse. D'autre part, le secteur faisant l'objet de fouilles programmées et de prospections depuis 2011, il possède une carte archéologique relativement fournie, notamment pour les temps néolithiques. Paradoxalement, les Marais de Saint-Gond, qui sont plus ou moins explicitement considérés comme un centre d'attraction pour les groupes néolithiques, ne sont encore que pauvrement documentés des points de vue géoarchéologiques et paléo-environnementaux, pour ces périodes, mais aussi de façon générale pour les derniers millénaires de l'Holocène.

Profitant du lancement d'un Projet Collectif de Recherche, « *Les complexes miniers néolithiques de la région des Marais de Saint-Gond (Marne). Évaluation des indices d'habitats par sondages* » (sous la coordination de Rémi Martineau⁸⁴), de nouveaux sondages géoarchéologiques ont été réalisés (2022, année probatoire). Des traces de feu apparentées à celles du précédent diagnostic archéologique ont été identifiées au sein d'une large dépression hydromorphe, correspondant à une extension des marais. Bien que nous n'ayons pas pour le moment réalisé d'analyses en laboratoire sur les découvertes de ces sites, la constitution très particulière des vestiges mis au jour, de même que leur datation et leur contexte archéologique, nous a paru justifier de les présenter de manière détaillée. Cette partie constitue un premier bilan d'un travail en cours.



Figure 92 : Les marais de Saint-Gond sur une carte de 1635 représentés sous la forme d'un vaste plan d'eau (?).

Permalien : <https://resolver.kb.nl/resolve?urn=urn:gvn:KONB01:267>

⁸⁴ CNRS, UMR 6298 ArTeHiS

2. Contexte général

2.1. Contexte géographique, géologique et pédologique général

Les Marais de Saint-Gond sont une vaste zone humide alcaline à la biocénose remarquable (ZNIEFF, ZICO). Ils se situent en bordure ouest de la région naturelle de la *Champagne crayeuse*. Celle-ci correspond à un vaste plateau largement dominé par les formations géologiques crayeuses du Crétacé, dont la nature très drainante explique son relief globalement assez monotone (Hatrival, 1988). À l'ouest, les Marais sont limités par la *côte d'Île-de-France*, qui marque le passage à la région naturelle de la *Brie champenoise*. Le plateau de Brie domine d'environ 50 à 100 mètres le plateau crayeux. Il est caractérisé par des unités géologiques tertiaires, avec en position sommitale, des formations résiduelles argileuses à meulières, qui peuvent affleurer, mais sont le plus souvent recouvertes par des dépôts lœssiques quaternaires (Hatrival, 1988 ; Party et al., 2017).

Les Marais se situent au niveau de l'entonnoir formé par la percée cataclinale (son pendage suit celui des couches géologiques) du cours du Petit Morin, dans le plateau d'Île-de-France. Ils s'étendent depuis l'extrémité ouest de cet entonnoir, sur environ 17 km de longueur en amont, vers l'est. Leur superficie actuelle est estimée entre environ 25 à 50 km² selon les données cartographiques ou environnementales considérées (Damien, 2019 ; Damien et al., 2015 ; Party et al., 2017 ; Salaün et Marre, 2005). Ils suivent l'ancien tracé de la rivière du Petit Morin (affluent de la Marne), mais également un autre ancien tracé alluvial plus au sud, dessinant une fourche caractéristique (Figure 92 et Figure 93). Les zones marécageuses s'étendent aussi variablement le long de leurs différents ruisseaux. Le cours du Petit Morin est presque totalement canalisé depuis la fin du XVIII^{ème} siècle⁸⁵. Ajoutons que plusieurs projets historiques plus anciens avaient projeté l'assèchement de ces zones humides, mais n'ont jamais abouti (Salaün et Marre, 2005). C'est seulement à partir des années 1960 que la superficie des marais a véritablement diminué, principalement du fait de l'accroissement des exploitations agricoles et conjointement au recreusement du Petit Morin (d'environ un tiers de leur surface ; BRGM, 1994 ; Laurelut, 2003 ; Salaün et Marre, 2005).

L'espace marécageux et le Petit Morin ont des valeurs de pente moyenne très basses (< 0,1 %) et sont conséquemment caractérisés par un hydrodynamisme très faible (Damien, 2019). Le profil d'écoulement du Petit Morin est dans sa partie amont très atypique, puisque convexe (ibid.). Le bassin versant actuel des marais mesure environ 285 km². Son alimentation provient principalement de la nappe phréatique de craie libre, à laquelle s'ajoutent des écoulements provenant de différents aquifères perchés des terrains tertiaires (Damien, 2019 ; Salaün et Marre, 2005 ; Hatrival, 1988).

⁸⁵ Voir notamment la *carte d'État-major du département de la Marne* (1850, Bibliothèque patrimoniale numérique de l'École nationale supérieure des mines de Paris). <ark:/25652/bnTYOC>

Et le plan : *Administrations provinciales (série C). Ponts et Chaussées de Châlons. Plans de route. Saint-Gond, marais. C 4045* (XVIII, Archives départementales de la Marne). <https://archives.marne.fr/ark:/86869/hlvrjp0k5tg2>

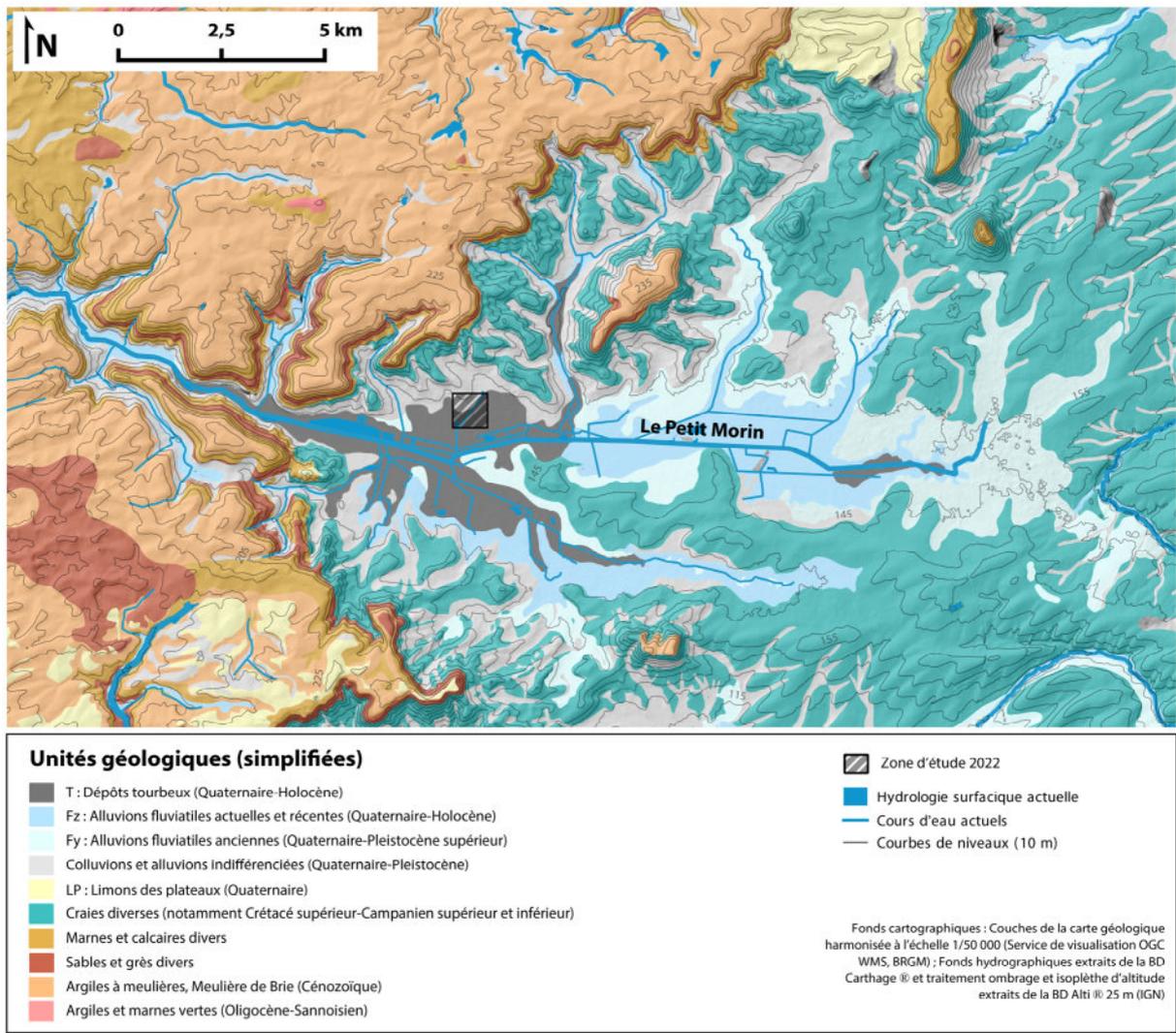


Figure 93 : Carte géologique du secteur des marais de Saint-Gond.

On notera que la carte géologique harmonisée ne représente pas de lœss sur le plateau tertiaire jouxtant les marais au nord, contrairement à la carte géologique imprimée où des formations décrites comme homogènes ou hétérogènes de limons de plateaux sont omniprésentes (Hatrival, 1988).

Dans ce paysage géologique crayeux fortement perméable et plat, la présence de ces vastes zones humides est assez singulière (Tricart, 1952 ; Duprat, 1997 ; Damien et al., 2015). Leur formation s'explique par un phénomène de capture du cours d'eau supérieur de la Somme qui s'écoulait vers le Petit Morin actuel, par la Soude, dont l'altitude nettement inférieure a entraîné une érosion régressive rapide de ces affluents (Damien, 2019). Celui-ci se produit au cours de la dernière période glaciaire (au Weichsélien, entre 110-15 ka BP, plutôt vers la transition glaciaire/interglaciaire ?). Un phénomène similaire, mais bien antérieur a engendré la capture de la Vaure par la Superbe, dont l'écoulement correspondait à la division du marais actuel qui se prolonge au Sud (phénomène postérieur à la glaciation Elstérienne : 650-350 ka BP). Ces événements ont immédiatement entraîné une très forte réduction de la dynamique hydrologique aval des cours capturés. Le Petit Morin a perdu alors la majeure partie de son ancien bassin versant (Damien, 2019). C'est pourquoi l'extension des dépôts alluviaux de la carte géologique est surdimensionnée par rapport à la dimension du cours actuel du Petit Morin. D'autre part, la rencontre des formations tertiaires (côte d'Île-de-France) entraîne aussi un

ralentissement notable des écoulements et une remontée de nappes au niveau de la percée cataclinale (contrôle aval). Ainsi, après la capture du paléo-Morin, le régime hydrologique ne permet plus l'évacuation des formations alluviales antérieures (Fy) qui « empâtent » la basse plaine du Petit Morin et vont aussi favoriser la manifestation d'un engorgement permanent ou temporaire (Damien, 2019 ; Depreux et al., 2019).

Ces dépôts Fy correspondent à une grève crayeuse, assemblage de particules de craies fines, graviers et cailloux, formé par cryoclastie (gélifraction) et associé à une dynamique hydrologique forte (voire aussi colluviale), aux cours des périodes glaciaires (Durand, 1979 ; Hatrival, 1988 ; Jamagne, 2011). Leur épaisseur atteint 10 à 15 m vers la zone centrale. Ces dépôts ne constituent pas un substrat imperméable, mais ils forment un aquifère communicant et en équilibre avec celui souterrain des craies géologiques « en place » (Damien, 2019). Schématiquement, l'extension des marais se superpose principalement à ces dépôts (environ 42 km²). Ajoutons que la morphologie très irrégulière du toit de ces unités weichséliennes⁸⁶ se traduit par une délinéation digitée (ou en « langues ») des Marais, qui sont scindés ou ponctués par de fréquents dômes ou terrasses de craie (dits « sécherons »), qui les surplombent encore de quelques mètres dans la topographie actuelle (Damien, 2019 ; Depreux et al., 2019 ; Salaün et Marre, 2005).

La Figure 95 illustre la géométrie générale du remplissage sédimentaire des marais depuis le Tardiglaciaire, période qui amorce des changements notables dans les dynamiques hydro-sédimentaires (Damien, 2019 ; Depreux et al., 2019 ; Zeist et Spoel-Walvius, 1980). Au cours du Dryas ancien, des sédiments alluvio-colluviaux très fins composés de limons argileux carbonatés comblent une large dépression qui s'étend dans la partie aval du bassin⁸⁷. Avec le réchauffement du Bölling, les premières formations véritablement palustres apparaissent avec la mise en place des tourbes les plus anciennes. Le phénomène se poursuit à l'Alleröd. Puis le refroidissement du Dryas récent interrompt cette dynamique, avec une sédimentation détritique fine associée à un milieu comparable à celui du Dryas ancien. À nouveau, avec le réchauffement climatique du Préboréal (Holocène), la sédimentation organique reprend le dessus et de manière générale se poursuit jusqu'aux périodes historiques (Damien, 2019 ; Mégnién, 1977). Néanmoins, ce schéma très synthétique vaut surtout pour la zone marécageuse centrale. Sur les secteurs marginaux, les séquences montrent une plus grande importance des dynamiques colluviales minérales. Des niveaux discontinus, argileux ou crayeux s'intercalent avec les tourbes de la seconde moitié de l'Holocène (Laurelut, 2003, voire les photographies partie suivante). Ils ne sont pas datés, mais leur stratigraphie suggère qu'ils se sont formés aux périodes historiques.

D'après le Référentiel Régional Pédologique (Figure 94), les sols actuels des marais sont majoritairement tourbeux à tourbescents (Histosols), mais aussi des sols à fraction minérale fine dominante et calcaire (Calcosols, Colluviosols ; Party et al., 2017). Sur le plateau de Champagne

⁸⁶ Il n'est pas certain s'il s'agit d'une morphologie héritée du substratum ou d'une forte incision des unités weichséliennes liées à un épisode de réchauffement climatique, dans tous les cas antérieur au Dryas ancien (Damien, 2019 ; Depreux et al., 2019). Une action éolienne qui aurait engendré une morphologie dunaire pourrait aussi en être à l'origine (Jamagne, 2011).

⁸⁷ Enregistrés comme « craies lacustres » avec guillemets dans le texte, mais sont interprétées en tant que dépôts colluviaux et non comme de véritables précipitations carbonatées lacustres, puisque ces dépôts sont datés des périodes plus froides du Dryas, ancien et récent (Damien, 2019).

crayeuse, l'homogénéité géologique est à l'origine du développement quasi exclusif de sols calcaires (type Rendosols ou Calciosols ; Party et al., 2017 ; Jamagne, 2011 ; Durand, 1979 ; Duchaufour, 1954). Les sols qui se sont développés sur le plateau de Brie, dans les lœss voire les argiles à meulière, sont marqués par l'argilluviation et une forte hydromorphie (principalement des Luvisols, Néoluvisols et Planosols ; Party et al., 2017). Sur la Côte se sont formés divers sols calcaires ou plus ou moins brunifiés ou lessivés, selon leur situation spécifique et la nature de leurs matériaux parentaux dominants (ibid.).

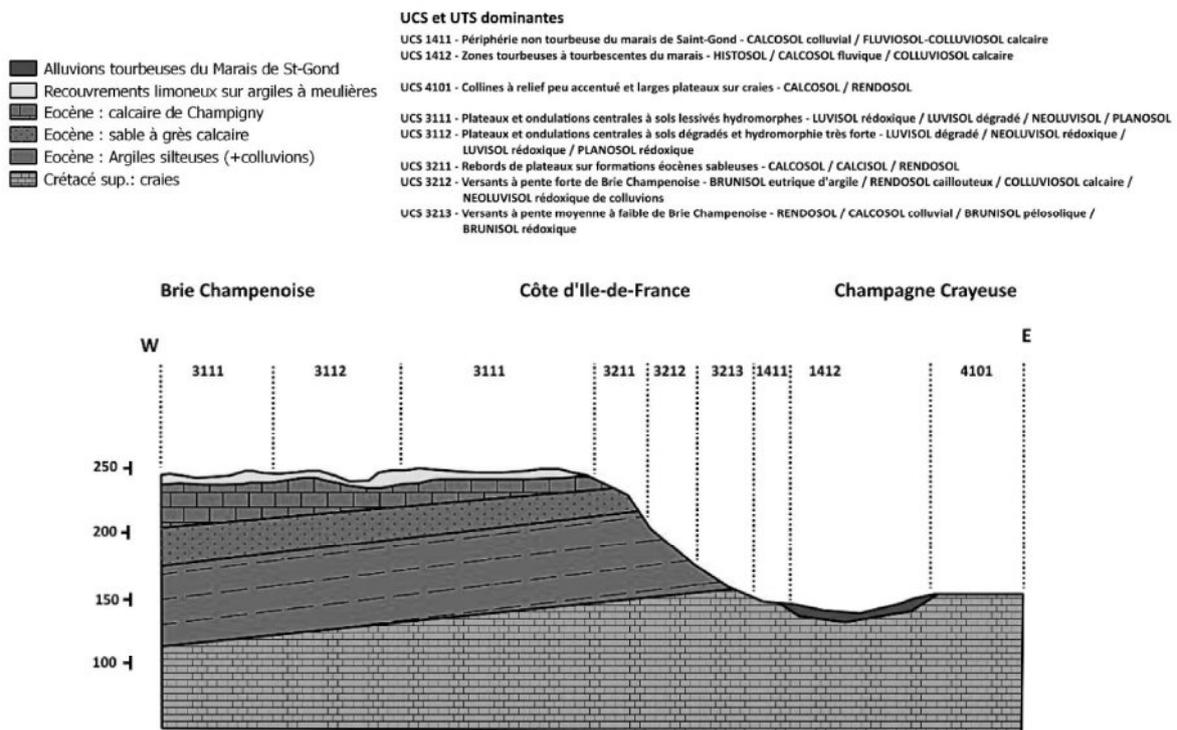


Figure 94 : Coupe géologique simplifiée et principaux types de sols de la Brie champenoise (figure tirée du Référentiel Régional Pédologique des Ardennes et de la Marne, Rigou, Vauthier, Muller et Party, 2017).

Les Unités Cartographiques de Sols (UCS) sont les associations d'un ou plusieurs types de sols appelés Unité Typologique de Sol (UTS)

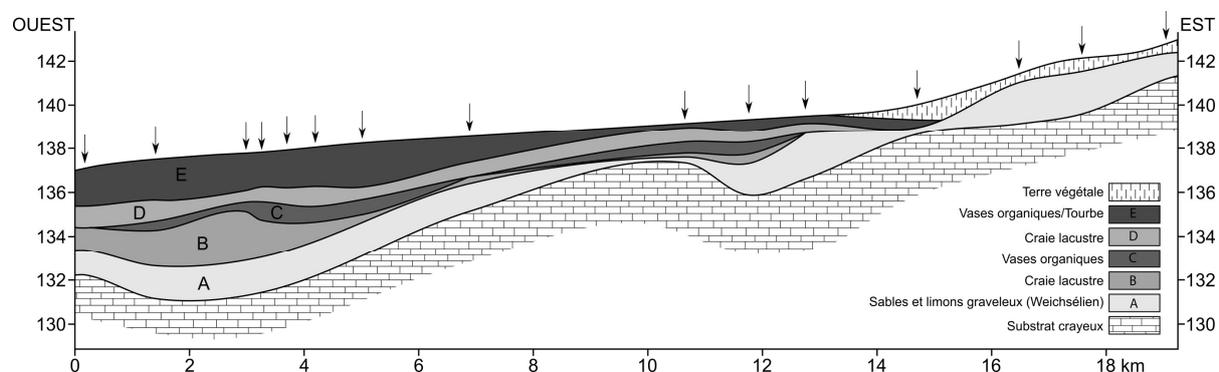


Figure 95 : Coupe stratigraphique simplifiée des Marais de Saint-Gond suivant le cours du Petit Morin (figure originale tirée de Damien, 2019, p. 124, modifiée et mise en forme par Jérôme Brenot ; in Martineau et al., 2022). Les flèches indiquent la position des logs sur le transect.

2.2. Des traces anciennes de feu dans les marais ?

Les indices de feu qui ont retenu notre attention ont été mis au jour dans les séquences hydromorphes des marais, sur le site de Courjeonnet « Les Colinets » (Laurelut, 2003). L'opération archéologique correspondait à un diagnostic préalable à une carrière de tourbe sur une surface réduite d'une parcelle de 6 000 m² environ (localisation en partie suivante). Douze sondages ont été entrepris, totalisant une surface ouverte de 222 m². Les stratigraphies révèlent des niveaux de tourbes aux faciès divers, alternant avec des niveaux d'argile crayeuse. Les coupes font apparaître d'importantes variations stratigraphiques, notamment dans l'altitude du substrat crayeux, variations qui pourraient résulter des creusements de multiples chenaux. L'absence de récurrences latérales ne permet cependant pas de confirmer ces incisions. A posteriori, nous pouvons supposer que ces constatations s'expliquent par l'orientation même des sondages, NE-SO et N-S, donc subparallèles au sens des écoulements (voir partie suivante).

Ces traces de feu se matérialisent sous diverses formes (Figure 97). Essentiellement, il s'agit de sédiments fins (argiles, limons) de teintes rougeâtre ou ocrée à brun-ocre clair qui se présentent sous forme de *traces*, *lambeaux*, *mottes* ou de *pseudo-litages*. Deux faits décrits comme des *lentilles rubéfiées* sont interprétés comme des *chablis brûlés* ou *foyers de déforestation*, dont le caractère anthropique n'est pas assuré (sondage A6 et C1). Les mottes rougeâtres dispersées sont interprétées de par leur proximité à ces derniers et par analogie morphologique et stratigraphique, comme résultantes d'un même phénomène. Ces différentes traces apparaissent principalement au sommet d'une unité argileuse grise ou sombre d'assez faible épaisseur, qui elle-même repose sur des sédiments crayeux de granulométrie variable, correspondant certainement au substrat d'alluvions anciennes. Elles sont également identifiées en mélange avec cette unité argileuse grise, recouvrant directement le substrat (argile crayeuse), ou encore intercalées avec les couches tourbeuses. La Figure 96, dont les clichés sont extraits du rapport d'opération, illustre que ces traces sont de morphologie très variable à l'échelle d'un même sondage. On observe notamment une transition entre des volumes de teinte rouge bien marqués et associés à des résidus charbonneux (Figure 96.a), à une unité de quelques centimètres d'épaisseur, continue sur plus d'un mètre de long dont les teintes varient du jaunâtre ocré au brun clair (Figure 96.b et c). Ces dernières photographies montrent la limite franche de la base de cette unité ocrée. Pour celle-ci, la possibilité d'un lien avec des marques d'une exploitation de tourbe ancienne a aussi été soulevée. On ajoutera que quelques tessons dont la facture est attribuée avec précaution à la protohistoire récente (Âge du Bronze ?) ont été recueillis au sommet d'un de ces faits. Mis à part ces éléments, aucune structure ni indice archéologique n'ont été découverts sur l'emprise sondée.

Si l'hypothèse d'un lien avec le feu des traces rougeâtres mélangées à des sédiments ponctués de résidus charbonneux est de prime abord tout à fait soutenable, cela est loin d'être évident pour les traces et unités faiblement teintées, comme celle visible sur la Figure 96.b (unité B). Le temps alloué pour ce diagnostic, très limité par rapport à la diversité des phénomènes pédo-sédimentaires observés, n'avait pas permis de pousser les investigations plus avant. Malgré cela, ces résultats ont le bénéfice de mettre en lumière le potentiel informatif en matière d'archives pédo-sédimentaires de ce secteur.

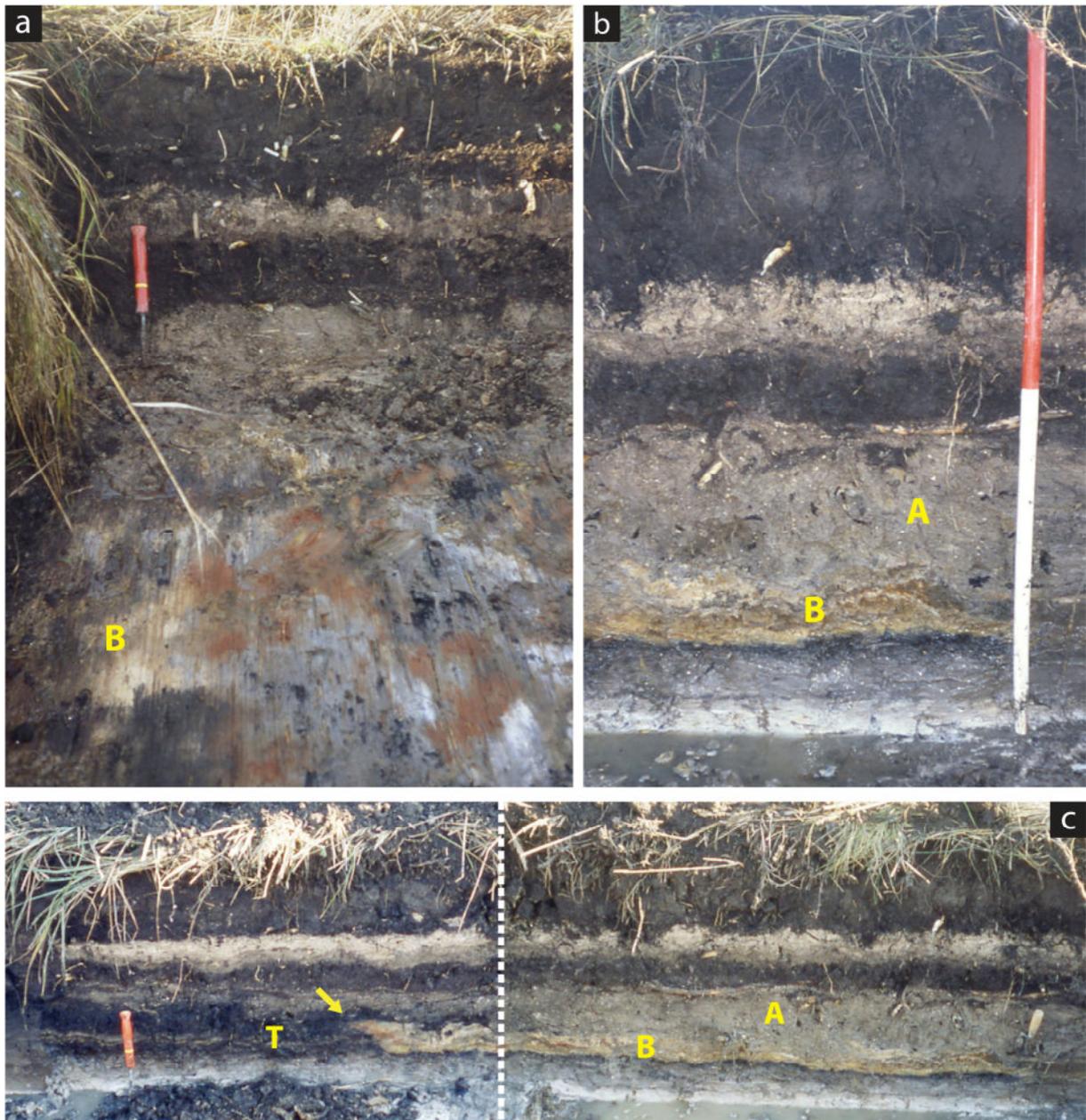


Figure 96 : Planche photographique illustrant la morphologie des traces de feu découvertes lors du diagnostic de Courjeonnet « Les Colinets » (crédits : Laurelut, 2003, INRAP).

Les quatre photographies correspondent au même sondage A3, avec nos annotations.

(a) Vue au premier plan des mottes nettement rougeâtres mélangées à des argiles grisâtres (et blanchâtre ?) aux ponctuations noirâtres qui correspondent vraisemblablement à des fragments charbonneux. On remarque aussi la présence de traces brun-ocre claires (B) similaires aux unités visibles sur les photographies de coupes suivantes.

(b) Photographie de coupe où apparaît l'unité brun-ocre claire (B).

(c) Idem que (b), mais en vue plus large (montage photographique présent dans le rapport d'opération). Noter la limite franche de l'unité brun-ocre (B) et son extrémité biseautée (flèche). On remarquera aussi que l'unité noirâtre tourbeuse (T) adjacente et recouvrant l'unité brun-ocre vers la gauche (nord), disparaît au profit d'une unité argileuse grisâtre (A) vers la droite (sud).

3. Le site d'étude de Courjeonnet « Les Grands Prés »

À l'occasion de nouvelles opérations archéologiques programmées, visant à vérifier des mentions anciennes d'indices de sites néolithiques (précisément d'habitations péri-lacustres) dans un secteur de terrasse crayeuse des marais (voir site de Courjeonnet « Les Tassets » ; Martineau et al., 2022), nous avons exposé à R. Martineau l'intérêt de sonder également un secteur plus propice à la mise au jour de traces de feu semblables à celles précédemment décrites (Laurelut, 2003). Cet emplacement a été choisi sur la base des résultats de prospections géoarchéologiques conduites en mai 2022⁸⁸, ainsi que les cartes et photographies anciennes (voir ci-après). En accord avec les possibilités et les contraintes spécifiques à cette opération programmée (dans le cadre du PCR), une tranchée supplémentaire a été creusée à la pelle mécanique (SD15). Au total, l'opération de Courjeonnet « Les Grands Prés » menée à l'été 2022, compte 49 tranchées d'une surface cumulée de 5000 m², réparties sur 5 secteurs qui couvrent une surface proche de 5 ha (Figure 97). Des traces de sédiments rubéfiés (décrites comme résultant d'un « brûlis ») ont effectivement été découvertes dans le sondage 15. Ces faits n'ont malheureusement pas été appréhendés en plan. Aussi, les coupes n'ayant pas été nettoyées rapidement après leur ouverture, les fortes chaleurs complices, et l'impossibilité de les rectifier à cause des déblais, a rendu caduc l'observation de traits morphologiques à fine échelle sur le terrain. Nous ne sommes intervenus qu'une seule journée sur le terrain pour réaliser la description des coupes où les couches rubéfiées étaient présentes, aussi, nous nous sommes adaptés aux protocoles d'enregistrement des archéologues. Nous avons réalisé la description des coupes où les couches rubéfiées étaient présentes, discuté des premières interprétations relatives à la séquence pédo-sédimentaire avec les archéologues et effectué des prélèvements pour de futures analyses.

Le secteur d'étude est localisé en bordure septentrionale des marais de Saint-Gond. La tranchée SD15 est située à environ 300 m du diagnostic de 2003, vers le nord-est, en direction du village de Courjeonnet (Figure 97). Elle a été implantée afin d'observer un transect perpendiculaire, depuis la butte crayeuse à la zone légèrement en contrebas d'environ 0,5 à 2,0 m dans la topographie actuelle (Figure 97.A). La limite des tourbes (partie inférieure) de la carte géologique harmonisée est donnée à titre indicatif, car elle est insuffisamment précise à cette échelle (Vernhet, 2007). La zone basse est interprétée comme un ancien bras de marais, d'orientation SO-NE, qui est aujourd'hui bordé au nord d'un chemin et d'un profond fossé de drainage (canal 02 du « Pré des contrôleurs »). Ce terrain est à ce jour indistinctement cultivé dans une même parcelle (Figure 97.C). Le secteur de la butte peut néanmoins être distingué sur le terrain et sur certaines photographies aériennes, du fait de l'affleurement d'une forte proportion de particules de craie. Sur la carte d'état-major (1820-1866), la zone apparaît comme une bande de terrain en « prés » inscrite dans la continuité de la zone marécageuse (zones aux « flaques en bleu de Prusse »). Sur le cadastre napoléonien (1824)⁸⁹, cette bande regroupe un ensemble de petites parcelles sous le lieu-dit « Les Grands Prés ». Elle est bordée au nord par la « Rue du gros

⁸⁸ Sondages à la tarière pédologique et à la sonde russe, effectués dans le cadre du stage avec les étudiants de la promotion 2021-2022 du Master 1 Archéologie Environnementale. Les résultats bruts de ces prospections sont intégralement disponibles dans le rapport 2022 du PCR (Martineau et al., 2022).

⁸⁹ Plan du cadastre napoléonien : Courjeonnet. Section B13 P 895/3 (1824). Archives départementales de la Marne.

<https://archives.marne.fr/ark:/86869/zbhwxkf92lq7>

chêne », qui se superpose au chemin actuel. Elle s'ouvre directement sur le « Marais des Colinets » et semble faire la jonction avec une grande parcelle indivisée attenante au village : « La pièce des Grands Prés ». Sur la photographie aérienne la plus ancienne dont nous disposons (1946), cette digitation paraît aussi en herbage et présente des limites ondulées jouxtant des terres cultivées. Son intégration dans le système de cultures semble se produire entre 1971 et 1975. D'autre part, le RGE ALTI® permet d'identifier sur le flanc sud de cette bande prairiale, un linéament inscrit en microtopographie formant un replat (Figure 97.B) que nous interprétons comme un chemin longeant, avec un surplomb très léger, la zone humide. Un fossé linéaire parallèle, dont le comblement de fond a livré un tesson gallo-romain (ST40), a été découvert à peu près entre cette zone de replat et la légère pente vers la zone basse. Nous identifions des anomalies topographiques similaires sur d'autres terrasses crayeuses bordant les marais (vers Oyes). Certaines semblent associées à des linéaires en élévation d'un parcellaire fossile non daté (historique ?).

Page suivante

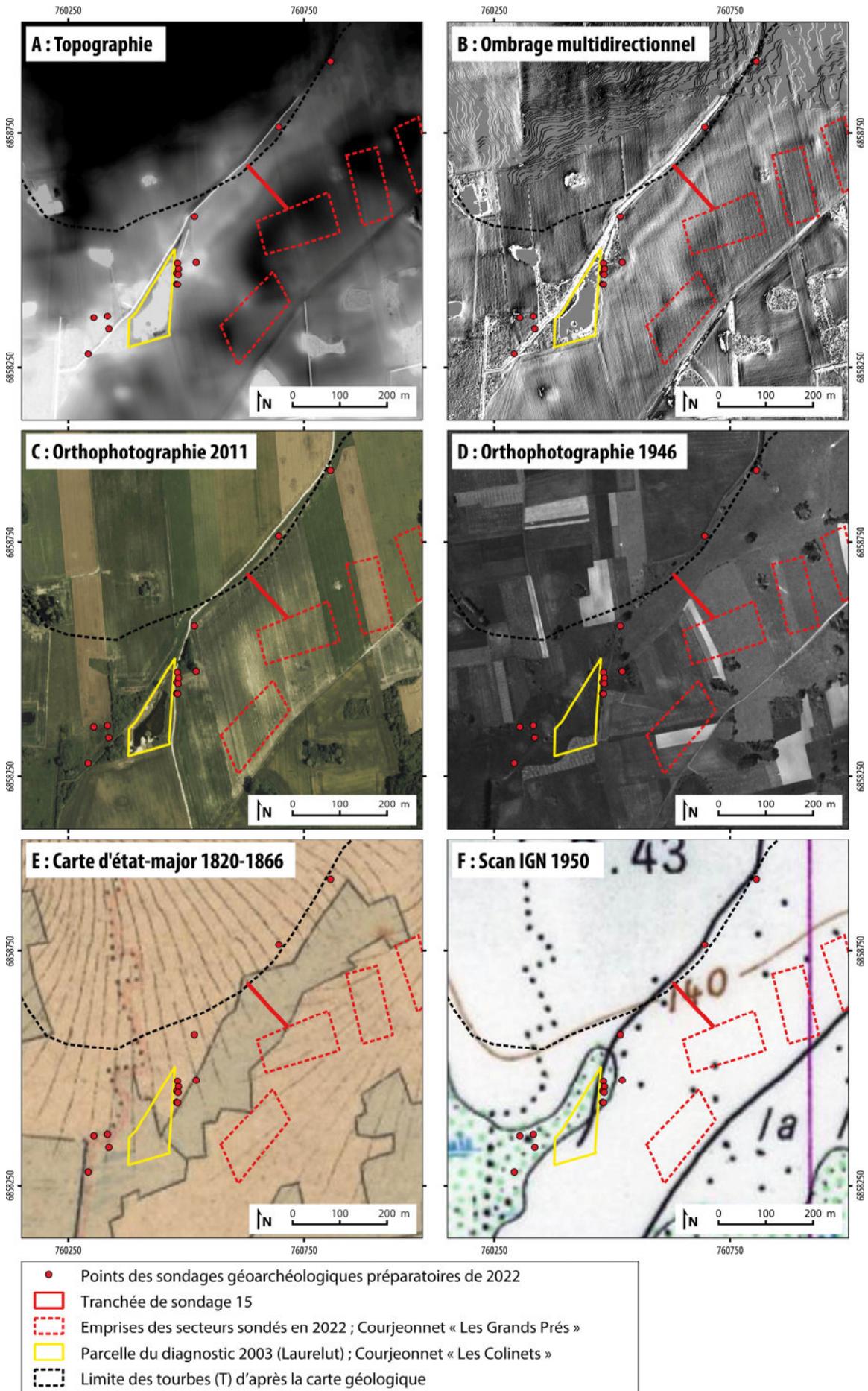
Figure 97 : Topographies, orthophotographies et cartes anciennes du bras de marais ayant livré des traces de feu.

A et B : Fonds de cartes réalisés à partir du MNT RGE ALTI® de résolution 1 m (IGN).

C et D : Prise de vues aériennes, données Ortho® édition 2011 et photographie aérienne historique de 1946 (IGN).

E et F : Fonds de cartes historiques, SCAN 50® années 1950 et SCAN État-major® (IGN).

La carte d'état-major montre ici un léger décalage vers de sud-est de la bande de prairie qui est certainement lié au géoréférencement.



4. Résultats de terrain et observations préliminaires

4.1. Résumé des résultats de la fouille de Courjeonnet « Les Grands Prés »

Les fouilles n'ont permis d'identifier que 19 structures archéologiques avérées pour un total de 156 faits enregistrés. Elles sont éparpillées sur les différentes zones sondées. Seule une faible concentration de quelques structures et de mobiliers, répartis sur plusieurs sondages adjacents, dans le secteur sondé directement au sud de SD15, laisse envisager une possible occupation protohistorique avec la présence d'un silo (à une centaine de mètres au sud des traces de feu décrites après). Néanmoins, une partie de ce mobilier est aussi associée à des comblements de perturbations naturelles. D'ailleurs, la majorité des faits relevés sont interprétés comme des anomalies naturelles ($n = 49$), de type perturbations racinaires ou autre. On compte également une quinzaine de larges dépressions naturelles, dont certaines se prolongent sur plusieurs sondages adjacents (considérées dans ce cas comme unique). Elles sont identifiées au sommet du substrat crayeux (craies alluvio-colluvionnées) et sont caractérisées, outre leurs grandes dimensions, par leur comblement, constitué d'un matériau argileux très sombre dit « organique ». Ces larges dépressions correspondraient aux fonds d'incisions fluviales tardiglaciaires, comblées par des dépôts fins argilo-silteux qui caractérisent des écoulements de très faible compétence. Quelques creusements de chablis ont des faciès de comblement identiques. Celui-ci est également tout à fait semblable à celui des unités 2 et 5 qui seront décrites dans la partie suivante. Ces unités n'ont pas encore été datées, mais il est envisagé qu'elles soient sub-contemporaines des tourbes et « vases organiques » identifiés dans les secteurs en aval, dont le développement débute au Préboréal. Ajoutons que du mobilier de nature et de chronologie variées (en cours d'étude) a été récupéré dans ces grandes zones dépressionnaires, ce qui suggérerait qu'elles sont restées en activité relativement longtemps. Les deux seules pièces lithiques mises au jour qui peuvent être chronologiquement attribuées⁹⁰ sont des fragments de haches, dont la période de production se situerait entre le Néolithique moyen I et le Néolithique final (ceci n'excluant pas un réemploi plus tardif). Ces deux pièces proviennent des dépressions naturelles décrites plus haut. Finalement, les fouilles ne confirment pas les anciens indices qui indiquaient l'existence d'occupations néolithiques dans ce secteur de dôme crayeux.

4.2. La séquence pédo-sédimentaire de la tranchée 15

Les traces de feu ont été découvertes dans la moitié nord de SD15, soit la partie implantée dans la zone basse. Elles ont été relevées sur deux portions de coupes séparées : l'une à l'extrémité nord de la tranchée, où elles couvrent une longueur de 2 m (coupe ouest : C-D) ; l'autre à une distance d'une vingtaine de mètres, où elles se prolongent sur une longueur de près de 10 m (coupe est : A-B). Ces traces sont associées à une vaste dépression de plus de 60 m de long (matérialisée par U2 et U5). D'autres traces plus ponctuelles ont toutefois été relevées dans les autres secteurs de fouille, mais toujours associées à ces unités argileuses sombres qui se développent au sommet du substrat crayeux. Elles n'ont pas fait l'objet d'un enregistrement systématique. Leur morphologie bien spécifique et

⁹⁰ Étude Fabien Langry-François, INRAP et UMR 6298 ArTeHiS.

surtout très visible au sein de la tranchée 15 a motivé que l'on se concentre sur celles-ci. La Figure 98 présente les deux stratigraphies de SD15, relevées sur le terrain par Marie Imbeaux⁹¹. Quant à la Figure 99, elle illustre la morphologie bien particulière de ces traces et de leurs encaissements pédo-sédimentaires, à l'emplacement où elles se sont révélées les plus épaisses. Dans la zone basse de SD15, la séquence pédo-sédimentaire la plus complète se présente depuis la base, telle que suit :

- Unité 1 : limon blanchâtre à légèrement jaunâtre crayeux, mais avec de fréquentes variations latérales de faciès, avec lentilles de sables ou graviers de craie, ou d'éléments grossiers de craie (et parfois de silex ?) en proportions variables. Cette unité correspond au toit des dépôts alluviaux weichséliens Fy de la carte géologique. Le décapage a été arrêté sur cette unité.
- Unité 2 : argile noire à grisâtre(-brunâtre) sombre, très compacte, avec un retrait et une structure polyédrique anguleuse fine assez marquée au séchage, et une sur-structure à tendance prismatique, traduisant la présence de minéraux aux propriétés (semi-)gonflantes. Aucune surface de glissement n'a été observée.
- Unité 3 : cendres qui présentent à l'échelle de la coupe des teintes très différentes : gris souris, parfois plus clair ou plus sombre, ou à tendance assez bleutée, ou encore d'un blanc très franc. Quasiment aucun charbon macroscopique n'est visible en coupe dans cette unité. Assez irrégulière, elle mesure quelques centimètres d'épaisseur, mais atteint en plusieurs points près d'une quinzaine de centimètres.
- Unité 4 : limons argileux montrant des teintes allant du jaune-orangé au rouge, et localement tirant franchement vers une teinte rouille. Unité discontinue, à la morphologie et aux limites irrégulières, mesurant au maximum une quinzaine de centimètres d'épaisseur. Elle est aussi parfois présente sous forme de traces diffuses ou d'agrégats disjoints au sein de l'unité supérieure. Elle a été qualifiée de façon générique comme « rubéfiée ».
- Unité 5 : argile noirâtre à grise, relativement similaire à U2, avec laquelle elle est confondue lorsque U3 et U4 sont absentes. Le complexe U2/U5 est épais d'une dizaine à une trentaine de centimètres. La transition est progressive et assez irrégulière avec l'unité supérieure.
- Unité 6 : limons moyennement à peu argileux bruns avec nombreux sables et graviers crayeux et gastéropodes. À la base, présence de traits d'oxydation (ou résidus microscopiques rubéfiés de U4 ?). La base de U6 peut avoir une sur-structure à tendance prismatique, dans la continuité de U2/U5. Au sommet, les limons sont moins argileux et nettement plus grisâtres. La transition entre ces deux faciès subdivisés en U6.b (bas) et U6.h (haut) est progressive et de forme lobée. U6 est épaisse de 30-40 centimètres environ.
- Unité 7 : limons argileux bruns clairs, limite inférieure assez, voire très nette et régulière. Elle mesure en moyenne une trentaine de centimètres d'épaisseur. U7 correspond à l'horizon de labour actuel.

⁹¹ Université de Bourgogne, UMR 6298 ArTeHiS.

Sondage 15

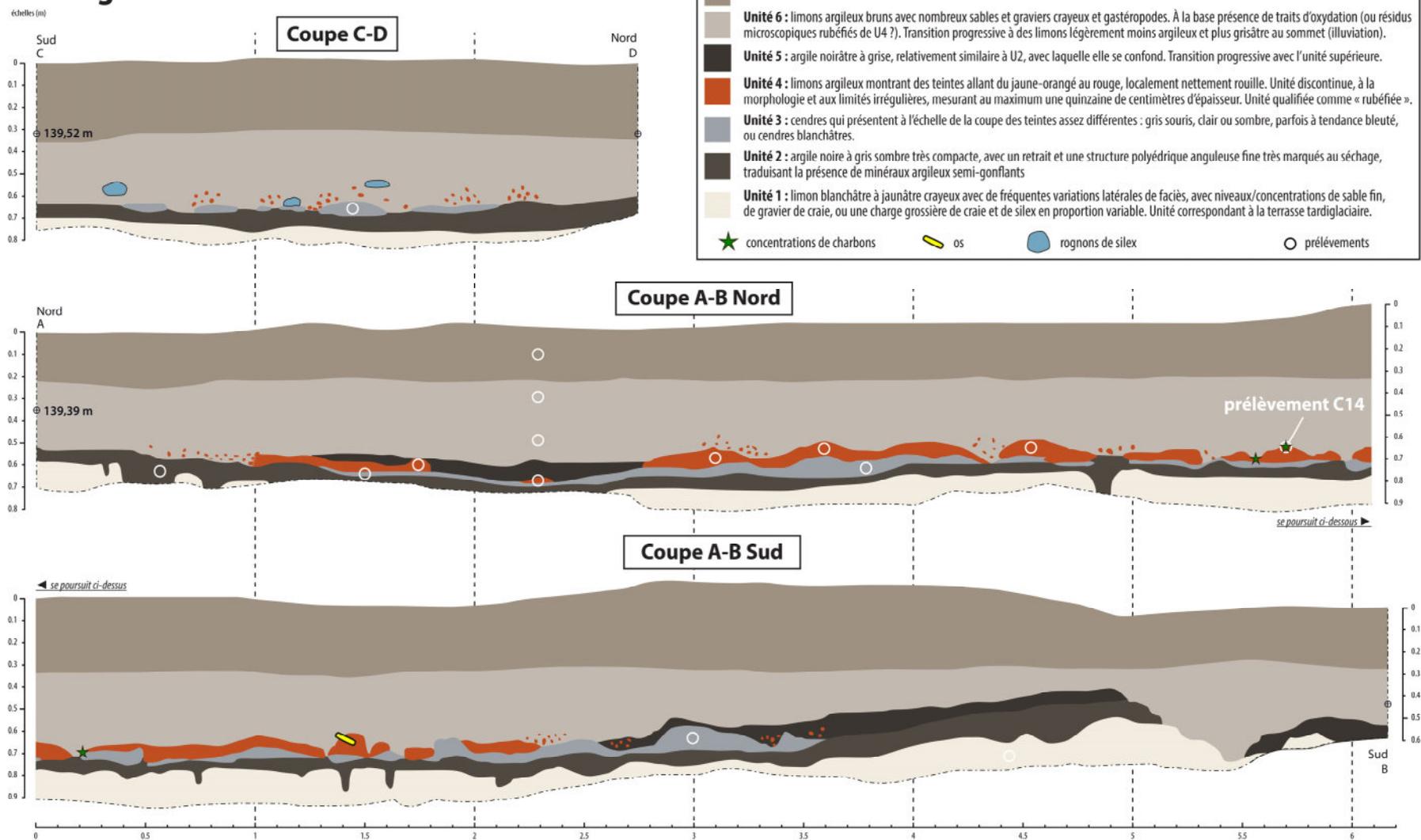


Figure 98 : Dessins interprétatifs des coupes stratigraphiques de SD15, centrés sur les traces de combustion

(Dessin : M. Imbeaux ; vectorisation : A. Dumontet ; mise en forme : C. Menbrivès).

Le creusement irrégulier qui tronque le complexe U2/U5 à l'extrémité sud de la coupe A-B correspond certainement à un creusement de chablis (fait non enregistré).

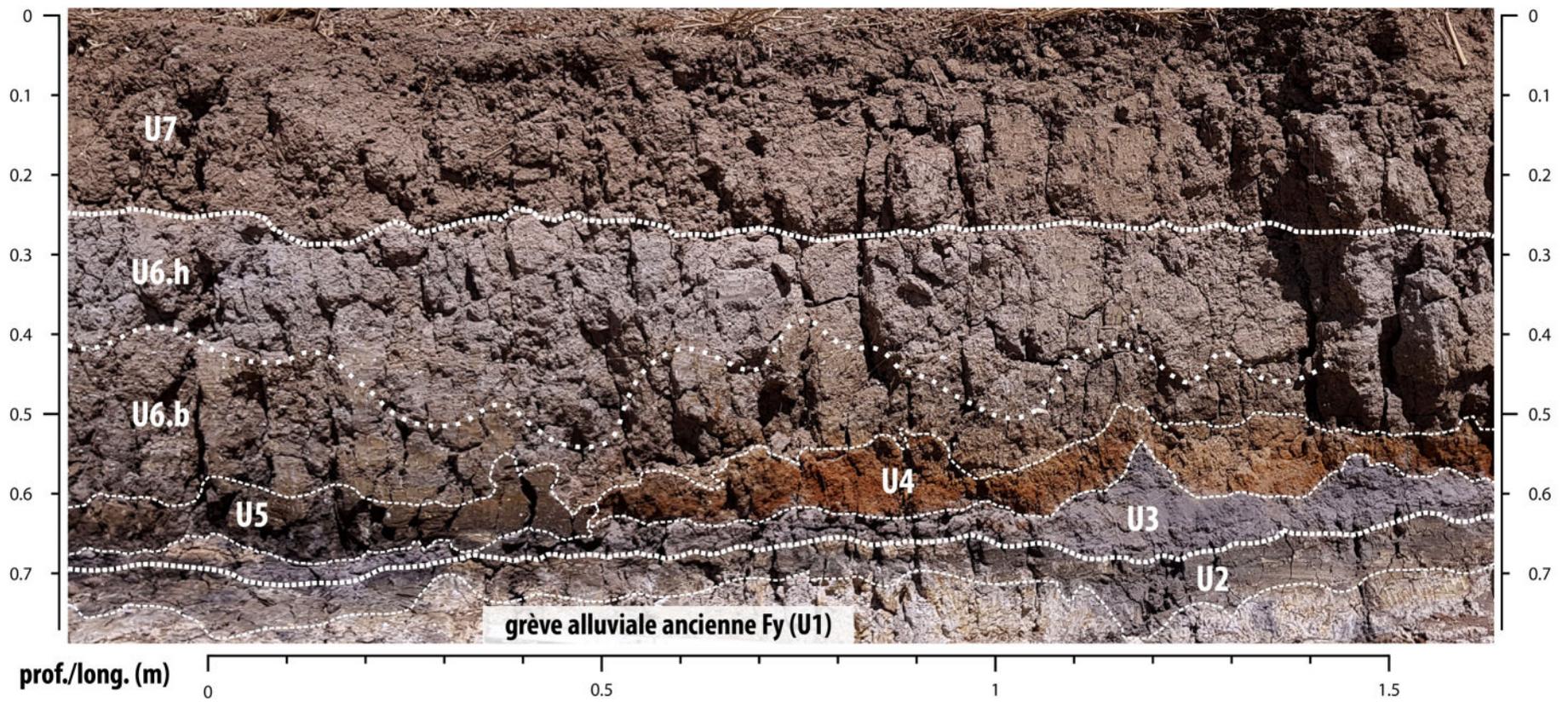


Figure 99 : Photographie illustrée de la stratigraphie de la tranchée 15 où apparaissent les traces de combustion.

Les caractéristiques macroscopiques des unités 2 et 5, qui sont les unités encaissantes directes des traces de feu, indiquent qu'elles se sont formées à partir de matériaux provenant de ruissellements de faible énergie (décantation de colluvions fines). Elles sont globalement assez sombres, mais en réalité très peu organiques, ce qui suggère une incorporation poussée des matières organiques. La distinction entre ces deux unités repose pour l'essentiel sur leur séparation par les unités cendreuses (U3) et rubéfiées (U4). Là où ces deux dernières sont absentes, il est objectivement très difficile (voire même impossible) de proposer une subdivision. Bien que cette stratigraphie caractérise deux phases de dépôt distinctes, U2 et U5 s'apparentent à un même « complexe » pédo-sédimentaire. Il s'agit probablement d'une formation relativement évoluée, avec un développement d'une fraction minéralogique au comportement semi-gonflant, lié à des variations saisonnières de la nappe phréatique. En remontant vers la terrasse alluviale crayeuse, U2 et U5 présentent une petite proportion de fines particules carbonatées. Ce caractère semblerait plus affirmé sur les profils en position plus élevée. Il conviendra de vérifier s'il s'agit plutôt de sables crayeux hérités ou de précipitations secondaires, mais la seconde hypothèse nous paraît largement plus vraisemblable compte tenu de la nature des unités. Le couple U2/U5 mesure jusqu'à une trentaine de centimètres d'épaisseur. Néanmoins, sa partie supérieure a visiblement été nettement remaniée ou pédoturbée et réintégrée aux dépôts ultérieurs. En effet, on note que la transition entre les unités 2/4/5 et l'unité 6 sus-jacente est souvent graduelle et assez irrégulière.

Dans l'attente de résultats sur la composition minéralogique de ces unités, la notice de la carte géologique de Montmort (Hatrival, 1988) nous livre quelques informations à considérer sur la nature des fractions argileuses des formations géologiques affleurantes (Tableau 26). La notice indique la présence de phyllosilicates expansibles (smectite, montmorillonite), tant dans les craies du Crétacé que dans les lœss et les argiles à meulière qui couvrent le plateau de Brie. Les propriétés gonflantes observées pourraient donc être en partie héritées. Autrement, il est possible que les matériaux à partir desquels se sont développés U2 et U5 aient connu une évolution antérieure dans des conditions différentes (sol calcaire sur pente drainant). Dans ces conditions superficielles, il est plausible que ces édifices smectitiques aient été rapidement altérés. Dans ce cas, ces propriétés pourraient être liées à une vermiculitisation à partir des illites (Wilson, 1999). Ce processus serait en accord avec l'hypothèse d'une formation assez poussée conjointe à une intégration très fine des matières organiques. Des analyses minéralogiques permettront de préciser ce point. En tous cas, ce complexe argileux sombre évoque un horizon structural d'un paléosol à caractères verticaux modérément exprimés⁹². U2 et U5 ne sont pas encore datées au radiocarbone. En SD15, U5 a livré quelques fragments de céramique, en cours d'analyse. La chronologie de ces unités doit donc encore être précisée, mais, compte tenu de la position stratigraphique de U2, on peut proposer que son développement se soit amorcé au début de l'Holocène.

Par la suite, ce complexe argileux sombre est enfoui sous des limons argileux assez riches en sables et graviers crayeux (U6). Quelques éléments plus grossiers y sont également identifiés, comme des pierres de silex non taillés (voir coupe C-D, Figure 98). L'unité 6 montre des variations verticales de couleur et de texture plus ou moins marquées. Parfois, la structure à tendance prismatique se prolonge nettement dans U6. La base de cette unité est d'ailleurs légèrement plus argileuse que la partie supérieure. Plutôt brune dans sa moitié inférieure, elle prend progressivement des couleurs plus grisâtres

⁹² Qui serait éventuellement rattachable au groupe des Leptismectisols (AFES, 2009).

vers le sommet. Ce phénomène n'est pas aussi marqué tout au long de SD15, mais il est assez net sur la Figure 99, où U6 peut être subdivisée en deux. Cependant, la moitié supérieure ne semble pas plus riche en sables et graviers de craie que celle inférieure. Cette différenciation est donc interprétée comme une décoloration, engendrée par une légère migration des particules argileuses vers la base de l'unité. L'unité 6 correspondrait ainsi à un couple d'horizons éluvié/illuvié (E/Bt ; ce qui devra être confirmé en lames minces par la recherche de revêtements argileux en U6.b), développé dans un matériau résultant de colluvionnements dont la chronologie n'est pas encore affirmée. Ils sont certainement liés à des périodes d'accroissement des terres cultivées sur les versants environnants, entre la protohistoire et l'époque moderne. Quelques pièces lithiques taillées (chronologiquement indéterminées), mais aussi divers mobiliers dont du métal (en cours d'étude) ont été récoltés en U6. L'unité 7 est de nature comparable, si ce n'est que sa structure a été plus ou moins fortement modifiée par les labours de ces dernières décennies. Elle est plus fine et grumeleuse, avec en certains endroits une limite franche avec U6 (amorce d'une semelle de labour).

Tableau 26 : Sélection d'assemblages minéralogiques des fractions argiles des formations géologiques qui affleurent à proximité des Marais de Saint-Gond (données tirées de Hatrival, 1988).

	Kaolinite	Illite	Smectite	Interstratifiés illite-smectite	Montmorillonite
Craies du Campanien supérieur (C6c2 et C6c3)	1/3	1/3	1/3	-	-
Argiles silteuses du Sparnacien (e3)	9/10	-	-	1/10	-
Sables Cuisiens (e4)	9/10	-	-	1/10	-
Formations résiduelles argileuses à meulrières (Re-g)	variable	variable	-	-	variable
Limons hétérogènes des plateaux (LP)	2/10	4/10	-	-	4/10
Limons homogènes lœssiques (Œ)	2/10	4/10	-	-	4/10

4.3. Des perturbations naturelles

Sur les coupes, on remarque que U2 s'enfonce dans le substrat crayeux U1 sous forme de langues ou de petites cuvettes. Aussi, plusieurs creusements dont la forme est irrégulière et qui percent le toit du substrat ont été découverts dans le sondage 15 (ST36, ST37, ST39). Ces faits sont interprétés comme des perturbations racinaires ou des trous de chablis (Figure 100). Ils possèdent un comblement dont le faciès varie entre des argiles noirâtres (comparable à U2/U5), et des limons bruns à sables et graviers crayeux (similaire à U6). Certaines structures en creux dont le faciès de comblement approche celui de U6, ont livré du mobilier et ont été enregistrées en tant que potentielles fosses anthropiques (p. ex. ST34, Figure 100.d). Cependant, au vu de leurs morphologies très irrégulières, nous pensons qu'il s'agit également de chablis qui auraient seulement piégé un peu de mobilier. En outre, deux de ces faits ont révélé la présence de cendres, à leur niveau d'apparition. L'un avec une couche cendreuse blanchâtre assez importante, l'autre grisâtre et sporadique (respectivement Figure 100.c et b). La fouille de ces

structures a montré que ces cendres étaient seulement superficielles, leurs fonds étant constitués d'argile limoneuse noirâtre ou gris sombre, identique à U2/U5 (Figure 100.e). Cela indique que ces deux anomalies naturelles étaient déjà colmatées avant la formation des traces de feu, et qu'elles n'ont pas de liens chronostratigraphiques directs avec elles. Ces traces attestent vraisemblablement de la présence pénée-contemporaine de ligneux à la formation du complexe argileux noirâtre. Par contre, il n'a pas été observé de phénomènes similaires qui auraient traversé les traces de feu. Plus généralement, le comblement de ces différentes anomalies naturelles ne semble pas tellement dépendre de leur position altitudinale absolue (mais l'enregistrement n'est pas systématique pour ces faits). Aussi, nous nous demandons si la nature de leur comblement ne pourrait pas avoir une valeur chronologique relative, hypothèse qui mériterait d'être approfondie (via les analyses de composition élémentaire ?).

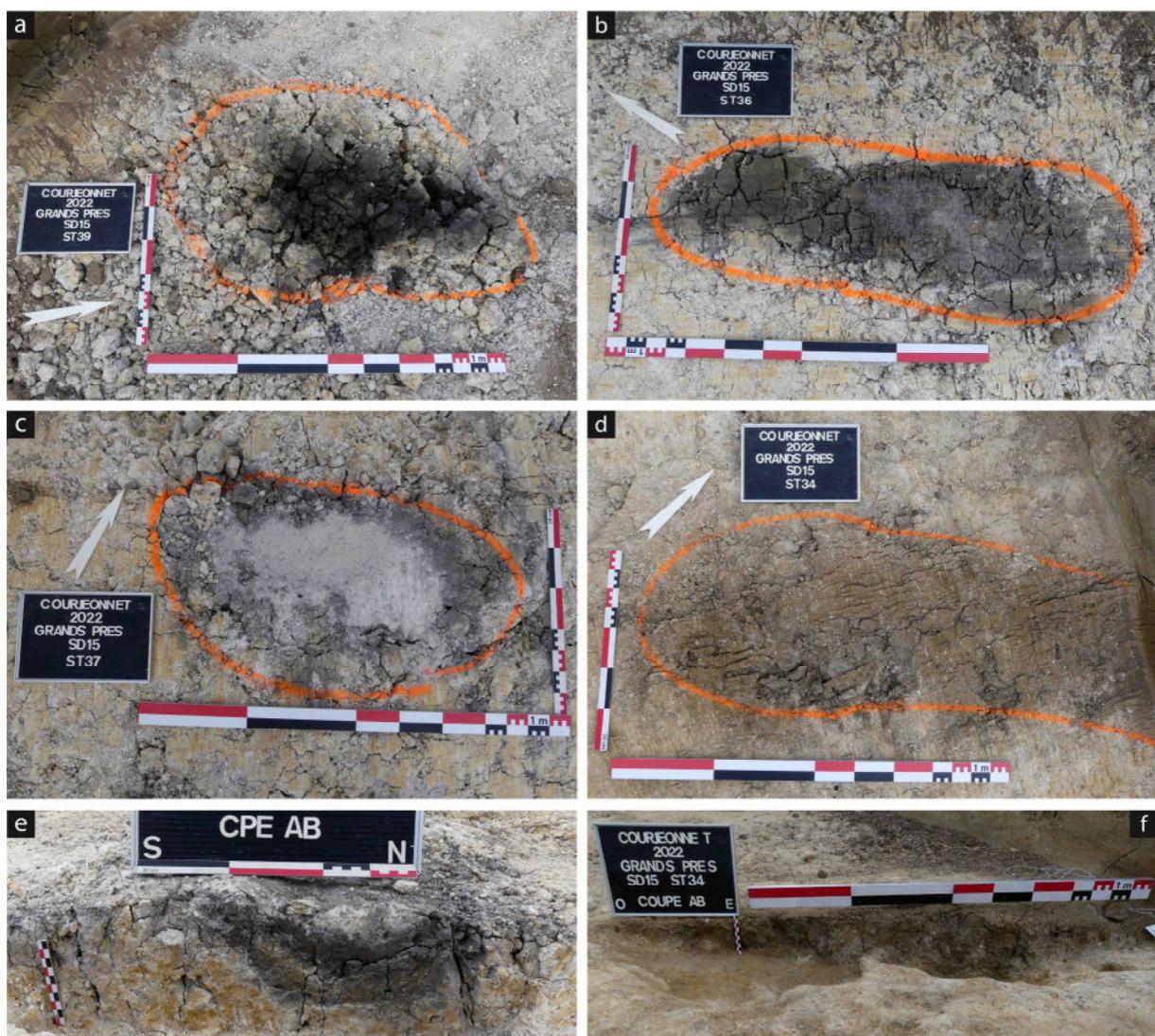


Figure 100 : Photographies de faits interprétés comme perturbations racinaires naturelles ou creusements de chablis.

(a) ST39 en plan.

(b) ST36 en plan ; ouverture à 138,85 m.

(c) et (e) ST37, plan et coupe après fouille ; ouverture à 138,92 m.

(d) et (f) ST34, plan et coupe après fouille ; ouverture à 139,2 m.

Noter les nettes différences de comblement, perceptibles à travers leurs colorations et l'aspect textural.

4.4. Caractéristiques morphologiques des traces de feu

Les traces de combustion mises au jour se matérialisent donc sous la forme de deux unités, l'une composée presque exclusivement de cendres (U3), l'autre de sédiments de teinte générale « rubéfiée » (U4). Ces deux unités sont de façon générale assez irrégulières et discontinues. Du point de vue de leur organisation, nous insisterons sur le fait que l'unité rubéfiée apparaît le plus fréquemment au-dessus des cendres. De plus, bien qu'en plusieurs points, U3 et U4 soient nettement mélangées, elles restent souvent assez distinctes l'une de l'autre, prenant la forme de volumes de quelques centimètres accolés. En outre, quelques petites concentrations charbonneuses ont été relevées en coupe. Il est remarquable qu'elles n'aient pas été découvertes dans les amas cendreux, mais aux interfaces de l'unité rubéfiée. D'autre part, il est bon de considérer que la continuité de l'unité cendreuse n'est en réalité pas aussi tranchée que les dessins stratigraphiques la font apparaître. Son caractère facilement dispersable à l'état sec, parallèlement à l'ouverture des fentes structurales des sédiments encaissants, a rendu délicat cet examen. Néanmoins, il est flagrant que la présence des cendres est non seulement récurrente, mais en certains endroits, même assez volumineuse (Figure 99). L'unité cendreuse affiche des teintes grisâtres, mais avec de légères variations, sous forme de concentrations diffuses plus ou moins sombres ou localement tirant légèrement vers le bleu. Par contre, un des amas de cendres est très distinctement blanchâtre sur une longueur de plus d'un mètre, de plus, il n'est pas recouvert de terre rubéfiée.

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'unité dite rubéfiée affiche en fait des couleurs assez variables, allant du jaunâtre au rougeâtre, avec divers degrés de clarté. Localement, les teintes sont franchement rouille. Elle se présente soit sous la forme de poches subhorizontales plus ou moins bien délimitées de plusieurs dizaines de centimètres de long pour une épaisseur moyenne d'environ dix centimètres (Figure 98, A-B), soit en concentrations irrégulières infra-décimétriques juxtaposées, que l'on peut plus ou moins différencier à travers leurs variations de couleurs. On observe aussi régulièrement des agrégats rubéfiés de diverses tailles, plus ou moins disjoints au sein d'une matrice encaissante non rubéfiée (en U5, mais aussi fréquemment à la base de U6). À certains endroits, il existe une continuité évidente entre ces faciès en agrégats et les couches rubéfiées (voir Figure 98, C-D). Lorsque l'unité se présente sous la forme d'agrégats rougeâtres-rouilles ponctuels, elle rappelle des traits d'oxydation pédologiques, plutôt de type imprégnations puisque ces teintes sont observables à l'intérieur même des volumes structuraux. Ils ne se présentent pas comme des revêtements de surface. Pour ce qui est des deux coupes de SD15, l'observation de transitions progressives entre les différents faciès que nous venons de décrire et la présence ponctuelle diffuse de cendres laisse peu de doute quant au fait que ces agrégats rougeâtres résultent d'une déstructuration/pédoturbation plus ou moins avancée de l'unité 4. Par contre, cela n'est pas forcément aussi évident pour d'autres profils ponctuels (observés sur une largeur réduite). En l'absence de « structuration » (traces dispersées dans la masse sédimentaire) ou d'autres marqueurs de feu associés (cendres, charbons), de tels résidus rougeâtres peuvent être aisément confondus avec des traits d'oxydation. Cette difficulté d'identification s'est posée sur le terrain pour certaines traces en périphérie des coupes de SD15. Hors de SD15, à défaut, des traces rouilles tout à fait similaires ont été enregistrées en tant que traits rédoximorphes.

D'autre part, nous avons aussi relevé quelques agencements singuliers entre ces deux unités. Notamment, une poche de sédiments rubéfiés, à la base convexe, reposant sur un mince niveau de cendres et moulée de part et d'autre par des poches cendreuses, ce qui donne l'impression d'un

enfouissement de la poche rubéfiée. Autre part, une couche cendreuse épaisse d'une dizaine de centimètres qui remonte (elle semble comprimée) entre les coins supérieurs juxtaposés de deux poches rubéfiées, légèrement inclinées l'une vers l'autre (en forme d'accent circonflexe, Figure 99, à 1,2 m en abscisse). Cette conformation a été comparée à une figure sédimentaire de type figure de charge, qui aurait entraîné l'injection des matériaux sous-jacents (les cendres) dans les couches supérieures.

Enfin, ajoutons que ces unités n'ont pas livré de mobilier. Seule une concentration d'ossements particulièrement fragmentés a été identifiée au sommet de U4 (Figure 98). Ils correspondent à des fragments d'un crâne de bœuf (unique ?), ayant vraisemblablement brûlé (comm. pers. R. Martineau).

4.5. Quelques premiers résultats d'analyse

4.5.1. Un échantillon de malacofaune

Un des amas de cendres de la coupe C-D a révélé la présence de nombreux restes de coquilles de gastéropodes (voir prélèvement sur la Figure 98). Un échantillon a été analysé par Salomé Granai⁹³. Le prélèvement s'est révélé assez riche (758 individus pour ½ L de sédiments). Seule une coquille a révélé les traces d'une altération thermique. Étant donné la fine intégration des coquilles au sein des cendres, il faut en conclure qu'elles se sont déposées après l'évènement de feu. Nous reprenons les principales conclusions de S. Granai : les espèces de milieux ouverts sont absentes ; chez les faunes terrestres, les taxons palustres sont largement dominants en nombre d'espèces et en individus ; chez les espèces aquatiques, les taxons pouvant survivre à des périodes d'assèchement temporaire sont anecdotiques ; les mollusques aquatiques sont largement majoritaires (95 %), ce qui permet de reconnaître la présence d'une nappe d'eau permanente ; le cortège malacologique illustre un milieu avec une nappe d'eau stagnante, peu profonde et encombrée par de la végétation immergée.



Figure 101 : Spectre écologique des mollusques de l'échantillon de cendres de Saint-Gond (crédits : S. Granai, 2023).

⁹³ GéoArchÉon ; UMR 8591 LGP.

4.5.2. Recherche de phytolithaires

Trois échantillons de cendres ont été préparés en vue d'une étude des phytolithes, par Aline Garnier⁹⁴ (SD15 U3.a et U3.b, et ST37). Il est apparu que les échantillons étaient stériles ou contenaient un nombre trop faible de phytolithes.

4.5.3. De rares charbons de bois

En vue de la réalisation d'une première datation radiocarbone, les trois prélèvements de plus d'un litre de cendres chacun ont été tamisés jusqu'à une maille de 1 mm (localisation des prélèvements sur la Figure 98). Aucun matériau végétal carbonisé n'a été retrouvé dans ces cendres. Nous nous sommes donc rabattus sur la petite concentration charbonneuse identifiée au sommet de l'unité rubéfiée U4, prélevée à vue (prélèvement n°8, Figure 98). L'échantillon est constitué de fragments de charbons de bois, associés à des agrégats de terre rubéfiée ou encaissante (U5), des fragments crayeux millimétriques (ou précipitations carbonatées secondaires ?) ainsi que des traces de cendres. Ce mélange de matériaux indique que l'échantillon est relativement remanié ou pédoturbé. Toutefois, la présence conjointe des cendres soutient que ces charbons sont liés aux couches U3-U4, plutôt qu'aux colluvions supérieures U5. Les quelques charbons du refus de tamis de 1 mm de cette concentration (n = 10) ont fait l'objet d'une caractérisation anthracologique. Seuls deux d'entre eux ont une anatomie suffisamment lisible pour proposer une identification (et par ailleurs tout à fait similaire : possiblement le même bois fragmenté ?).

Les caractères anatomiques de ces deux charbons⁹⁵, et entre autres la morphologie de leurs plans transversaux, suggèrent qu'il s'agit de Fabacées (Schweingruber, 1990 ; Schweingruber, Börner et Schulze, 2011, p. 175-192). Il est difficile de proposer une attribution au genre compte tenu de la forte variabilité anatomique au sein de cette famille. Celle-ci regroupe notamment, parmi les taxons qui lignifient, les ajoncs, genêts et cytises (respectivement les genres *Ulex*, *Genista* et *Cytisus* ; Jacamon, 1992). Les taxons ligneux indigènes de climat tempéré de cette famille sont essentiellement (exclusivement ?) des arbrisseaux et des sous-arbrisseaux, à caractère typiquement héliophile (Rameau et al., 1989)⁹⁶.

⁹⁴ Université de Paris-Est Créteil ; UMR 8591 LGP.

⁹⁵ Les caractères observés sont tels que :

Répartition des vaisseaux très irrégulière : organisés en bandes nettement tangentielles à nettement obliques (organisation dendritique) ; bandes étroites généralement larges d'une à deux cellules (aspect non « flammé ») ; et certains vaisseaux sont presque isolés. Dimensions irrégulières des pores (à tendance semi-poreuse ?). Absence de petits vaisseaux périphériques à ces derniers. Les pores occupent entre $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$ de la surface transversale. Les limites de cernes sont indistinctes. Malgré cela, la courbure est supposée forte, car les rayons fins sont très convergents. Toujours en coupe transversale, le parenchyme est moyennement distingué, il semble diffus (irrégulier) ou faiblement paratrachéal. En plan longitudinal radial/tangentiel : vaisseaux avec épaississement spiralés plutôt fins, mais pas toujours visibles. Les perforations sont simples et les punctuations radio-vasculaires assez larges. En plan longitudinal tangentiel, les rayons sont (1)-2-3-sériés.

⁹⁶ À titre d'exemple, en considération des flores actuelles régionales (Thevenin, 1996), on pourrait envisager le Baguenaudier (*Colutea arborescens*) ou le Genêt des teinturiers (*Genista tinctoria*). La première espèce est xérophile et héliophile mais peut persister dans des peuplements moins ouverts (Bournerias et Timbal, 1980 ; Rameau et al., 1989). La seconde espèce peut notamment se développer en tant qu'espèce pionnière sur des sols à fortes variations annuelles d'humidité, elle est donc théoriquement plus compatible d'un point de vue pédoclimatique (Rameau et al., 1989).

4.6. Attribution chronologique et contexte archéologique

Un de ces fragments carbonisés a été daté au radiocarbone. Le résultat de la mesure nous donne l'intervalle : 3330-2930 cal. BC⁹⁷. Ce résultat s'inscrit dans les périodes du Néolithique récent II et III (Cottiaux, Salanova, et al., 2020 ; Salanova et al., 2011). Malheureusement, la dispersion des probabilités – en partie imputable à un léger palier de la courbe de calibration – ne permet pas de caler cet événement avec plus de précision. La Figure 103 illustre ce résultat et présente en parallèle la distribution temporelle des probabilités chronologiques des sites archéologiques micro-régionaux. Nous reprenons ici la compilation de dates radiocarbones publiée par Edinborough et al. (2021), obtenus pour les sites de la moitié méridionale de la Champagne crayeuse (au sud de la vallée de la Marne), dont une partie sont situés proche des marais de Saint-Gond. Nous avons conservé les attributions de sites ou structures proposées par les auteurs, qui sont scindées en trois types : *activités minières*, *hypogées* et *sites d'occupations/habitat*. Les âges BP bruts disponibles en annexe ont tous été recalibrés. Il faut bien considérer que ce graphique présente un schéma général de la chronologie des sites, et évidemment soumis à l'état des recherches actuelles. La Figure 102 montre la localisation des sites de toutes les périodes néolithiques qui sont documentés à ce jour, dans le secteur des marais de Saint-Gond (données inédites, R. Martineau ; et références bibliographiques citées dans cette partie). Ils sont seulement classés selon leur attribution fonctionnelle, car la base de données chronologique de ces sites est en cours de réalisation. Nous indiquerons donc rapidement ci-dessous quelques précisions relatives à ces occupations. Précisons que les sites dits d'occupation, qui reposent seulement sur des indices anciens et non encore vérifiés, ou sur des découvertes ponctuelles de mobilier en prospection n'ont pas été retenus, car ils nous paraissent trop incertains.

La Figure 102 permet d'observer le contraste flagrant entre la répartition des sites archéologiques, tous types confondus, et les espaces marécageux. Néanmoins, il faut prendre en compte que ces derniers n'ont pas fait l'objet d'investigations poussées, comme celles réalisées sur les côteaux septentrionaux. De plus, bien que les opérations menées en 2022 réfutent quelques-unes des anciennes mentions de sites en bordure des marais, une vérification plus approfondie des secteurs en contrebas des buttes crayeuses s'impose. Retenons que, sans considérations chronologiques plus précises, il existe au Néolithique une somme très importante de traces d'activités d'exploitation et culturelles. Quant aux sites d'habitats, ceux documentés sont relativement éloignés de nos découvertes. Le rebord du plateau de Brie, qui domine au nord la zone de concentration des minières et des hypogées, est une localité riche en indices de sites d'occupation. Néanmoins, à ce jour, seule une assez vaste occupation du Néolithique ancien a été fouillée aux « Hauts de Congy » (culture du BVSG ; Martineau, Dumontet et Denaire, 2020). Les sites plus proches des zones humides sont situés nettement en amont de la cuvette tourbeuse principale. Il s'agit d'occupations attribuées au Néolithique moyen et récent, voire final.

⁹⁷ 4438 ± 32 BP ; CIRAM-6465.

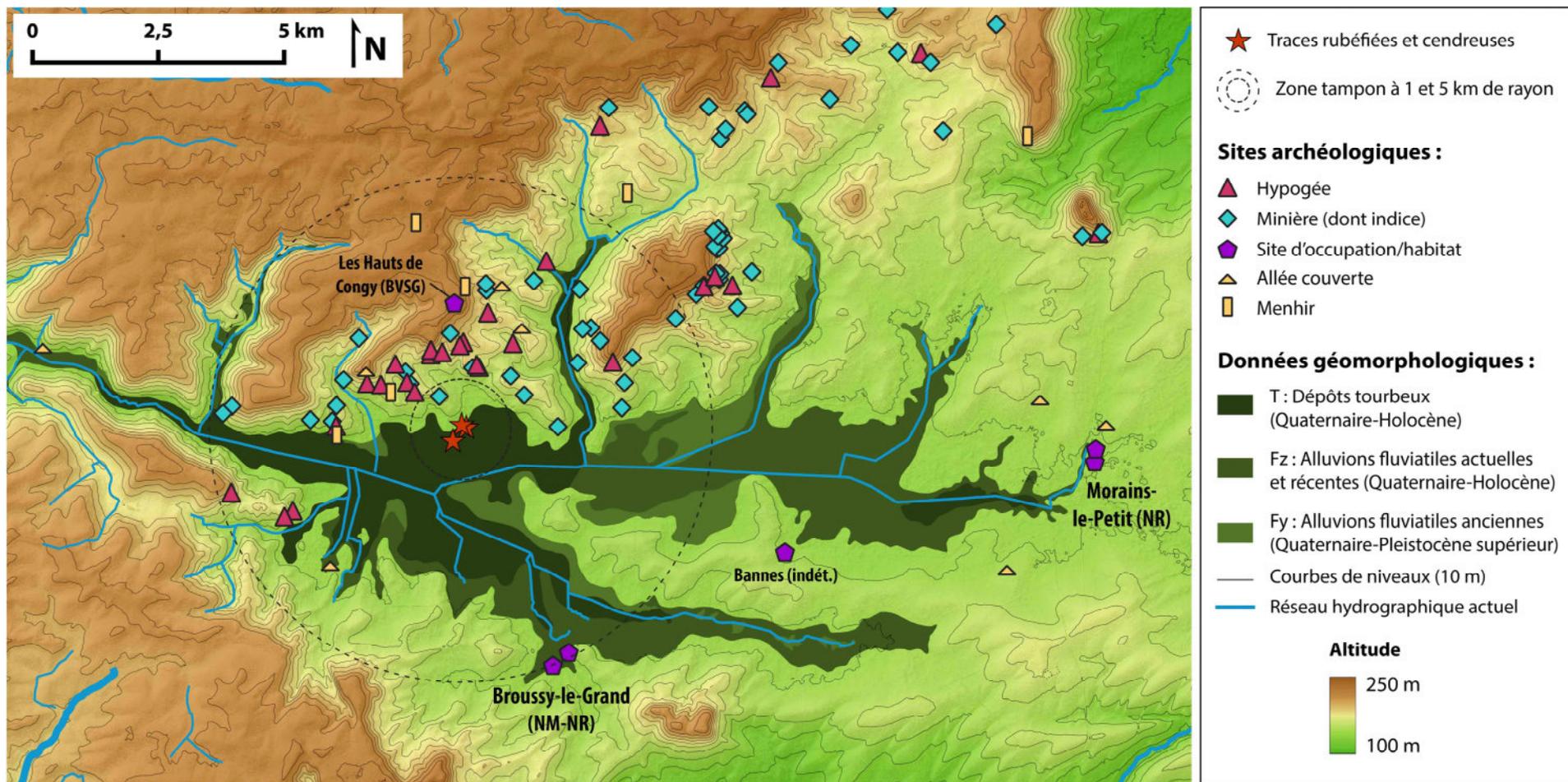


Figure 102 : Carte de localisation des sites néolithiques du secteur des Marais de Saint-Gond.

Les sites sont regroupés selon leur attribution fonctionnelle. Données brutes inédites d'après R. Martineau. Les trois couches géologiques considérées (Fy, Fz, Tourbes) délimitent l'extension présumée des zones humides, au sens large.

BVSG : Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain ; NM : Néolithique moyen ; NR : Néolithique récent

La Figure 103 illustre quant à elle que la répartition chronologique des sites est, de façon générale, réciproquement dépendante de leur classification. Ainsi, le phénomène des hypogées est en particulier très bien circonscrit aux époques du Néolithique récent (NR). La date des traces de combustion mises au jour est contemporaine de ces manifestations culturelles. L'exploitation du silex, bien qu'elle semble être une activité moins soutenue qu'au cours du Néolithique moyen (NM), est attestée par plusieurs vestiges datés par radiocarbone du Néolithique récent II (Vert-la-Gravelle « La Crayère », Loisy-en-Brie « 56 Grande Rue », Vertus « Grandval » ; Martineau et al., 2014, 2018, 2019). D'ailleurs, la contemporanéité entre certains puits d'extraction et hypogées distantes de seulement quelques mètres, est mise en évidence par la fouille et les dates radiocarbones (Martineau et al., 2018, p. 140). Par contre, il est flagrant que les sites d'occupations datés par méthode absolue ne concernent quasiment pas le Néolithique récent II-III. Dans le détail, la seule datation radiocarbone du Néolithique récent II⁹⁸ attribuée à un site dit d'occupation, correspond en réalité à une fosse isolée, probablement de type *Schlitzgruben* (mise au jour sur un diagnostic linéaire de canalisation) et qui plus est, datée sur un charbon provenant d'une couche de comblement intermédiaire (Charbonnier et al., 2016). Il est donc difficile de considérer qu'il s'agit d'un véritable site d'occupation. De plus, il est assez éloigné de notre secteur d'étude, puisque distant de plus de 12 km vers le sud (Connantre, Fère-Champenoise, hors carte).

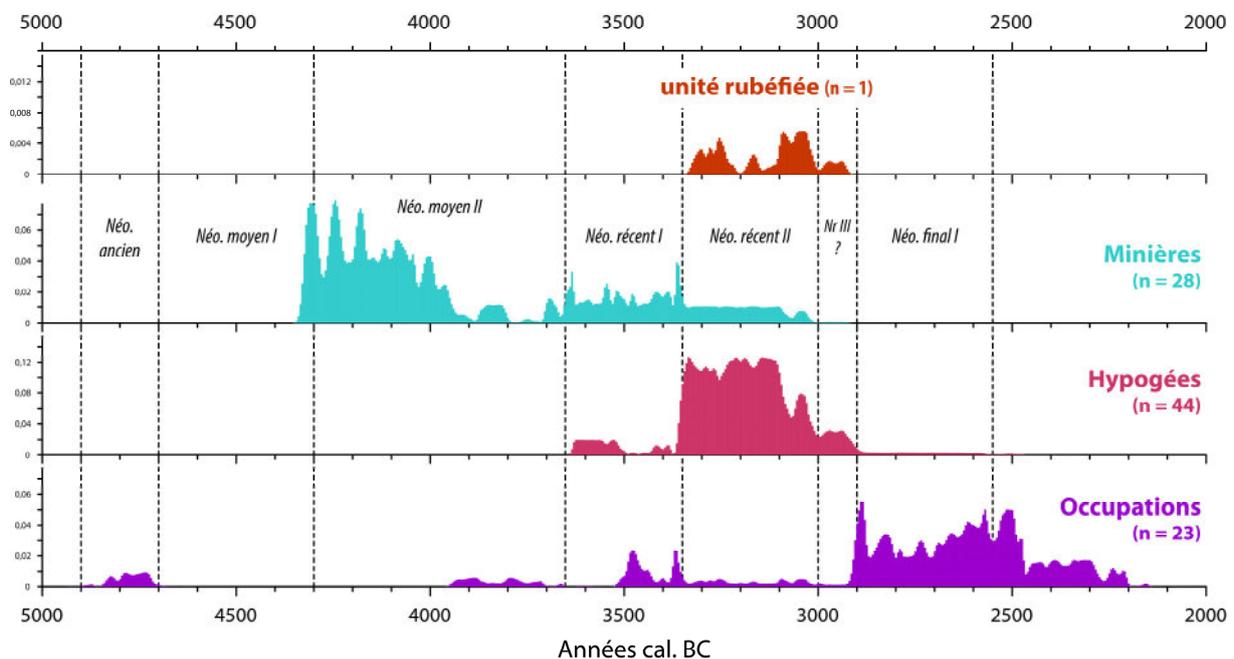


Figure 103 : Distribution chronologique des probabilités radiocarbones des sites néolithiques du sud de la Champagne crayeuse (dates recalibrées d'après les données brutes de Edinborough et al., 2021). Probabilités à résolution de cinq années, réalisées avec le logiciel OxCal 4.4 et la courbe de calibration Intcal 20 Attention, noter les différences de facteur des axes des ordonnées : hypogées (x1), minières et occupations (x2), unité rubéfiée (x10)

⁹⁸ 3340-2940 cal. BC à 2 sigmas ; 4450 ± 30 BP ; Beta-381776 ; fait 3046, US 3058.

Plus proche des marais de Saint-Gond, il existe bien deux sites d'habitat relativement importants du Néolithique récent. En premier lieu, le site de Morains-le-Petit « Le Pré à Vaches » (Val-des-Marais), pour lequel une seule datation absolue a été réalisée, et dont les probabilités correspondent au Néolithique récent I⁹⁹ (Salanova et al., 2011). Aussi, les corpus mobiliers semblent conforter son attribution à une phase ancienne du Néolithique récent (Martineau et al., 2020). Toutefois, des analogies tant dans les industries céramiques, lithiques et osseuses de ce site avec celles de la culture Horgen du Jura, contemporaine du Néolithique récent II¹⁰⁰, ont été soulevées (Augereau et al., 2007 ; Cottiaux, Salanova, et al., 2020 ; Martineau et al., 2020). En second lieu, on peut retenir le site de Broussy-le-Grand « L'Ourlet », dont une petite partie du corpus céramique date probablement du Néolithique récent ou final (Charnot, 2019). Par conséquent, même si les indices de fréquentation des groupes humains sont évidents, il n'existe pas de site d'habitat clairement défini comme contemporain des traces de feu identifiées. De surcroît, ces deux sites sont situés sur des bordures de la zone humide éloignées et opposées au secteur étudié (Figure 102). Cette « absence » est d'autant plus flagrante si l'on considère l'importance du phénomène funéraire des hypogées au Néolithique récent II, mais il est évident que de par leur nature même, ces dernières disposent d'une visibilité archéologique difficilement comparable (Martineau et al., 2014). Malgré ce biais « taphonomique » indéniable, il faut dire que les sites d'habitats du Néolithique récent restent très peu courants, tant à l'échelle régionale que celle du Bassin parisien (Cottiaux, Jallot et Marchand, 2007 ; Salanova et al., 2011 ; Cottiaux, Brunet, et al., 2020 ; Thouvenot et al., 2020).

5. Discussion

5.1. Dynamique pédo-sédimentaire d'un espace marginal des marais

Les premiers résultats que nous venons de présenter nous apportent de nouvelles données sur l'évolution pédo-sédimentaire des marais de Saint-Gond. Dans le secteur étudié, des dépôts argileux très sombres, mais peu organiques (U2/U5) sont identifiés au toit des couches de craies glaciaires, colmatant d'assez vastes étendues légèrement dépressionnaires. Ces dernières occuperaient des incisions fluviales tardiglaciaires. L'une d'entre elles est située au fond de l'ancien bras de marais, mais les autres sont en léger surplomb, sur le dôme crayeux. Elles se superposent donc à une morphologie héritée, certainement depuis la capture des anciens cours d'eau en amont. Cette morphologie est à l'origine de la relative mosaïque de reliefs qui caractérise les marais de Saint-Gond (et cela à différentes échelles spatiales emboîtées). La formation de ces unités argileuses sombres est expliquée conjointement par des apports détritiques fins issus d'écoulements de très faible énergie et une intégration assez poussée des matières organiques. Elles montrent un caractère vertique plus ou moins bien exprimé, qui procède d'un héritage ou d'une transformation des minéraux argileux dans ces contextes confinés. Ce développement pourrait s'expliquer par des alternances de périodes de

⁹⁹ Sur une gaine de hache en bois de cerf : 3530-3340 cal. BC à 93,7 % de probabilité ; 4630 ± 45 BP ; GrA-29529.

¹⁰⁰ Vers 3200-3100 cal. BC pour les cultures matérielles du Jura français.

dessiccation/engorgement à l'échelle saisonnière. Mais il est aussi plausible que les matériaux ruisselés aient déjà connu une première phase de pédogenèse qui expliquerait leurs caractères.

En outre, la répartition spatiale de ces formations, même sur les positions très légèrement surélevées des dômes de terrasses crayeuses, pose question quant à l'évolution et l'extension ancienne des zones humides. Étaient-elles limitées aux fonds des incisions sous la forme « d'îlots » ponctuels ou est-ce que leur répartition actuelle s'explique uniquement par des différences de préservation ? Nous ignorons en effet leur épaisseur maximum. Il est flagrant que cette formation a été localement déstructurée et réintégrée par la pédogenèse ultérieure. Le premier test malacologique au sein de l'unité cendreuse, qui est donc intercalée au sein cette formation, indique l'existence d'une nappe d'eau permanente. Ces observations invitent à penser que l'extension des terrains humides a pu être plus étendue que cela est présentement supposé.

La position stratigraphique des unités argileuses sombres et leur recouvrement par les vestiges de feu néolithique permet de faire l'hypothèse que leur formation débute avec le réchauffement climatique holocène. Le mobilier archéologique varié qui y est préservé suggère qu'elles aient pu fonctionner relativement longtemps. Leur chronologie reste donc encore à définir précisément. En l'état, nous interprétons la formation U2/U5 comme des horizons minéraux hydromorphes structuraux de paléosols à tendance verticale. De manière très schématique, dans la catena de la première moitié de l'Holocène, ils devaient constituer une transition entre des sols carbonatés de bas de versant (Calcosols, Rendosols, Colluviosols) et des sols hydromorphes organiques (Histosols).

5.2. Modalités de formation des traces de combustion

Les traces de feux observées lors de ces fouilles sont systématiquement associées à ces formations argileuses sombres. Quelques traces de cendres et de terre rubéfiée ponctuelles ont été notées dans le secteur de la terrasse crayeuse, mais elles ont surtout retenu notre attention dans celui du bras de marais ; à la fois par leur volume et leur agencement. Dans ce secteur, elles se présentent comme une unité cendreuse directement recouverte par une unité brun-ocre à rougeâtre-rouille, qui s'étalent de manière plus ou moins continue sur plusieurs mètres de longueur. La présence de ces cendres – qui sont particulièrement sensibles à la dissolution, aussi bien qu'à l'érosion hydrique, mécanique et éolienne – dans ce contexte pédo-sédimentaire de plein air et fortement marqué par l'humidité, nous paraît tout bonnement exceptionnelle (Brochier, 1983 ; Canti, 2003). Bien que l'on ne dispose pas encore de résultats analytiques sur cette séquence, l'association directe entre les cendres et les sédiments rubéfiés permet d'assurer que ces derniers résultent de la cuisson. De surcroît, bien que les traces observées soient singulières, leur séquence stratigraphique très claire permet de déduire qu'elles correspondent à un système de combustion à couvert.

Le combustible était donc directement recouvert de terre, qui a largement chauffé, ce qui explique par la même, que les cendres formées aient été préservées, car directement enfouies par l'effondrement des matériaux en terre, a fortiori, au cours de la cuisson. Néanmoins, des éléments supplémentaires doivent être pris en compte pour expliquer cette fossilisation. D'abord, le fait, qu'elles reposent sur une unité assez riche en argile et dense à l'état humide, ce qui a dû empêcher ou au moins limiter qu'elles

ne subissent un lessivage vertical. Ensuite, nous ne pouvons expliquer le fait qu'elles n'aient pas été dissoutes que par l'ambiance géochimique générale, largement dominée par le calcium. Nous n'avons pas encore eu le temps d'observer ces cendres, mais la quasi-absence de phytolithes indique qu'il doit s'agir de cendres principalement calcitiques. Il est d'ailleurs possible que la rareté des phytolithes résulte, non pas de la constitution initiale du combustible, mais de leur dissolution préférentielle, à cause du milieu trop basique (Canti, 2003). La pauvreté en charbons de bois macroscopiques pourrait être expliquée par la même contrainte, d'autant plus accentuée par l'alcalinité même des cendres (Braadbaart, Poole et van Brussel, 2009 ; Huisman et al., 2012). Compte tenu du volume de cendres, il nous paraît peu probable qu'aucun charbon n'ait initialement été formé. En effet, leur accumulation au cours de la chauffe a généralement tendance à engendrer, très localement, des conditions déficitaires en oxygène favorables à leur production (et cela a priori d'autant plus dans le cadre d'une cuisson à couvert). Il sera nécessaire de vérifier si les couleurs sombres des cendres correspondent effectivement à la présence de résidus microscopiques carbonisés (Wattez, 1992). Par ailleurs, nous avons vu que les rares charbons identifiés n'étaient pas directement liés aux cendres, ce qui renforce ces propositions.

D'autre part, la morphologie de l'unité thermo-rubéfiée possède également quelques particularités diagnostiques. Tout d'abord, leur coloration, qui traduit que la chauffe s'est déroulée en conditions globalement suffisamment oxygénées. Ensuite, le fait qu'elle concerne un volume de sédiments somme toute important. Et, leur morphologie générale, qui bien qu'assez irrégulière, semble dessiner une composition de plusieurs masses disjointes. Enfin, nous n'observons pas de charbons à l'intérieur même de l'unité rubéfiée (du moins en coupe), par contre, nous en observons à ces interfaces. L'épaisseur des altérations thermiques de l'unité supérieure est également remarquable vis-à-vis de l'unité à la base des cendres, qui elle, ne paraît pas chauffée, ou le serait insuffisamment pour qu'on en perçoive des stigmates physiques (le manque de lisibilité des coupes ne permet pas de le préciser). Il est plausible que les cendres qui se sont progressivement déposées aient pu jouer un rôle d'isolant thermique à la propagation en profondeur (Canti et Linford, 2000 ; Sergant, Crombé et Perdaen, 2006).

Par contre, il apparaît clairement que certaines traces et amas cendreux ne sont pas recouverts par l'unité rubéfiée. Leur enfouissement paraît donc assez énigmatique. Sur la coupe C-D, les cendres sont directement recouvertes de l'unité argileuse U5, mais l'observation de cette dernière montre qu'elle est en fait ponctuée de petits nodules ou d'agrégats rubéfiés-rouilles. Est-il possible qu'elles aient été également recouvertes par des masses rubéfiées, mais que ces dernières aient été totalement transformées par l'altération post-dépositionnelle, sans que les cendres aient été fortement affectées ? Il faudrait alors considérer que cette transformation se produise, non par des remaniements mécaniques (pédoturbation), mais plutôt par des transformations géochimiques. Compte tenu du contexte très humide, il nous semble envisageable que les minéraux argileux décomposés par la chauffe aient connu une réhydroxylation, formant de nouvelles structures cristallines directement en place (Hamilton et Hall, 2012). Les analyses devront chercher à répondre à ce problème. En l'état, nous faisons l'hypothèse qu'un phénomène tout à fait comparable à celui observé pour le site de Chalain affecte ces traces. Cette hypothèse amènerait à considérer de manière assez différente la succession stratigraphique observée. En tous cas, il est clair nous peinons à imaginer que les cendres aient pu être préservées sous la forme de tels amas, dans ce contexte très humide, sans avoir été directement enfouies.

5.3. Interprétation et questionnements

Du seul point de vue de leur configuration générale, ces vestiges de combustion s'accordent parfaitement avec ceux que les feux agricoles en fourneaux sont susceptibles de produire. Cette organisation illustre donc un évènement de chauffe unique, où les résidus sont encore en place, sur les lieux mêmes où ils ont été produits (voir à très faible distance pour les concentrations discrètes). Les rares indices archéologiques, sans cohérence particulière, ne contredisent pas cette interprétation. Seule la présence de quelques fragments de crâne de bœuf brûlé nous interpelle quelque peu. Néanmoins, étant donné que l'on se trouve dans un milieu palustre, ces ossements pourraient avoir été présents avant les évènements. En l'état, nous les considérons comme relevant de l'anecdotique. Finalement, le point qui serait le plus intrigant par rapport à l'hypothèse de fourneaux agricoles, est celui-là même que ces structures sont préservées selon un agencement quasi en place.

Néanmoins, malgré la forte visibilité de ces traces, il faut considérer qu'elles ne constituent en réalité que la partie basale des structures de combustion, et nous avons vu à quel point les buttes d'écobuages peuvent être volumineuses. Et il est aussi documenté que ces buttes peuvent être cultivées tel qu'elles se trouvent après la cuisson, ou qu'elles peuvent n'être épandues que de façon très sommaire. De plus, nous n'avons pas de vision spatiale du phénomène, hormis celle de l'existence de traces relictuelles sur quelques coupes du dôme crayeux et des autres plus en aval, mises au jour lors du diagnostic de 2003. Ainsi, la configuration identifiée est peut-être tout simplement, une conservation exceptionnelle.

D'autre part, l'étude de l'échantillon malacologique, qui caractérise en toute vraisemblance un état du milieu postérieur à l'évènement – et probablement même très court après celui-ci – nous indique des conditions totalement engorgées, avec une nappe d'eau permanente. Évidemment cet échantillon est ponctuel, et les modalités de colonisation des gastéropodes de ces traces cendreuseuses posent un certain nombre de questions. Néanmoins, il met en évidence une remontée notable du niveau d'eau, qui est plutôt cohérente avec les observations stratigraphiques, qui montrent que la sédimentation postérieure au feu est relativement comparable à celle qui le précède, c'est-à-dire une sédimentation avec des ruissellements de très faible énergie (complexe U2/U5). Cela suggérerait que l'enfouissement de ces vestiges a été plutôt rapide. La morphologie convolutive en certains points des unités cendreuseuses et rubéfiées traduit une déformation à l'état humide, qui s'inscrit dans le même ordre d'idée (Huisman et Raemaekers, 2014). Toutefois, le faciès décrit comme possible figure d'injection nous paraîtrait plutôt résulter du seul effondrement, en cours de cuisson (ou suite à) des masses de terre dans les cendres. Il apparaît donc d'autant plus nécessaire d'arriver à faire la part entre les matériaux qui résultent de la sédimentation colluviale postérieure à ces traces, et les matériaux argileux qui ont possiblement pu évoluer à partir des produits de la combustion (hypothèse de la réhydroxylation).

D'un point de vue climatique général, l'intervalle de probabilité chronologique obtenu (3330-2930 cal. BC) se situe clairement dans une brève phase de réchauffement climatique et d'abaissement des niveaux lacustres, entre 3250 et 2900 cal. BC (entre les phases de haut niveau des lacs 9 et 8 : Magny, 2013). Le bois que nous avons fait dater étant une fabacée, famille regroupant surtout des espèces héliophiles et peu longévives, le risque d'un effet vieux bois est faible. Qui plus est, il s'agit surtout de taxons indicateurs de milieux secs et ouverts, de type lande (voire éventuellement de bois clairs). Leur simple présence dans ce contexte pédo-sédimentaire peut donc paraître surprenante. Certaines Fabacées

sont aussi des colonisatrices typiques de terres cultivées ou pâturées abandonnées (Cornu, 2003 ; Dumez, 2010 ; Jacamon, 1992). Mais surtout, elles peuvent être cultivées, et cela, en particulier dans le cadre de systèmes agricoles basés sur le feu. Évidemment, deux fragments de charbons sont impropres à restituer une formation végétale, ils sont donc à considérer comme de premiers indices à discuter¹⁰¹.

Néanmoins, mis bout à bout, ces faisceaux d'indices nous permettent de formuler une première hypothèse de séquence évènementielle. Avant l'évènement, le secteur est un milieu palustre, associé à la présence d'une nappe d'eau superficielle, possiblement de faible épaisseur, mais présente quasiment la majorité de l'année. À la faveur d'un assèchement climatique remarquable (ou saisonnier ponctuel ?), le niveau d'eau s'abaisse fortement, les terrains marécageux minéraux sont investis, décapés et des fourneaux sont préparés. Du bois a pu être importé des terrains légèrement en amont pour fournir du combustible. Les fourneaux sont partiellement épandus puis les terres sont mises en culture. Une remontée de la nappe, peut être limitée aux secteurs écobués les plus en contrebas vient recouvrir les traces et empêche potentiellement la poursuite de l'exploitation dans cette zone. Dans les secteurs légèrement en surplomb (dômes crayeux), l'exploitation du sol a pu se poursuivre, et les vestiges de combustion ont été plus fortement mélangés et remaniés (ce qui pourrait en partie expliquer leur faciès très résiduel, de même que celui de leur encaissant argileux, à l'exception des anomalies dépressionnaires).

Évidemment, de nombreux points nous restent totalement inconnus pour le moment, mais les futures analyses et investigations devraient permettre de préciser ou de réfuter ce schéma. En particulier, la question de la temporalité effective de ces phénomènes reste une vraie question. Nous sommes face à un évènement marquant dans les archives pédo-sédimentaires, mais qu'en est-il de son impact à moyen ou long terme dans le paysage ? L'entreprise dont témoignent ces vestiges de fourneaux est-elle ponctuelle ou s'inscrit-elle dans une « planification » à plus long terme des terrains ? Il est indispensable d'acquérir des séquences paléo-environnementales continues pour pouvoir tenter d'y répondre. Par ailleurs, s'il est tout à fait envisageable que les fluctuations des conditions climatiques soient à l'origine d'une préservation exceptionnelle de ces structures de combustion, ces variables ne fournissent pas d'explication quant à la manifestation de cette pratique agricole.

La contemporanéité de ces traces avec le phénomène des hypogées (3650-2900 cal. BC) pose d'autres questions. Il a été postulé, sur la base de modèles probabilistes des datations radiocarbone, qu'il correspondrait à un accroissement démographique régional (Edinburgh et al., 2021). Cette interprétation nous paraît très discutable, d'autant plus qu'il est évident que la nature des sites archéologiques est en partie corrélée à la chronologie (voir sur la question : Crombé et Robinson, 2014). Le contexte de préservation particulier et remarquable des hypogées, entraîne un biais qui empêche toute comparaison raisonnable avec la quantité des découvertes de sites d'occupations néolithiques de plaines. Le phénomène des hypogées correspond donc, a priori, à un phénomène culturel bien

¹⁰¹ On remarquera tout de même que les études anthracologiques des mines et hypogées fouillées à Vert-la-Gravelle « La Crayère », occupations en partie contemporaines des présentes traces de feu (Néolithique récent II), n'ont pas permis d'identifier un seul bois de Fabacées (Dufraisse, Lemoine et Zajac, 2018). Les assemblages des hypogées sont majoritairement composés d'ifs commun (*Taxus baccata*), de chênes (*Quercus* sp.) et de pins (*Pinus* sp.). Il est par ailleurs envisagé que des peuplements abondants d'ifs se soient développés dans les marais.

particulier, d'autant plus particulier que les sites d'habitation sont particulièrement rares. Sont-ce les mêmes groupes humains qui inhument leurs défunts aux flancs des côteaux et qui cultivent les bordures de ces terrains humides suivant des techniques d'agriculture temporaires liées au feu ? Il est tentant de l'imaginer, mais de là à le démontrer... Où étaient leurs habitats ? Possiblement dans les marais ? Les investigations archéologiques sont encore trop rares pour s'assurer de l'absence de sites d'occupation dans ces zones humides, d'autant que jusqu'à aujourd'hui, seul ce secteur légèrement surélevé a été sondé. La rareté des habitats de cette période serait-elle la conséquence de processus géomorphologiques limitant leur préservation, ou tout autrement encore relative à la nature même des architectures ? Cette fugacité ne pourrait-elle pas traduire une mobilité accrue, mobilité qui s'exprimerait aussi à travers ces pratiques agricoles temporaires ?

À ce stade, nous voyons qu'il serait possible d'interpréter ces découvertes de diverses manières, et certainement même en des sens contradictoires. En attendant de nouvelles données, il reste que nous avons ici, la contemporanéité de phénomènes originaux, dont la systématisation (si l'en est une) nous échappe.

Outre ces questionnements archéologiques auxquels il est encore difficile de répondre, les découvertes des Marais de Saint-Gond mettent en exergue le problème de l'analogie de faciès, et précisément de la distinction entre terre chauffée et traits d'oxydation pédologiques. Les teintes prises par l'unité rubéfiée prennent localement des teintes très rouilles, qui rappellent fortement ces derniers types de faciès. Ceci est à l'origine d'un vrai problème d'identification puisque de telles traces sont ponctuellement perceptibles, de façon plus ou moins discrète, mais ne sont pas toujours associées à des résidus cendreaux (en macroscopie). Leur occurrence latérale, mais distante permet fortement de supposer qu'elles résultent, sinon du même évènement, de phénomènes similaires. Néanmoins, lorsque ces « tâches » rougeâtres-rouilles sont isolées, le doute est permis. Nous avons déjà vu que la dynamique du fer pouvait engendrer des modifications de faciès, se superposant aux altérations thermiques. C'est possiblement le cas ici, ce qu'il faudra indispensablement vérifier. Ce site pourrait être un secteur très intéressant pour rechercher des méthodes de discrimination à fine échelle des micro-agrégats brûlés, d'imprégnations rédoximorphes.

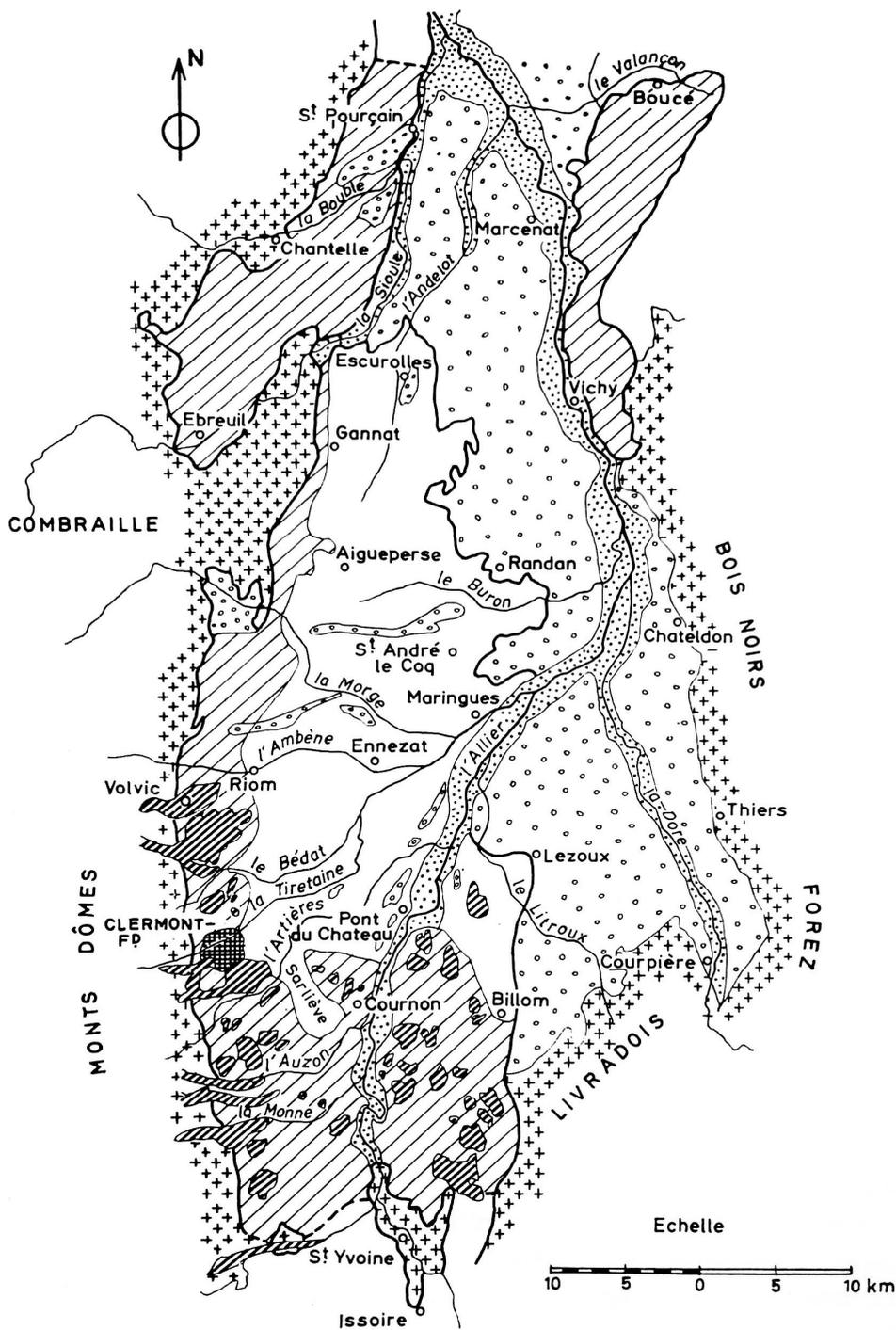
Partie 7 :
Des niveaux rouges énigmatiques
dans la plaine de Limagne (Puy-de-Dôme)

1. Préambule

Fortement visible de par sa très vive coloration rouge, un niveau sédimentaire préhistorique identifié comme résultant d'une chauffe, est régulièrement repéré dans le remplissage holocène de la plaine de Limagne. Il est identifié en différents points distants de plusieurs kilomètres au sein d'une ancienne zone humide. Bien que plusieurs interprétations totalement divergentes aient déjà été proposées quant à son origine (défrichements néolithiques, évènement cosmique catastrophique, incendie des marais), celui-ci n'a pas encore fait l'objet d'une caractérisation spécifique pour comprendre sa formation. Sa mise au jour dans un secteur complexe, où l'activité volcanique a été particulièrement intense durant le Tardiglaciaire et le début de l'Holocène (Miallier et al., 2012 ; Raynal, Vernet et Daugas, 2003 ; Vernet, 2013b ; Vernet et Raynal, 2008), où l'activité hydrologique joue un rôle crucial dans l'évolution pédosédimentaire et a fortement varié au cours de l'Holocène (Ballut, 2000), et enfin, où les premiers indices d'agriculture sont assez précoces à l'échelle régionale (Trément et al., 2006), nécessite de reprendre cette question de manière précise.

Ainsi, dans l'objectif de tenter de préciser l'origine de ces traces rubéfiées (naturelle ou anthropique ; pyrogénique ou pédogénétique ; etc.), nous avons réalisé une première synthèse de la documentation obtenue lors des opérations d'archéologie préventive menées dans le secteur. Une compilation des données stratigraphiques et des descriptions de terrain a été réalisée. De plus, compte tenu de l'extension spatiale de ces traces, nous avons entrepris la réalisation d'une carte archéologique des occupations du secteur clermontois, sub-contemporaines de ces traces, pour tenter d'approcher au mieux sa situation paléogéographique. Une collaboration a été entreprise avec Gérard Vernet¹⁰², géoarchéologue ayant eu l'occasion d'observer ces traces à plusieurs reprises, et de les prélever. Les résultats des différentes analyses géoarchéologiques réalisées nous permettent d'en proposer une nouvelle interprétation.

¹⁰² INRAP ; Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand.



-  Alluvions récentes = chambonnages
-  Alluvions anciennes Plio-quaternaire et Stampien inférieur détritique
-  Limites de la Limagne marno-calcaire (Stampien moyen et Stampien supérieur)
-  Plaine marneuse
-  Pays des Buttes
-  Affleurements volcaniques
-  Terrains primaires

Figure 104 : Régions naturelles et affleurements géologiques de la Grande Limagne, d'après L. Gachon (1963).

2. Contexte général et historique de découverte

La Grande Limagne est un vaste fossé d'effondrement qui s'est principalement formé durant l'Oligocène, et au sein duquel se sont accumulées d'importantes formations carbonatées, fluviales et lacustres (Aubert et al., 1975). Du Miocène inférieur jusqu'au Quaternaire récent, plusieurs phases d'activités volcaniques vont conduire à la formation d'un relief complexe et fortement dénivelé, dont à l'édification de la Chaîne des Puys où culmine le Puy de Dôme à 1465 m (Aubert et al., 1975 ; Miallier et al., 2012 ; Raynal et al., 1994). La Chaîne des Puys surmonte le plateau cristallin des Dômes (altitude d'environ 800-1000 m), qui constitue la bordure occidentale de la plaine (altitude 300-500 m). À partir de la fin du Tardiglaciaire, les zones dépressionnaires de la Limagne évoluent en marais, qui semblent toutefois connaître une dynamique hydrologique très variable dans le temps et l'espace (Ballut, 2000, 2001).

Au cours de l'Atlantique, alors que les manifestations volcaniques s'atténuent, l'érosion progressive des sols argilo-calcaires et du substrat marno-calcaire des versants de Limagne entraîne le développement dans les zones basses d'un complexe de sols argilo-limoneux particulièrement fertiles, renseignés sous le terme de « Terres noires » (Gachon, 1963 ; Jamagne, 2011 ; Trément, 2011). Ce complexe pédo-sédimentaire correspond à une séquence évolutive largement dominée par l'influence du calcium, dont la différenciation est essentiellement contrainte par leur position topographique et les conditions hydrologiques. Leur classification pédologique diffère toutefois notablement selon les auteurs, et les caractères qu'ils mettent en avant. Ces sols sont tantôt rapprochés de sols calciques (plus ou moins carbonatés ou décarbonatés : Calcosols, Calcisols, Rendosols), tantôt plutôt considérés comme des (pseudo-)Chernosols (sols mélanisés caractérisés par une très forte activité biologique, et en particulier des lombrics, formant un horizon dit « vermique »), tantôt associés à des sols hydromorphes minéraux (Réductisols), montrant localement des caractères vertiques (Gachon, 1963 ; Aubert et al., 1975 ; Bornand et al., 1984 ; Jamagne, 2011 ; AFES, 2009). Pour Bornand et al. (1984), les sols noirs de Limagne ont pour caractéristiques communes : une couleur sombre, une très forte proportion d'argile (environ 50 %), un taux de matière organique notable, parfois même en profondeur (environ 3 à 7 %), une capacité d'échange cationique élevée et largement saturée par le calcium, et enfin une présence constante de smectite, argile gonflante qui augmente progressivement dans les sols des zones les plus basses. Les Terres noires de Limagne constituent indubitablement un ensemble de sols « complexes », dont la chronologie du développement reste encore difficile à établir précisément.

C'est dans ce contexte de Limagne humide qu'ont été ponctuellement mises au jour les traces qui nous intéressent. Elles se présentent sous la forme de niveaux rougeâtres, parfois assez vifs et particulièrement distincts au sein de la stratigraphie locale (Vernet, 2013b). La première observation de ces traces a été faite par Louis Gachon (1963) dans le cadre de prospections pédologiques, qui mentionne sur deux localités autour du marais de Marmilhat (commune de Lempdes) des niveaux d'agrégats rouges cuits. Plusieurs opérations de diagnostic archéologique ont ensuite relevé des unités pédo-sédimentaire analogues, dans différents secteurs de la périphérie orientale de Clermont-Ferrand, dont les références sont présentées dans le Tableau 27. À ce jour, dix opérations préventives ont indiqué la présence de ces traces, pour un total d'au moins 48 coupes ou sondages distincts. Lors du diagnostic du tracé de l'autoroute A71, de nombreuses traces rubéfiées ont été documentées, permettant de renseigner avec précision leur contexte pédo-sédimentaire (Vernet et al., 2013). Sur la base de leurs

spécificités géomorphologiques, il a alors été proposé qu'elles s'inscrivent comme un niveau repère au sein des zones humides du bassin de Limagne, sous la mention de « Niveau Rouge » (NR).

Deux interprétations divergentes sur l'origine de ces traces ont été proposées. D'abord, L. Gachon a proposé qu'il s'agit de traces de brûlis d'une formation tourbeuse, très probablement d'origine anthropique (du fait de leur concomitance avec l'apparition de pollen de céréales, identifiées dans les prélèvements palynologiques d'un sondage à Marmilhat (Partie 6-3.5 p. 313). Plus récemment, Marie-Agnès Courty les a interprétées comme résultant d'une irradiation thermique naturelle produite lors d'un événement cosmique ou d'impacts de foudre, voire potentiellement d'événements radiatifs de très haute énergie, pour lesquels on ne disposerait pas d'équivalents actuels (comm. pers. M.-A. Courty, voir : Courty et Miallier, 2012 ; Vernet, 2013b ; Maza, 2022). C'est aujourd'hui l'interprétation qui est reprise par les archéologues à titre d'hypothèse. La possibilité d'une origine pédogénétique ne semble pas envisagée.

Tableau 27 : Compilations des opérations archéologiques renseignant des niveaux rougeâtres en Limagne.

Faits	Opérations	Communes	Sondages/Logs	Références
Niveau d'agrégats rouges cuits	Marmilhat et Lempdes	Lempdes	3106 et 2998	Gachon (1963)
Niveau Rouge	Station d'épuration - Voie des Petites Gravanches	Clermont-Ferrand	-	Thévenin et al. (1999)
Horizon rougeâtre rubéfié	A710	Malintrat	Profil 2	Ballut (2001)
Niveau de nodules rubéfiés rougeâtres	Chantemerle	Gerzat	Coupe 1	Vermeulen (2001)
Niveau Rouge	Le Clos Brûlé - ZAC du Parc industriel des Gravanches	Clermont-Ferrand	-	Pouenat (2006)
Niveau Rouge	Les Gravanches - Zone Coliposte	Clermont-Ferrand	-	Vernet (2010)
Niveau Rouge	Champ Saint-Lazard, Champ Charie	Ménétrol	S1 à S10, S12, S13, S22	(Vernet, 2011)
Niveau Rouge	A71	Clermont-Ferrand, Gerzat	A2, A3, A4, A7, B24, A9, A11, A12, A18, A22, A25, A35, A36, A37, A38, A43, A44	Vernet et al. (2013)
Horizon avec nodules d'argile rubéfiée	Rue Léon Maniez-Les Chapelles	Aulnat	SD1, SD2, SD3	Alfonso (2015)
Niveau Rouge	Rue Adrienne Bolland	Clermont-Ferrand	T4 et T5	Alfonso et al. (2019)
Niveau Rouge	Aéroport d'Aulnat-Gandaillat	Aulnat	C15, C16, C17, D3, D4, D5	Maza (2022)

3. Synthèse des observations générales et contexte archéologique et paléo-environnemental des Niveaux Rouges

L'opération archéologique de l'A71, qui traverse la zone méridionale des marais de Limagne (Le Grand Marais) selon un axe Nord-Sud de plusieurs kilomètres, a permis une description et un enregistrement précis de ces traces (Vernet et al., 2013). Nous présentons dans cette partie une synthèse de ces observations macroscopiques et du contexte chrono-stratigraphique de cette unité pédosédimentaire (abrégée NR). Sur la base de l'attribution chronologique de cette unité, une carte du contexte archéologique micro-régional a été dressée afin de discuter de sa relation avec les occupations humaines. Celle-ci est complétée par la relecture d'une ancienne étude palynologique réalisée sur une séquence présentant un de ces niveaux rougeâtres.

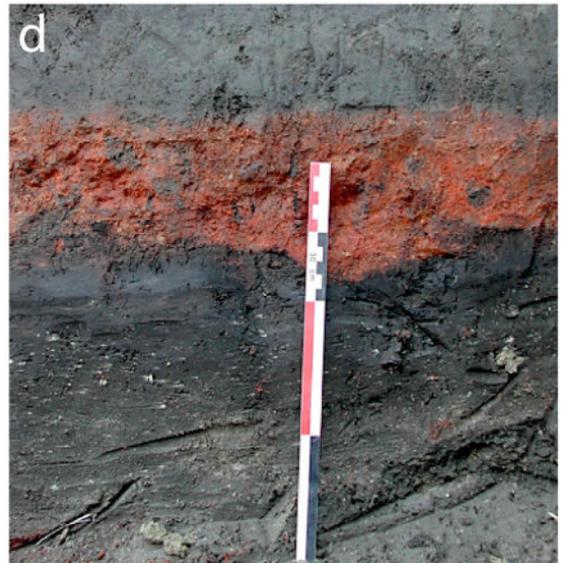
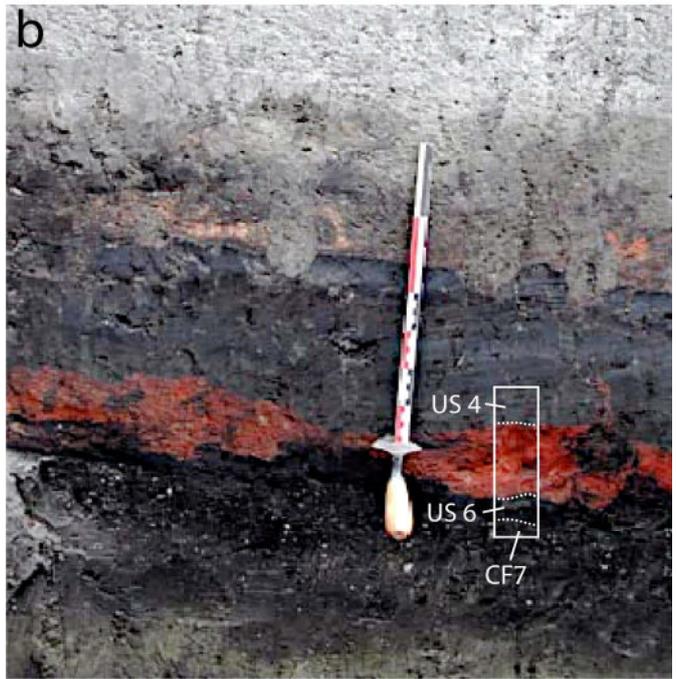
3.1. Principales caractéristiques

Les niveaux rouges sont des couches qui apparaissent relativement homogènes, de coloration le plus souvent rouge très vif, mais qui varient parfois vers les teintes orangées, rosées, et sont plus ou moins clairs. Ils sont décrits comme principalement formés de terre chauffée, de texture généralement à dominante silteuse. Dans la plaine, ils sont identifiés dans des sondages distants au maximum d'environ 11,5 km. Si l'on excepte une mention légèrement éloignée, en amont de la partie septentrionale du Grand Marais (site de Ménérol), elles se dispersent sur une emprise de 15 km², entre leurs occurrences les plus éloignées (voir Partie 6-3.4, p. 309). Les rares observations en plan montrent qu'ils se présentent sous la forme de concentrations informes aux limites assez diffuses (Figure 105.a). En coupe, ils apparaissent comme des couches tantôt homogènes et assez bien délimitées, de l'ordre d'une dizaine de centimètres d'épaisseur en moyenne, tantôt comme des traces discontinues, sous l'apparence de poches infra-décimétriques subhorizontales, généralement aussi circonscrites sur quelques dizaines de centimètres d'épaisseur (Figure 105 et Figure 106). Ainsi, ces NR ne sont pas systématiquement repérés au sein de sondages pourtant parfois très proches. Bien qu'à l'échelle des coupes stratigraphiques ils se manifestent généralement comme un niveau unique, ils sont quelquefois localement dédoublés, le niveau supérieur étant suspecté résulter de l'érosion postérieure d'un NR adjacent. Leur limite inférieure est généralement assez nette, et présente parfois un caractère « ravinant ou rabotant » (Vernet, 2013b)(Figure 105.b). Ce caractère morphologique pourrait indiquer, localement, l'existence d'une phase d'érosion mécanique (d'origine non définie) antérieure à leur formation. De plus, des traces liées à l'activité biologique (fouisseurs et racinaires) sont fréquemment observées grâce aux différences de coloration avec leurs couches encaissantes (Figure 105.c).

Page suivante

Figure 105 : Photographies en plan (a) et coupes (b, c, d, e) des niveaux rouges identifiés lors de l'opération préventive de l'A71 (crédits : Vernet et al., 2013 ; INRAP).

(a) Vue du sondage A19 (secteur 2A, partie Nord) avec le NR dégagé en plan se présentant sous forme de concentrations de « mottes » rubéfiées présentant de légères variations de couleur. (b) NR avec l'emplacement des deux lames étudiées. (c) NR qui repose directement sur les retombées volcaniques CF7 (lamine blanchâtre) et dont la partie supérieure est nettement affectée par l'activité biologique, on observe des cavités de petits vertébrés qui traversent le NR et le niveau sous-jacent. (d et e) Noter la transition plus progressive et aplanie du toit du NR.





US 1 - Colluvions limono-argileuses grasses portant la pédogenèse gressée à structure granulaire plus ou moins marquée.

US 3 - Alluvions sablo-gravilleuses à trappes plans et à granocissement globalement normal. Des concrètes US 3a, US 3b et US 3c sont présentes. Trou de Poterie.

Ensemble sédimentaire A caractérisé par une dynamique des corps d'eau. Localisation par rapport à la fosse asséchée et les débordements des cours d'eau sont réduits.

Ensemble sédimentaire B caractérisé par une dynamique des corps d'eau. Localisation par rapport à la fosse asséchée et les débordements des cours d'eau sont réduits.

US 4 - Colluvions argileuses noires présentant une structuration polygénique plus ou moins développée et des concrètes US 4a, US 4b, US 4c, US 4d, US 4e, US 4f, US 4g, US 4h, US 4i, US 4j, US 4k, US 4l, US 4m, US 4n, US 4o, US 4p, US 4q, US 4r, US 4s, US 4t, US 4u, US 4v, US 4w, US 4x, US 4y, US 4z.

US 5 (NR) - Niveau d'argiles noires plastiques (sol de marais) contenant souvent des fragments argileux de trachyte qui forment localement une lamie continue. Il s'agit d'un apport tephrique parfaitement identifié et dénommé CF7 ou Tephra de la Rodde. Le volcan émetteur de ce tephra est la cratère Kilian vers 8 500 ans BP (18 468 ± 147 cal BP : extrême fin du Boréal).

US 6 - Niveau d'argiles noires plastiques (sol de marais) contenant souvent des fragments argileux de trachyte qui forment localement une lamie continue. Il s'agit d'un apport tephrique parfaitement identifié et dénommé CF7 ou Tephra de la Rodde. Le volcan émetteur de ce tephra est la cratère Kilian vers 8 500 ans BP (18 468 ± 147 cal BP : extrême fin du Boréal).

US 7 - Limons sableux verdâtres à granocissement normal comportant des poches sablonneuses liées à gisements de sable. Les limons sont plus ou moins ternes (US 7a, US 7b, US 7c, US 7d, US 7e, US 7f, US 7g, US 7h, US 7i, US 7j, US 7k, US 7l, US 7m, US 7n, US 7o, US 7p, US 7q, US 7r, US 7s, US 7t, US 7u, US 7v, US 7w, US 7x, US 7y, US 7z).

Ensemble sédimentaire C caractérisé par une dynamique des corps d'eau. Localisation par rapport à la fosse asséchée et les débordements des cours d'eau sont réduits.

Ensemble sédimentaire D caractérisé par une dynamique des corps d'eau. Localisation par rapport à la fosse asséchée et les débordements des cours d'eau sont réduits.

3.2. Contexte pédo-sédimentaire d'apparition

La Figure 106 présente la compilation des coupes enregistrées lors des opérations archéologiques de l'A71 à Gravanches-Gerzat. Du point de vue stratigraphique, les NR sont soit directement précédés d'un niveau d'argiles noires plastiques correspondant à un sol de marais (US6) au sein duquel sont identifiés les apports téphriques les plus récents du Grand Marais (CF7, téphra issu du cratère Kilian), soit présents dans les premiers décimètres inférieurs d'un niveau de colluvions argileuses noires à grises (US4). Ce dernier correspond à la base des terres noires à proprement parler.

L'US4 et l'US6 forment un ensemble pédo-sédimentaire développé dans des conditions globalement assez humides, principalement liées à des battements saisonniers de la nappe phréatique (Ballut et al., 2007). L'US4 est principalement formée de colluvions fines issues des versants de la plaine de Limagne, auxquelles s'ajoutent des apports alluviaux (Ballut, 2001). De plus, l'US4 est largement pédoturbé, du fait d'une grande activité biologique (bioturbation), mais également par un brassage mécanique, engendré par l'alternance de phase d'assèchements et d'humidification, du fait que cette unité et celles supérieures sont parfois très riches en argiles à propriétés gonflantes et du brassage mécanique engendré par l'alternance de phase d'assèchements et d'humidification (Ballut, 2001 ; Bornand et al., 1984). D'autre part, les NR semblent plus massifs lorsqu'ils sont au contact direct de l'US6. Leur caractère plus irrégulier et discontinu dans l'US4 serait donc principalement lié à la forte pédoturbation qui la caractérise (voir la partie supérieure de la Figure 105.b). Cependant, il ne ressort aucune logique évidente, entre les différentes morphologies des couches rougeâtres et leurs profondeurs d'apparition, le long de ce transect (rappelons-le, perpendiculaire au sens général des écoulements). En outre, les variations altitudinales d'apparition de ces unités, suggèrent l'existence d'une paléo-topographie spatialement complexe, avec sans doute des zones plus ou moins fortement humides, fonctionnant au même moment. Ainsi, même si les NR sont la plupart du temps uniques à l'échelle d'un sondage, il n'est pas possible d'assurer que leur présence dans l'US4 soit seulement consécutive de l'érosion d'autres NR situés en position topographique plus haute. Sur la base de ces données, la contemporanéité de ces différents niveaux rouges reste donc incertaine.

Page précédente

Figure 106 : Compilation des coupes stratigraphiques réalisées lors de l'opération de l'A71 où un NR a été identifié, et descriptions synthétiques des unités pédo-sédimentaires (compilé et modifié d'après Vernet et al., 2013; INRAP).

3.3. Attribution chronologique

À ce jour, nous ne disposons que d'une seule datation absolue directe d'un de ces niveaux, ce qui s'explique, entre autres raisons, du fait que les charbons y sont assez rares. Il s'agit d'une datation radiocarbone réalisée sur des micro-charbons, sur un NR découvert sur le site de Chantemerle (commune de Gerzat). Le résultat radiométrique a donné l'intervalle de 5980-5710 cal. BC¹⁰³, ce qui correspond à la période de l'Atlantique ancien, soit très légèrement avant le plus ancien Néolithique. Par ailleurs, ajoutons qu'une datation thermoluminescence sur les sédiments rubéfiés a été réalisée, mais qu'elle n'a pu aboutir, ce qui s'expliquerait par leur cuisson insuffisante (comm. pers. Didier Miallier).

La Figure 107 présente les principaux marqueurs chrono-stratigraphiques de Limagne ainsi que les dates obtenues sur les occupations archéologiques de la zone d'étude autour de cette date. Il faut évidemment considérer que ces marqueurs n'illustrent qu'une partie des événements liés à l'activité volcanique qui a impacté cette région durant ces périodes, comme le montrent les récents travaux géo-archéologiques menés dans le bassin de Sarliève, zone humide adjacente au Grand Marais (Mayoral et al., 2021). Ces phénomènes comprennent notamment des retombées potentielles de (crypto-)téphras (vers 8500, 7500, 7400, 6300 cal. BP) et des séismes (vers 6800, 6600, 6050, 6100 cal. BP). De plus, selon cette étude, une période d'augmentation de l'activité volcanique est enregistrée entre 7500-7400 et 5800-5700 cal. BP. Si certaines des caractéristiques sédimentaires observées dans le bassin de la Limagne indiquent effectivement la manifestation de tremblements de terre au-dessus de couches rougeâtres (voir les déformations en Figure 105.e), d'autres possibles téphras plus récents n'ont pas encore été reconnus. Néanmoins, il faut également considérer que la situation du bassin de Sarliève, n'est pas tout à fait comparable au reste du Grand Marais, et il n'a semble-t-il pas connu les mêmes dynamiques d'évolution environnementales. En effet, le bassin de Sarliève possède une situation enclavée, ayant favorisé le développement d'un lac indépendant à plusieurs périodes au cours de l'Holocène (Gachon, 1963 ; Bréhéret et al., 2003 ; Fourmont, Macaire et Bréhéret, 2009 ; Mayoral et al., 2021). D'ailleurs, à notre connaissance, aucun niveau rouge ne semble avoir été documenté dans ce bassin. Ainsi, nous n'avons conservé ici que les événements qui nous ont paru principaux, et qui sont suffisamment bien calés chronologiquement.

En stratigraphie, les NR sont postérieurs et généralement bien distincts des derniers dépôts pyroclastiques distaux de Limagne (CF7), qui sont datés vers 8620-8320 cal. BP (Vernet et Raynal, 2008). Ces dépôts sont contemporains de deux sites d'occupations du Mésolithique, l'un au nord-ouest de la chaîne des Puys (Les Prés Longs) et l'autre dans la plaine de Limagne (Les Patureaux ; Saintot et al., 2001 ; Vernet et Raynal, 2008 ; voir Partie suivante) Les découvertes archéologiques sous CF7 ou les couches rougeâtres sont toujours attribuées au Mésolithique. Inversement, l'US4 a parfois livré des artefacts archéologiques de différentes périodes, mais qui correspondent toujours au Néolithique ancien ou à une époque plus récente. Dans le secteur sud de l'opération A71 (Brézet-Poncharaud), où aucune couche rougeâtre n'a cependant été observée, du matériel épars (faune, lithique, céramique), attribué au

¹⁰³ 7930-7660 cal. BP ; 6930 ± 60 BP ; ETH-31344.

Néolithique ancien a été trouvé à la base de l'US4. Ces éléments stratigraphiques semblent concorder avec la datation radiocarbone du NR de Chantemerle. Cependant, des artefacts datant des périodes historiques sont parfois enregistrés à très faible hauteur au-dessus des NR (Figure 106). Ceci pourrait suggérer que le taux d'accumulation sédimentaire des bas-fonds de la plaine est resté très faible au cours de l'Atlantique, suite aux dépôts CF7. Des études géoarchéologiques antérieures menées dans les marais ont estimé qu'au cours de l'Holocène moyen, les taux de sédimentation y étaient relativement faibles, entre 0,05 et 0,15 mm/an (entre environ 8000 BP et les unités stratigraphiques attribuées à l'âge du Fer), ce qui est alors expliqué par une stabilité relative des bassins versants en amont (Ballut, 2000). Toutefois, compte tenu de la considération que l'US4 et celles postérieures sont le siège d'une forte activité biologique, ces résultats méritent d'être considérés avec prudence.

Par ailleurs, deux autres datations radiocarbones ont été réalisées, sur des sédiments directement sous-jacents à des niveaux rouges. La première est une datation ancienne, qui de plus possède une marge d'incertitude très importante : 4950-3540 cal. BC¹⁰⁴. Elle a été réalisée sur un profil situé dans la partie sud des marais (à Marmilhat), sur une couche « d'anmoor » très humifiée et très mince (6 cm ; équivalente à l'US6) sur laquelle repose une épaisse couche composée d'agrégats rouges brûlés (20 cm). C'est sur ce même profil qu'a été réalisée une étude palynologique. L'observation de changements importants dans les principaux taxons ligneux de part et d'autre du NR, appuyée par cette datation au radiocarbone, semblent confirmer une mise en place au cours de la seconde partie de l'Atlantique. Récemment, une nouvelle opération préventive a été menée dans le même secteur (Maza, 2022). Elle a permis d'observer une stratigraphie tout à fait équivalente, avec une mince unité noirâtre sous-jacente à un épais niveau rougeâtre. La datation radiométrique sur sédiments de l'unité sous-jacente a donné comme résultat : 5360-5080 cal. BC¹⁰⁵, soit durant la première moitié de l'Atlantique. Il paraît raisonnable de rejeter la première date. Néanmoins, malgré que le contexte pédo-sédimentaire du secteur de Marmilhat soit tout à fait similaire à la chrono-séquence du secteur de l'A71 (dépôts de cendres trachytiques sous l'unité noirâtre), ces datations sont nettement plus récentes. Cela suggère que tous les niveaux rouges ne sont pas synchrones, et en considération de leurs caractéristiques morpho-stratigraphiques (discontinuité, profondeur d'apparition, etc.), qu'ils pourraient résulter de différents évènements.

D'autre part, la datation de l'unité qui repose sur le NR (toujours sur sédiments ; Maza, 2022), a donné comme intervalle de probabilité : 920-810 cal. BC¹⁰⁶, ce qui correspond à la transition entre le Subboréal et le Subatlantique. Ce résultat suggère fortement l'existence d'une phase d'érosion marquée, liée à la dégradation climatique qui intervient à cette période de transition. La question de la chronologie sédimentaire de l'Holocène moyen, postérieure aux derniers téphras, reste donc largement incertaine. Elle est d'autant plus complexe, que les différents secteurs du Grand Marais ne sont pas approvisionnés par les mêmes affluents ni ne possèdent les mêmes exutoires (Ballut et al., 2007).

¹⁰⁴ 6900-5580 cal. BP ; 5400 ± 300 BP ; Gachon, 1963.

¹⁰⁵ 7310-7030 cal. BP ; 6285 ± 40 BP ; Lyon-19263.

¹⁰⁶ 2870-2760 cal. BP ; 2725 ± 30 BP ; Lyon-19262.

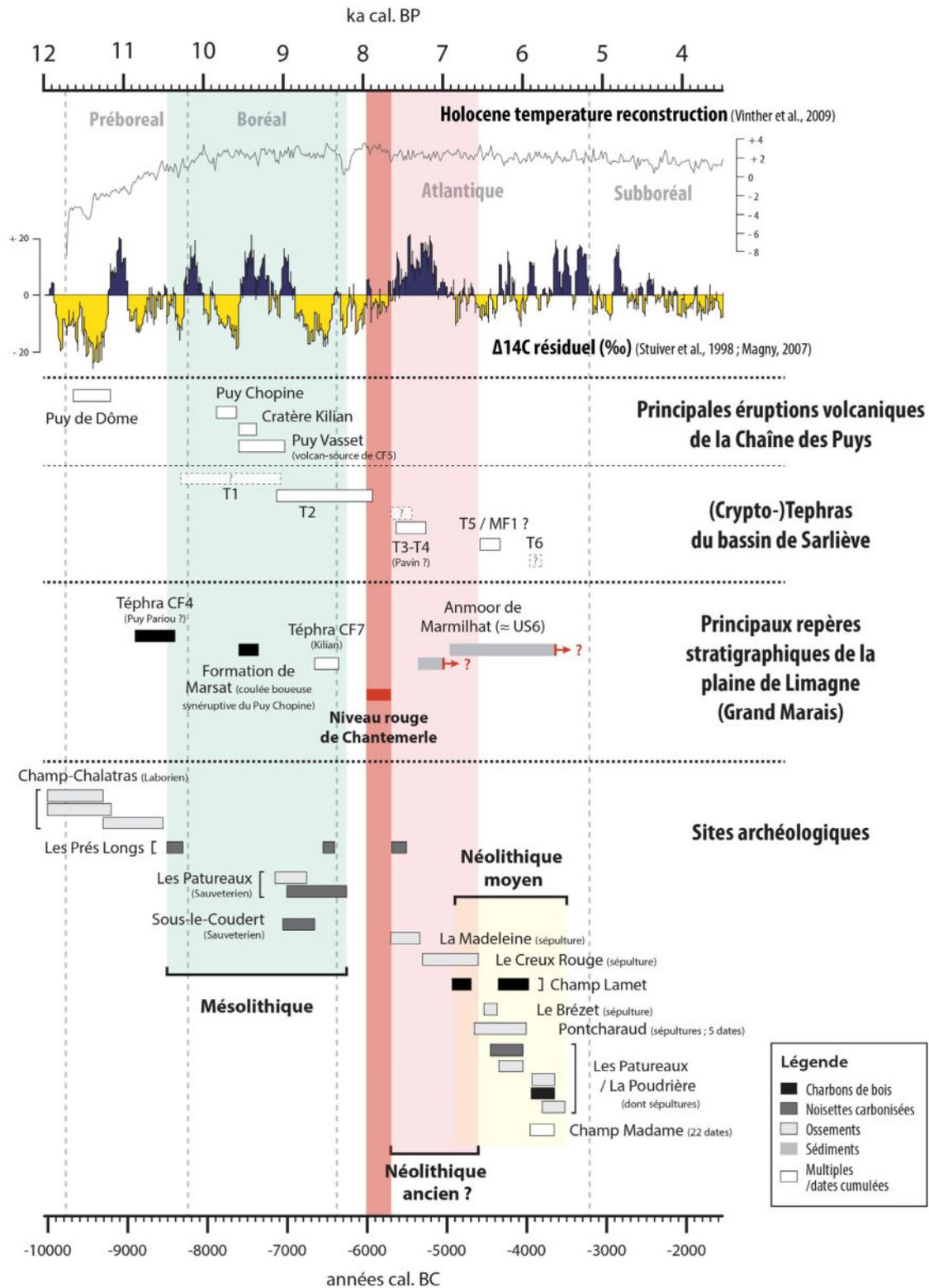


Figure 107 : Contextes chrono-stratigraphique et archéologique de la Limagne à l'Holocène ancien.

Avec : les datations des principaux repères stratigraphiques identifiés dans la plaine et éruptions de la Chaîne des Puys (Miallier et al., 2004, 2012 ; Vernet et al., 2013 ; Vernet et Raynal, 2008) et les datations obtenues sur les sites archéologiques de l'Épipaléolithique au Néolithique (voir Tableau 28 et Figure 108). Les intervalles des dates radiocarbones sont donnés à 95,4 % de probabilité. La courbe de reconstruction des températures correspond aux déviations par rapport aux températures actuelles du Groenland (°C) sur moyennes mobiles de 20 ans (Vinther et al., 2009). La courbe du radiocarbone résiduel atmosphérique, qui reflète les variations de l'activité solaire, les hausses indiquant un refroidissement du climat (d'après Stuiver et al., 1998, dans Magny, 2007).

Malgré que la chronologie du développement initial du complexe des Terres noires reste encore assez mal établie, on peut néanmoins en conclure (en attente de nouvelles datations indispensables) que les niveaux rouges se seraient principalement mis en place au cours de l'Atlantique (Néolithique ancien et/ou moyen). De plus, ils seraient subcontemporains des premières colluvions et de l'amorce de pédogenèse qui caractérisent l'US4. Localement, ils pourraient être liés à un changement de la dynamique hydro-sédimentaire locale, qui passe d'un milieu palustre à nappes d'eau quasi permanentes (marais au sens strict) à un milieu relativement plus sec et caractérisé par une humidité essentiellement liée à des variations saisonnières de la nappe phréatique. Enfin, il faut aussi dire que ces traces se placent à une période où l'activité volcanique a nettement diminué, mais se manifeste encore (Boivin et al., 2017). Ces manifestations sont, d'un point de vue géologique, clairement moins importantes dans la plaine de Limagne, mais cela ne signifie pas qu'elles n'ont pas eu d'impact, au moins à court ou moyen terme sur l'environnement et les occupations humaines.

3.4. Contexte archéologique et paléogéographique

La Figure 108 présente la cartographie des occurrences des niveaux rubéfiés et des occupations préhistoriques encadrant son attribution chronologique proposée (au plus tôt, au début du Néolithique), réalisée à partir d'une compilation des publications et de la littérature grise (Tableau 28). Les sites correspondent aux occupations archéologiques (domestiques et/ou funéraires) s'échelonnant entre la fin du Paléolithique (Azilien) et le Néolithique. Les faits isolés et les découvertes de mobiliers de surface obtenus en prospection, tous deux plutôt nombreux, n'ont néanmoins pas été retenus.

Le complexe K de la Carte géologique, formé des « *colluvions marneuses CRg auxquelles s'ajoutent en quantité variable des alluvions, voire des apports éoliens* », correspond approximativement aux anciens marais de la plaine, et partiellement à la localisation des Terres noires (Aubert et al., 1975). Ces dernières ont en effet également été reconnues lors de l'opération de l'A71, qui correspond sur la carte géologique à la zone des colluvions (CF) entre les cours du Bédât et de l'Artière. Il peut être considéré que K et CF correspondent aux secteurs les plus fortement humides, à l'Atlantique. L'extension des Terres noires aux alluvions subactuelles (Fz) et anciennes (Fy) n'est pas certaine, mais envisageable.

Tout d'abord, cette cartographie révèle l'existence d'une très nette bipartition entre les sites archéologiques de ces différentes périodes, et la localisation des anciennes zones humides, au sein desquelles sont identifiées les NR. Ces derniers sont tous identifiés dans la moitié méridionale des marais, à l'exception du site de Ménétrol. Ce dernier site est situé dans la petite vallée du ruisseau de Mirabel, également au sein d'une séquence caractéristique de dépôts palustres, mais assez complexe (voir Vernet, 2011). Étant donné que la partie sud du Grand Marais correspond à un secteur de plus fort développement urbain, donc à une activité archéologique bien plus importante que dans la partie nord, on ne peut pas se prononcer sur l'absence ou non de NR dans cet espace.

Bien que peu d'occupations paléolithiques soient documentées dans cette région, il existe indubitablement au moins une fréquentation de la zone au Paléolithique récent, dont il a été démontré qu'elle était en partie liée à une exploitation des populations d'aurochs (Fontana, 2003).

Plusieurs occupations du Néolithique ancien, datées sur la base de leur mobilier, sont recensées. Si l'on excepte la sépulture présente en bordure de l'Allier (site 30), il apparaît qu'elles sont spatialement, relativement circonscrites, en comparaison de celles du Néolithique moyen, et qu'elles sont de plus à proximité de la moitié sud des marais. Les sites du Néolithique ayant livré les dates absolues les plus anciennes, correspondent à deux sépultures isolées (Daugas, Gilbert et Raynal, 1983), situées de part et d'autre des marais : l'une à Pont-du-Château daté à 5720-5320 cal. BC¹⁰⁷ (site 30, La Madeleine) et l'autre à Clermont-Ferrand daté à 5300-4590 cal. BC¹⁰⁸ (site 9, Le Creux Rouge). Celles-ci sont de peu postérieures à la datation directe du NR. Bien que cette période soit encore assez mal documentée du fait de la nature même des indices de sites (relativement pauvres en matériel et structures, vestiges peu ou pas organisés), elles sont contemporaines des premiers indices palynologiques d'exploitation agropastorale, identifiées dans le bassin de Sarliève (Trément et al., 2007). Les assemblages céramiques de ce Néolithique ancien sont principalement reliés à la sphère culturelle méridionale (Cardial).

Le Néolithique moyen semble marquer un changement notable dans la dynamique d'occupation de la zone, puisque cette période montre un très grand nombre de sites, bien supérieur à ceux attribués au Néolithique ancien et récent/final. Ces sites occupent différentes positions au sein de la plaine, mais on note que plusieurs d'entre eux devaient possiblement jouxter les zones humides. Même dans la partie nord moins documentée, on retrouve des sites de cette période précisément à la limite du complexe K. Cela suppose une attractivité particulière de ces espaces, ce qui n'a rien d'une découverte, bien que les raisons exactes d'un tel phénomène restent largement hypothétiques. De plus, la période du Néolithique moyen est caractérisée par des sites d'habitats majeurs, qui témoignent des premières occupations durables du secteur par les sociétés agro-pastorales (Champ Madame, Les Quériaux, Champ Chalatras ; sites 1, 17 et 21 ; Saintot, 2012).

Toutefois, si les sites d'occupation des périodes retenues sont absents des zones de la plaine les plus marquées par l'humidité, ces dernières ne sont pas complètement exemptes d'indices archéologiques. Ainsi, deux opérations préventives ont permis d'identifier deux fosses isolées contenant des éléments de mobilier rattachés au Néolithique moyen (commune d'Aulnat ; Arnaud, 2003 ; Baucheron, Deberge et Pasty, 2016). Il n'est toutefois pas établi si ces vestiges traduisent une véritable occupation (hors limites de fouilles), une simple fréquentation ou seulement des apports remaniés de matériel. Au final, nous retiendrons que les niveaux rouges ne peuvent être reliés aux occupations archéologiques.

¹⁰⁷ 7670-7270 cal. BP ; 6590 ± 120 BP ; Ly-2677.

¹⁰⁸ 7250-6540 cal. BP ; 6010 ± 140 BP ; Ly-1944.

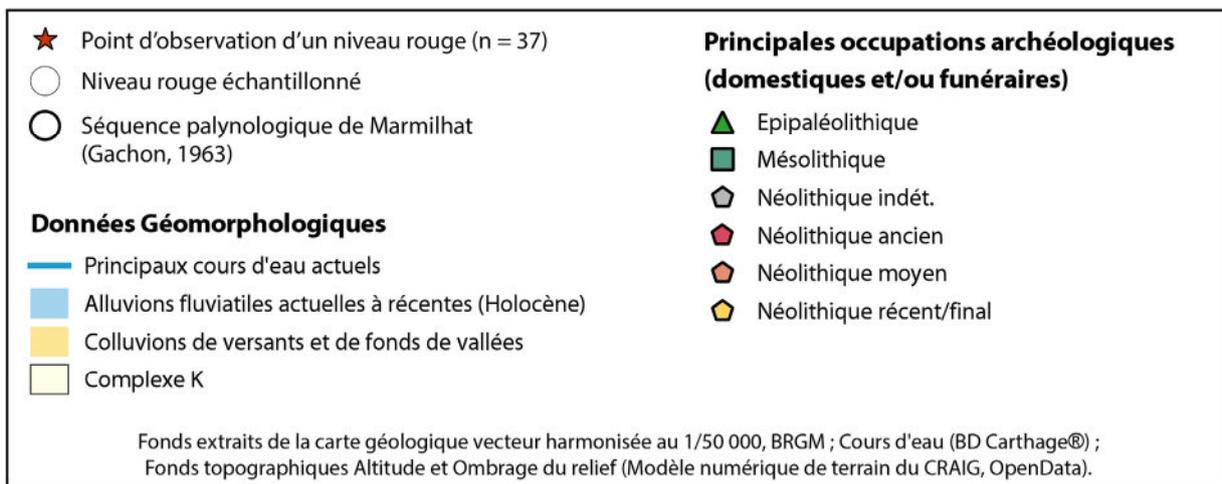
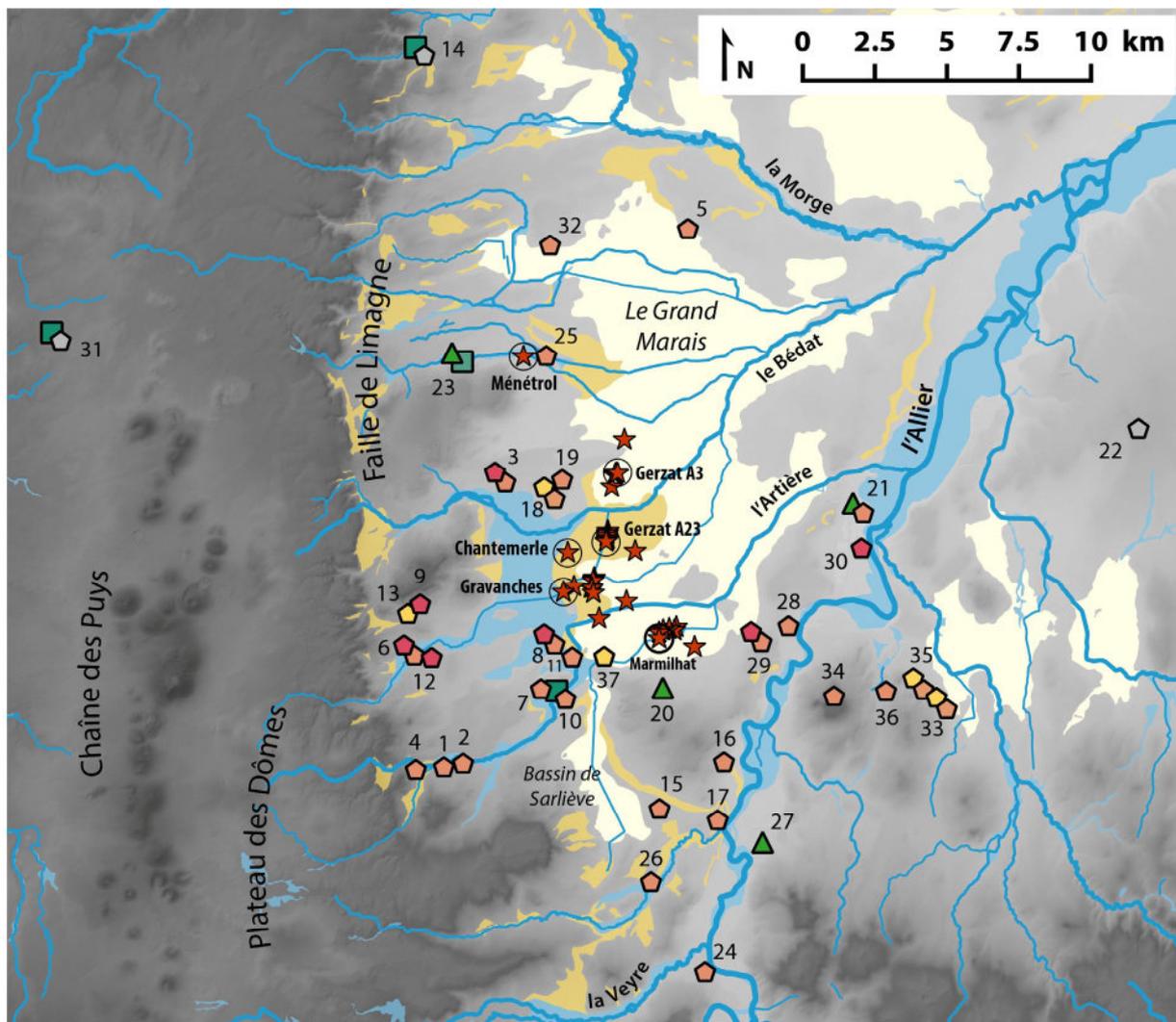


Figure 108 : Carte des occurrences des niveaux rouges de Limagne et des sites archéologiques préhistoriques de la plaine de Limagne.

Tableau 28 : Principaux sites épipaléolithiques et néolithiques référencés dans le secteur des NR.

Id	Site	Commune	Attribution chronologique	Référence
1	Champ Madame et Artière-Ronzière	Beaumont	Néolithique moyen (Chasséen)	(Alfonso, 2003)
2	Les Foisses et Le Colombier	Beaumont	Néolithique moyen (NMII)	(Loison, 1994)
3	ZAC des Trois Féés et Les Quartières	Cébazat	Néolithique ancien et moyen	(Vernet, 2012a)
4	Route du Mont Dore	Ceyrat	Néolithique moyen	(Houdusse et Vernet, 2017)
5	Chemin des Charreiras - Sous la Vialle	Clerlande	Néolithique moyen	(Carlier, 2013)
6	34 rue Descartes	Clermont-Ferrand	Néolithique ancien et moyen (NMII)	(Chuniaud, 2014)
7	44, 46, 48 avenue Gustave Flaubert	Clermont-Ferrand	Néolithique moyen (Chasséen récent)	(Carlier, 2017)
8	Le Brézet	Clermont-Ferrand	Néolithique ancien et moyen	(Vernet, 2005)
9	Le Creux Rouge	Clermont-Ferrand	Néolithique ancien	(Daugas et Malacher, 1978)
10	Les Patureaux	Clermont-Ferrand	Mésolithique moyen et Néolithique moyen (Chasséen et NMII)	(Saintot et al., 2001 ; Saintot et Pasty, 2004)
11	Pontcharaud	Clermont-Ferrand	Néolithique moyen	(Goude et al., 2013 ; Loison et al., 1991)
12	Rue des Quatre Passeports	Clermont-Ferrand	Néolithique ancien (Epicardial)	(Liegard et Fourvel, 1997)
13	Trémonteix	Clermont-Ferrand	Néolithique final	(Saintot et al., 2012)
14	Sous-le-Coudert	Combronde	Mésolithique (Sauveterrien) et Néolithique	(Murat et al., 2003)
15	Les Acilloux	Cournon-d'Auvergne	Néolithique moyen (Chasséen)	(Pelletier et al., 2006)
16	Les Fourmariaux et Chemin des Chemerets	Cournon-d'Auvergne	Néolithique moyen (NMI)	(Arnaud, Thomson et Vernet, 2014 ; Vernet, 2012b)
17	Les Quériaux	Cournon-d'Auvergne	Néolithique moyen (Chasséen)	(Muller-Pelletier et al., 2013)
18	Le Marterol	Gerzat	Néolithique moyen et récent (Chasséen récent)	(Pasty, 2009)
19	Parc logistique de Clermont-Auvergne	Gerzat	Néolithique moyen (NMII)	(Alfonso, 2002)
20	Les Gargailles	Lempdes	Épipaléolithique (Azilien récent)	(Pasty et al., 2015)
21	Champ Chalatras	Les Martres-d'Artière	Épipaléolithique (Azilien, Laborien) et Néolithique moyen	(Pasty et al., 2001, 2008)
22	Zone d'activités entre Dore et Allier	Lezoux	Néolithique	(Alfonso et Georjon, 2014)
23	Les Pradelles	Marsat	Épipaléolithique et Mésolithique	(Vernet et Raynal, 2008)
24	Rue du Lot et Soucheiroux	Martres-de-Veyre	Néolithique moyen (NMII)	(Alfonso, 2006, 2014 ; Müller-Pelletier, 2007)
25	Les Charmes	Ménétrol	Néolithique moyen	(Gaime, 2007)
26	Rue des Vergers	Orcet	Néolithique moyen	(Deberge et al., 2017)
27	Les Varennes	Pérignat-sur-Allier	Épipaléolithique (Azilien)	(Pasty et al., 2011)
28	Avenue de Cournon	Pont-du-Château	Néolithique moyen	(Parent, 2016)
29	Champ Lamet et Chambussières	Pont-du-Château	Néolithique ancien et moyen (fin du Néo. ancien voire tout début du NMI)	(Pelletier, 2007)
30	La Madeleine	Pont-du-Château	Néolithique ancien	(Daugas, Gilbert et Raynal, 1983)
31	Prés Longs	Pulvérières	Mésolithique (Sauveterrien) et Néolithique	(Vernet et Raynal, 2008)
32	Rue Ludwig von Beethoven	Riom	Néolithique moyen	(Vernet, 2013a)
33	Lotissement l'Egalité et RD 997	Vassel	Néolithique moyen et final	(Carlier, 2010 ; Deberge et al., 2013)
34	Grand Champ de Sainte-Marcelle	Vertaizon	Néolithique moyen (Chasséen récent/final)	(Georjon, Hénon et Pasty, 2012)
35	La Roussille	Vertaizon	Néolithique moyen (NMI) et final	(Saintot, Thomson, et al., 2016 ; Vernet, 2012c)
36	Les Noyeraies	Vertaizon	Néolithique moyen (Chasséen et Néolithique final ?)	(Arnaud, Georjon et Thomson, 2014)
37	161 avenue du Brézet	Clermont-Ferrand	Néolithique final	(Pasquier, 2023)

3.5. Quelques données palynologiques

L'analyse palynologique réalisée en bordure du marais de Marmilhat par L. Gachon (1963, p. 138-148), au-delà du problème de son calage chronologique absolu (une seule datation, et certainement trop récente) et de plusieurs biais méthodologiques liés à l'ancienneté de cette étude (totaux parfois faibles de pollens analysés, données indiquées en pourcentages de la somme des pollens d'arbres), reste malgré tout particulièrement pertinente pour préciser le contexte paléo-environnemental d'un de ces niveaux rouges (Figure 109). Cela d'autant plus que, dans ce secteur, il semble particulièrement difficile d'obtenir des séquences polliniques longues, continues, et surtout avec suffisamment de matériel sporo-pollinique, pour la période de l'Holocène qui nous intéresse (Fontana, 2003 ; Prat et Mennessier-Jouannet, 2003).

Antérieurement au NR et à la fine couche noirâtre qui la souligne, on observe un paysage de chênaie (*Quercus* sp.) accompagné de noisetier (*Corylus avellana* L.), de frêne (*Fraxinus* sp.), d'orme (*Ulmus* sp.) et où le pourcentage d'herbacées est plutôt faible. L'unité enregistrée en tant qu'anmoor est associée à l'apparition discrète de nouveaux taxons ligneux (hêtre, sapin, aulne, tilleul) et à la réapparition des Chénopodiacées. Dans le NR, on observe une augmentation de la proportion des plantes herbacées et la première apparition du plantain et du pollen de céréales (diamètre du grain > 45 µm). Les comptages polliniques dans le niveau rouge et la couche supérieure montrent une réduction progressive des espèces ligneuses précédemment dominantes (chêne, noisetier, orme) et le développement du hêtre, du sapin et, plus modestement, de l'aulne. Le NR coïncide donc avec des changements relativement marqués dans la végétation ligneuse dominante, qui reflètent probablement des évolutions d'ordre plutôt micro-régional, tandis que l'augmentation des Poacées indique l'existence d'un environnement ouvert local, et possiblement des activités agro-pastorales. Si la part relative des herbacés traduit l'existence d'un environnement local ouvert, celle-ci reste assez modeste à la base des terres noires. Ceci confirme vraisemblablement que le paysage périphérique des zones humides resterait relativement boisé à ces périodes (fin de l'Atlantique et Subboréal ?) comme l'indiquent les résultats géomorphologiques antérieurs (Ballut, 2001). Enfin, le NR rougeâtre présente une légère augmentation des pollens de type aquatique, tant par rapport à ces unités encaissantes sous- que sus-jacente (mais il n'est pas précisé à quels taxons ils se réfèrent).

Dans le cadre de l'opération préventive récente menée dans le même secteur que celui de l'étude de L. Gachon, à quelques centaines de mètres des tests palynologiques ont été réalisés (étude inédite par Élodie Faure, dans Maza, 2022), dont sur les deux unités qui encadrent un niveau rouge. Ce dernier n'ayant malheureusement livré aucun matériel sporo-pollinique. Dans l'unité palustre noirâtre sous-jacente au NR (unité C15.6 ; vraisemblablement équivalente à l'US6 de l'A71), les résultats obtenus par Élodie Faure (inédits) indiquent que : la somme des taxons forestiers s'élève à environ 39 %, avec le noisetier à 11,2 %, le chêne à 6,4 % accompagnés entre 1,5 et 5 % d'orme, frêne, hêtre, pin, sapin, bouleau et de genévrier. Les taxons herbacés sont quant à eux très largement dominés par les graminées, qui chiffrent à 43,5 % du total pollinique. La composition du spectre de taxons herbacés est décrite comme peu diversifiée. Les seules hygrophiles sont des cypéracées, dénombrées à 6,4 %. Enfin, des indicateurs d'anthropisation sont enregistrés : plantain lancéolé à 8 % et céréales à 3,2 % (diamètre des grains > 47 µm et pore > 11 µm).

Ajoutons que dans le secteur du Brézet (Figure 108 ; sites 8 et 37), qui jouxte la bordure sud-ouest du Grand Marais, des analyses palynologiques associées aux occupations du Néolithique moyen et récent indiqueraient également des taux de céréales élevés (voir Vivent, 2004, dans Saintot, Ballut, et al., 2016, p. 424).

Ces résultats mettent en évidence, le développement d'un milieu prairial dans cette zone humide, ce qui traduirait un assèchement relatif, en comparaison des unités antérieures (certainement le passage à un engorgement plus intermittent). Néanmoins, cela pose question quant à sa chronologie, puisque sa datation le situe à une période où le ^{14}C résiduel atmosphérique est élevé (Figure 107), ce qui indique des conditions climatiques globalement plus froides et certainement plus humides (Magny, 2007). Une fois de plus, nous manquons cruellement de précision chronologique dans l'enregistrement de ces formations pédo-sédimentaires. Nous retiendrons donc surtout que ces analyses révèlent la présence d'espaces cultivés à très faible distance du site, si ce n'est sur ces lieux mêmes. Rappelons que ce niveau inférieur au NR est daté du Néolithique ancien, à 5360-5080 cal. BC.

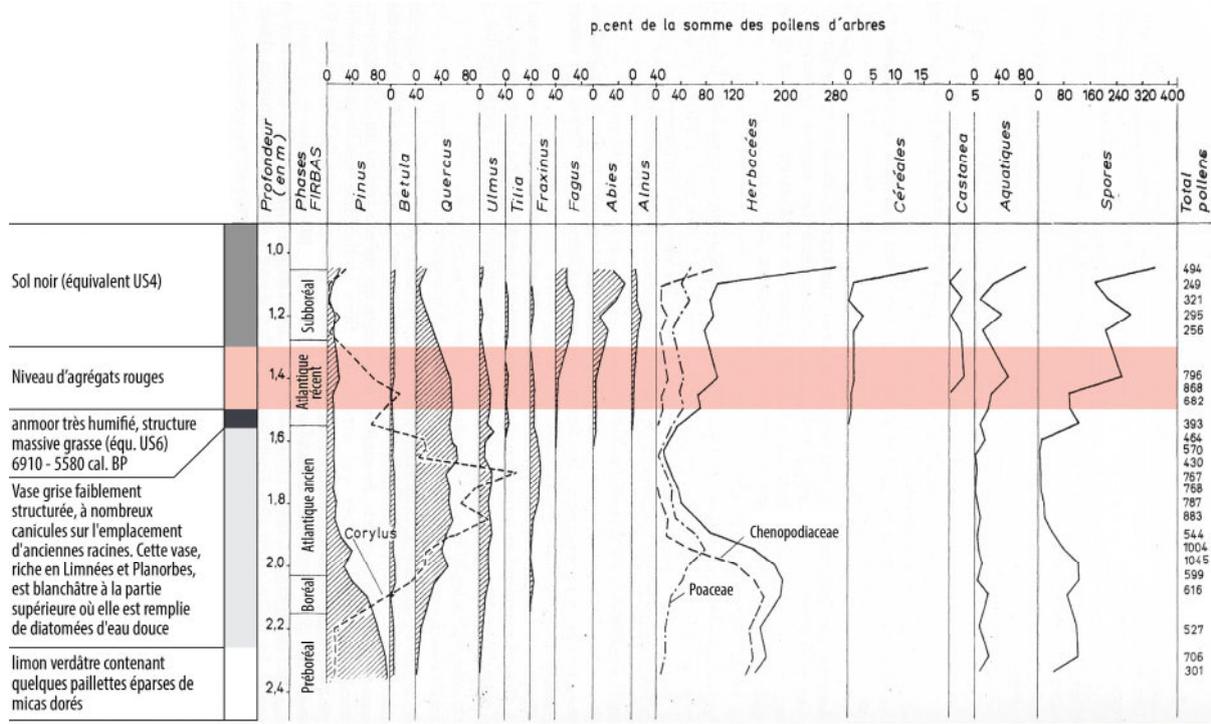


Figure 109 : Diagramme palynologique de Marmilhat, modifié d'après Gachon (1963).

3.6. Étude des diatomées d'un niveau rouge

Les lames minces d'un de ces niveaux rouges se sont montrées particulièrement riches en frustules de diatomées. Elles ont été analysées par Aude Beauger (étude inédite ; voir Vernet, 2013b). Comme ces diatomées sont pour la plupart bien incluses dans le fond matriciel du niveau rouge (Figure 110), elles documentent un contexte environnemental a priori antérieur, voire sub-contemporain à la formation du NR. Les conclusions de A. Beauger sont les suivantes : les espèces dominantes observées sont caractéristiques d'un milieu d'eau douce à légèrement saumâtre où l'eau est fortement oxygénée, peu enrichie en matières organiques fermentescibles et en nutriments ; l'épaisseur de la tranche d'eau doit être assez faible, car ces espèces sont subaériennes et aérophiles, pouvant supporter des assècs plus ou moins longs ; d'autres espèces, plus accessoires, sont aquatiques et subaériennes, révélant des changements de hauteur d'eau dans ce secteur. En outre, on remarquera que les squelettes siliceux de diatomées sont très résistants à la chauffe (Håkansson et Hulthén, 1986). D'autre part, leur décomposition peut entraîner la néoformation de minéraux argileux, et ceci à une vitesse très rapide (Badaut et al., 1979). Il serait donc pertinent de rechercher des traces de transformations des frustules, pour savoir s'y elles ont joué un rôle dans la pédogenèse locale.

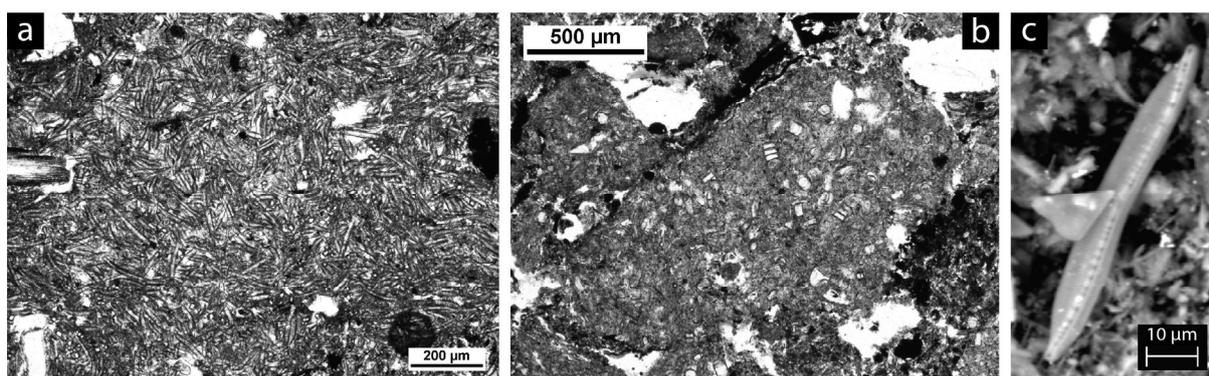


Figure 110 : Frustules de diatomées observées dans les niveaux rouges de Limagne (lame-mince et MEB).
(a) Accumulation très dense de squelettes de diatomées au sein du microfaciès désagrégé. (b) Frustules de diatomées particulièrement distinctes au sein d'un agrégat rubéfié. (c) Frustule de diatomée observée au MEB, non reconnue en lame-mince, qui possède une carène typique du Genre *Nitzschia*.

4. Résultats

Des prélèvements provenant de quatre niveaux rouges distincts, prélevés et mis à notre disposition par G. Vernet, ont été étudiés (Gerzat-A3 et A23, Gravanches-S13 et Ménérol-S11, emplacements en Figure 108, p. 311). Les analyses ont dû être adaptées au relativement faible volume de matériaux à notre disposition, et à l'absence de matériaux encaissants pour les comparer. Ainsi, une recherche minutieuse de matériaux encaissants mélangés au matériaux rubéfiés (heureusement aisément distinguable par leurs teintes) a été effectuée (à l'œil et sous binoculaire). Cette recherche s'est avérée fructueuse pour les échantillons Gravanches-S13 et pour Gerzat-A3, pour lesquels quelques analyses distinctes ont donc pu être menées.

4.1. Données pédologiques générales

Le Tableau 29 présente quelques données analytiques générales des échantillons étudiés (préparation terre fine). Les colorations se situent dans les gammes roses à rouges plus ou moins foncées. Sur cet aspect, les échantillons sont moyennement homogènes, car on observe fréquemment des micro-particules avec des couleurs plus différenciées, certaines de teinte jaunâtre (10 YR) et d'autres rouge marqué (10 R). Les échantillons sont peu organiques, mais en possèdent visiblement une certaine proportion. Il est étonnant que l'échantillon dont le taux de matières organiques est le plus faible soit celui qui montre une pédoturbation très fine avec des matériaux gris-noirâtre encaissants (Gerzat-A23). Les estimations des carbonates calci-magnésien montrent des valeurs très basses pour tous les échantillons. Ceux-ci sont décarbonatés, mais il faudrait vérifier la part d'influence des argiles minéralogiques sur ce résultat par une autre méthode de dosage (observation valable aussi pour l'estimation des MO). La susceptibilité magnétique (SM) a été mesurée douze fois par échantillon de terre fine pour limiter la variabilité intra-échantillon. Ménérol-S11 se distingue nettement, avec une susceptibilité moyenne relativement élevée quoique avec une variabilité intra-échantillon notable. Les valeurs hautes pourraient éventuellement être diagnostiques d'une chauffe, mais l'absence d'échantillon de comparaison ne permet pas de s'en assurer (Brodard, 2013 ; Marmet, Aubry et Best, 2002). Les autres échantillons ont des valeurs très basses, ce qui ne va pas dans le sens de l'hypothèse thermique, mais ne constitue pas un argument définitif.

Tableau 29 : Données pédologiques des échantillons de terre fine rubéfiés (< 2 mm)

	Couleurs Munsell dominantes (matériaux secs)	MO (%)	Ca/MgCO ₃ (%)	Susceptibilité magnétique (x 10 ⁻⁵)		
				min.	max.	moy.
Gerzat-A3	5 YR 7/2 (pinkish gray) ou 7/3 (pink) à 2.5 YR 6/2 (pale red)	4,0	1,3	0,5	8,2	3,7
Gerzat-A23	5 YR 7/4 (pink) ou 7/6 (reddish yellow)	2,7	1,8	0,5	3,2	1,3
Gravanches-S13	7.5 YR 6/2 (pale red)	4,7	1,9	0,9	6,7	3,2
Ménérol-S11	2.5 YR 6/4 (light reddish brown) à 6/6 (light red)	5,2	2,6	27,6	77,2	59,3

4.2. Micromorphologie et analyses microscopiques

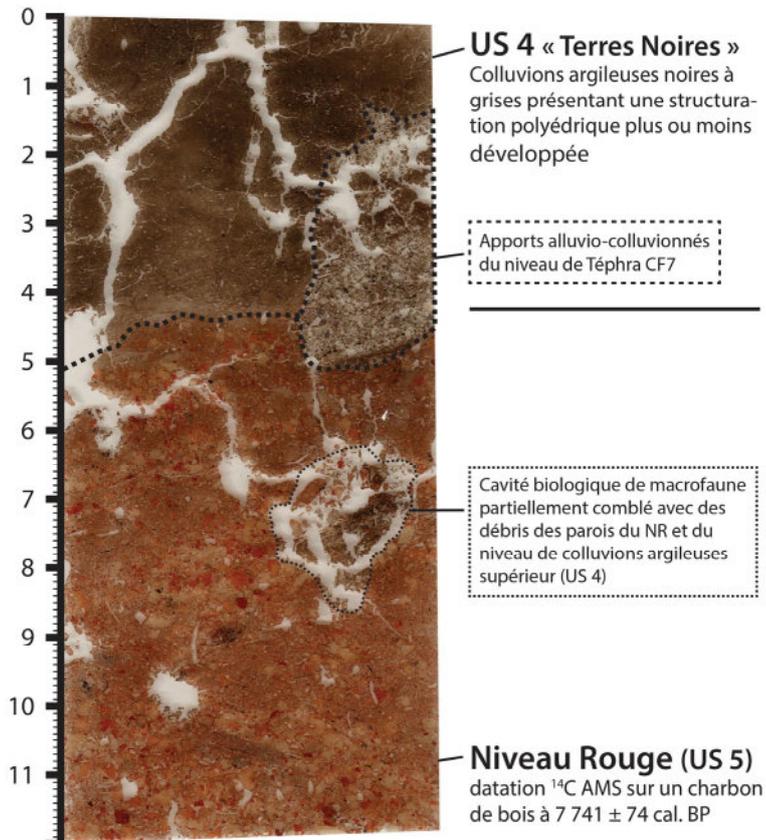
Dans l'objectif de préciser la nature et les modalités de formation de cette unité pédo-sédimentaire, une caractérisation micromorphologique a été réalisée sur deux prélèvements en blocs orientés, centrés sur ce niveau (Figure 105.b ; site de l'A71, Gravanches/Gerzat). Celle-ci est complétée par l'observation de deux autres lames minces, sur lesquelles la morphologie de cette couche est moins bien préservée (opération de l'A710). De ce fait, elles ne sont pas décrites en détail, car elles nous ont surtout permis de rechercher des éléments diagnostics ou discriminants vis-à-vis des deux lames de référence. Les prélèvements en blocs orientés ont été réalisés par G. Vernet. La Figure 111 présente les scans de ces lames-minces.

4.2.1. Les unités pédo-sédimentaires encaissantes

L'US6, sous-jacente au NR, est un niveau d'argiles plastiques noires à grises qui présente une morphologie lenticulaire inframillimétrique de matériaux fins déposés en milieu humide (aspect de type boues décantées ; Figure 112). La moitié supérieure de ce niveau est cependant relativement plus homogénéisée et présente un grand nombre de cavités liées à l'activité biologique. Il s'agit essentiellement de cavités infra-millimétriques et quelques-unes millimétriques, régulières ou mamelonnées, dont nombre d'entre elles sont interconnectées et vésiculées. Elles caractérisent peut-être la proximité d'une surface végétalisée, au contraire des dépôts de la moitié inférieure. On observe sur toute l'épaisseur de l'US6 des squelettes de diatomées, parfois très abondants. Des micro-litages de matière organique fortement mélanisée et plus ou moins amorphe ou fibreuse sont aussi très visibles. Certains de ces résidus présentent des structures anatomiques encore visibles, bien que souvent compressées, qui évoquent fortement celles de monocotylédones. Du moins nous ne reconnaissons pas de fragment ayant une anatomie ligneuse. Ces résidus fortement mélanisés montrent plusieurs caractéristiques qui indiquent qu'ils ne sont pas carbonisés : leur anatomie cellulaire est déformée, les tissus des parois cellulaires ont des teintes brunâtres en lumière naturelle et on n'observe pas de lustre en lumière croisée (Doutrelepon et al., 2012 ; Ismail-Meyer, 2017). De plus, on note l'existence de concentrations de phytolithes siliceux désagrégés, de morphologies diverses, mais dont un grand nombre sont de type cellules courtes (en particulier de morphotypes bilobés et trapézoïdaux) qui caractérisent généralement les végétaux graminéens (ICPT, 2019 ; Piperno, 2006).

On observe également au sein de plusieurs cavités biologiques, dont des fantômes de restes végétaux, des amas de framboïdes de pyrite (Mees et Stoops, 2018 ; Liu et al., 2019 ; Rickard, 2019 ; Marchand, 1974). Ces microcristaux, sont présents dans des cavités biologiques qui sont vraisemblablement isolées, ils se seraient donc formés *in situ*, postérieurement, mais dans un laps de temps que l'on ne peut assurer. Certains auteurs indiquent néanmoins que leur formation peut se faire à une échelle annuelle, et qu'elle est reliée à des dépôts où les eaux oxygénées peuvent pénétrer (ibid.). Ils confirment l'existence de conditions anoxiques par une saturation en eau, possiblement légèrement saumâtre. Enfin, on note la présence de quelques rares résidus ou agrégats rubéfiés inframillimétriques, dans le premier centimètre au sommet de l'US6. Mais globalement, la transition avec le NR apparait de manière relativement nette et peu perturbée.

Lames-minces du Niveau Rouge de Gravanches/Gerzat



A710 1226-1



A710 1096-2

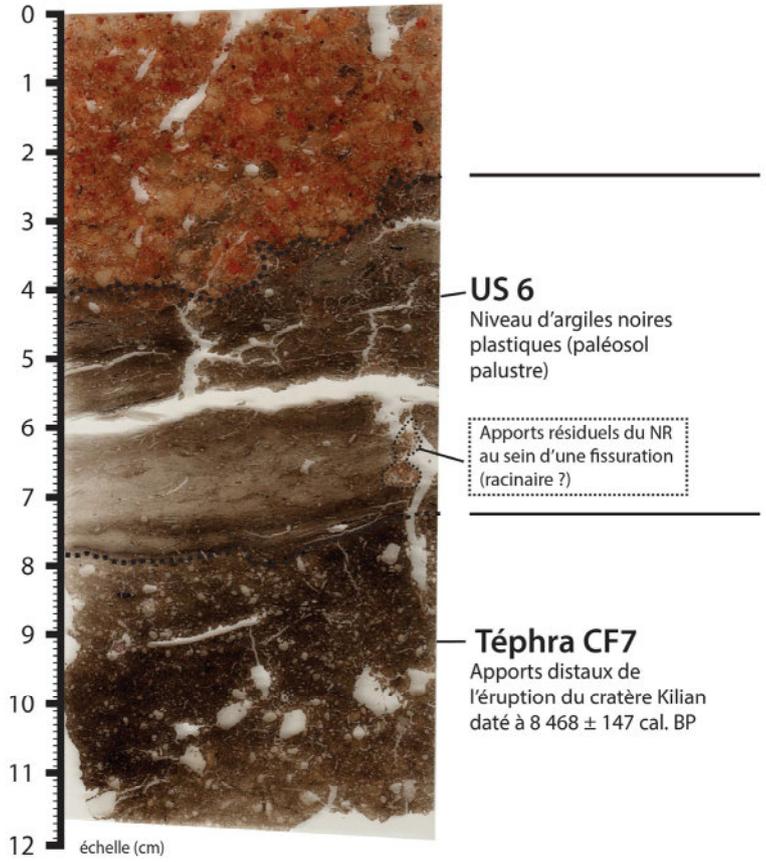
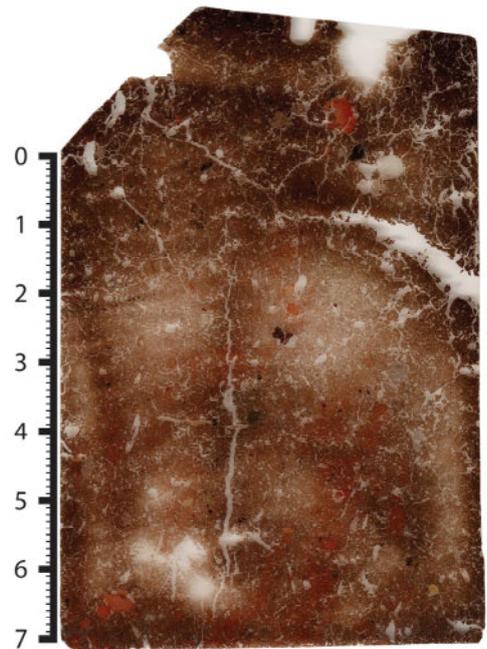


Figure 111 : Scans des lames minces des niveaux rouges de Limagne

Le NR est recouvert par l'US4, qui correspond à des colluvions argileuses de teintes gris-noir à tendance brunâtre. Il présente un faciès assez massif et très homogène, mais il est ponctué d'un grand nombre de cavités et de vides principalement subsphériques et inframillimétriques, qui traduisent une activité biologique marquée. Dans la partie supérieure de la lame-mince, on observe une plus grande proportion de vides d'entassements, intra-agrégats, qui semblent aussi caractériser un certain degré de brassage de l'unité. On retrouve de nombreux restes de diatomées et des résidus phytolithaires, mais la charge minérale est nettement plus importante et de texture argilo-limoneuse très fine. Toutefois, le premier centimètre inférieur qui recouvre le niveau rouge montre une morphologie de type dépôt de décantation tout à fait comparable à celle observée dans l'US6. Cela indique que le recouvrement du NR se fait alors que le milieu est saturé en eau. De plus, la présence sus-jacente de résidus associés au Téphra CF7 témoigne également de déstabilisations locales et sub-contemporaines de la couverture pédo-sédimentaire (voir Figure 111).

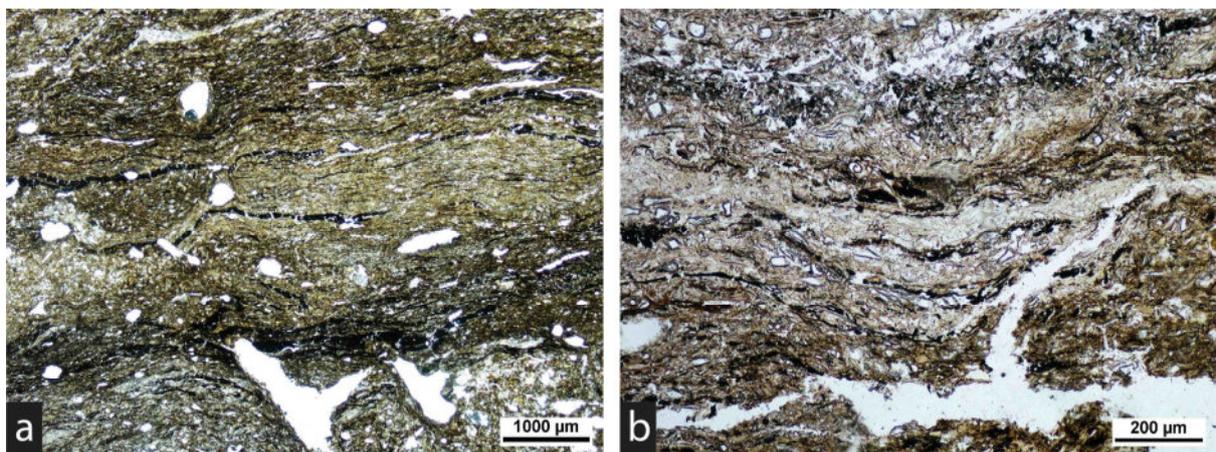


Figure 112 : Photographies de l'US 6 (PPL) montrant notamment des micro-lamines de résidus de végétaux fortement mélanisés et de nombreux restes phytolithaires parfois très concentrés (sommets de b).

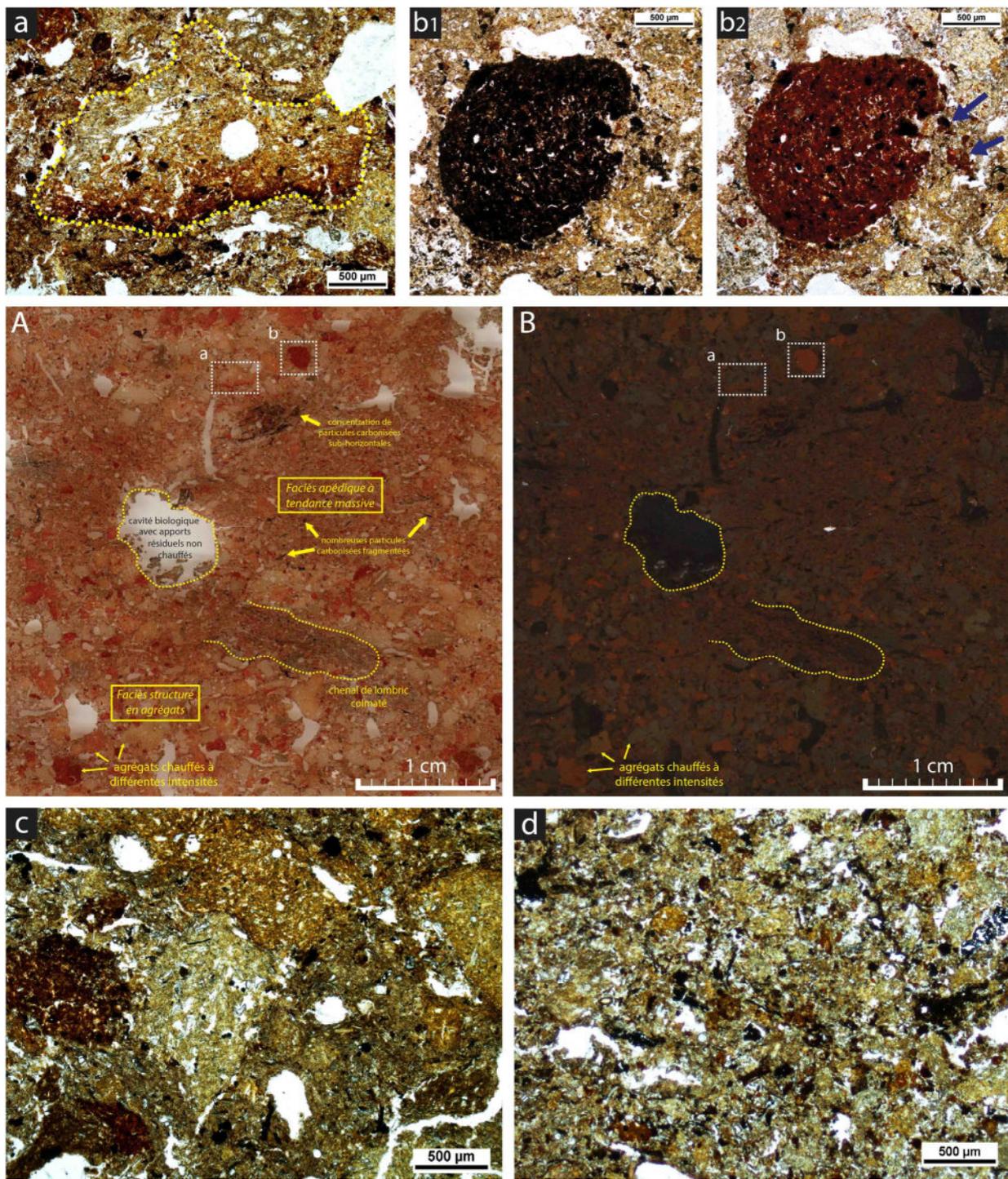


Figure 113 : Principales caractéristiques structurales du NR à l'échelle méso- et microscopique.

(A) Détail de la lame-mince supérieure scannée en PPL.

(B) Idem vu en « dark field » (Goldberg et Aldeias, 2018). Le contraste de coloration entre les différents agrégats traduit vraisemblablement différentes intensités de chauffe à l'origine de transformations minéralogiques plus ou moins poussées des oxydes de fer.

(a) Agrégat montrant une coloration graduée du brun au rouge vif.

(b) Agrégat rouge foncé bien intégré dans la masse sédimentaire, mais nettement distinct et arrondi (roulé ?) et montrant un détachement de particules suivant les microfissurations internes, vues en PPL (b1) et XPL (b2).

(c) Microfaciès à structure nette, aux agrégats bien distincts.

(d) Microfaciès non agrégé à tendance plus ou moins massive formé d'un mélange désorganisé de particules organo-minérales qui traduit une forte bioturbation.

4.2.2. Le Niveau Rouge

4.2.2.1. Principales caractéristiques morphologiques

Le niveau rouge qui semble macroscopiquement relativement homogène en termes de texture, de structure et de couleur, apparaît nettement plus hétérogène en microscopie. Il est formé d'une matrice argileuse comprenant de nombreux frustules de diatomées (quelquefois extrêmement concentrées ; Figure 110). Quelques minéraux sont aussi observables, qui sont des grains de quartz, feldspaths et micas (environ < 5 % de la surface). Ces deux derniers sont tout à fait communs dans les roches trachytiques, desquelles vraisemblablement ils dérivent. Le quartz serait plutôt lié à des apports détritiques, mais la possibilité de quartz authigénique n'est pas exclue (Aubert et al., 1975 ; Fourmont, Macaire et Bréhéret, 2009). De plus, on relève la présence, quoique rare, de fragments infra-millimétriques de pyroclastes, qui pour certains correspondent clairement à des fragments de trachyte de CF7 (Vernet et Raynal, 2008), mais d'autres types que nous ne savons attribuer sont aussi identifiés (pyroclastes vitreux translucides ou jaunâtres, et vésiculés : ponces ? Vernet, 2013b ; Mayoral et al., 2021). Ces divers fragments pourraient s'expliquer par des colluvionnements postérieurs d'anciennes coulées pyroclastiques, au même titre que les résidus de CF7 visibles en position supérieure du NR l'attestent (Figure 111). Ils traduisent sinon, l'existence d'autres téphras postérieurs (ibid.). On observe encore ponctuellement quelques amas de pyrites framboïdes.

Le NR présente deux principaux types de microfaciès (Figure 113.c-d). Le premier correspond à des zones avec une nette structuration en agrégats, distincts par leurs différentes colorations et/ou les vides inter-agrégats. Le second présente une structure non agrégée (voire une pseudo-structure micro-agrégée ; Mathieu et Lozet, 2011) à tendance plutôt massive, formée de particules (micro-agrégats) de la fraction granulométrique des silts et des sables fins. À l'échelle mésoscopique (Figure 113.A-B), ce faciès massif montre une coloration plutôt homogène (brun foncé à orangé). Ce microfaciès forme localement une matrice interstitielle autour d'agrégats bien individualisés. Les deux types de faciès sont parfois bien distincts, mais on les observe aussi entremêlés avec un ratio variable, et sans répartition organisée, à l'échelle de la surface étudiée. Leur composition est assez similaire, hormis le fait que c'est majoritairement dans cette matrice peu agrégée ou interstitielle que l'on relève la présence de résidus de matières organiques carbonisées et des autres traits pédologiques décrits ci-après. La similarité des fabriques pédo-sédimentaires de ces deux microfaciès et l'observation d'agrégats bien individualisés en cours d'altération confirment donc qu'ils possèdent une origine commune, et que leur distinction morphologique est, pour l'essentiel, liée à un degré de désagrégation et une homogénéisation variable.

Bien que la proportion d'agrégats de teinte nettement rouge (rouge sang) soit légèrement plus importante dans les cinq premiers centimètres de la base du NR, ce qui lui confère un aspect général plus foncé, on n'observe pas d'organisation particulière, de stratification, ou d'orientation préférentielle dans leur disposition (de même que le reste des constituants). Toutefois, certains agencements entre les deux types de microfaciès semblent correspondre à des reliquats de chenaux (mésafaune), comblés (Figure 113.A-B). D'ailleurs, on observe plusieurs types d'indices qui témoignent d'une importante pédoturbation au sein du NR : (1) des contacts abrupts et angulaires entre des agrégats de coloration bien distincte (Figure 113.c) ; (2) de nombreux pores plus ou moins réguliers à mamelonnés ainsi que des chenaux horizontaux à verticaux, de dimensions millimétriques, d'origine biologique, et au sein

desquels ont été observées de rares déjections d'acariens ; (3) des cavités d'animaux fousseurs (lombrics ou autres) avec présence ponctuelle de matériel non rubéfié provenant du niveau supérieur (Figure 111).

Les agrégats qui sont bien individualisés, notamment par leurs différentes colorations, ont une structure grenue à polyédrique sub-anguleuse (voire parfois anguleuse) et sont de dimensions majoritairement inférieures à 2 mm. Les plus gros agrégats rubéfiés observés atteignent les 4 mm de diamètre. Les agrégats présentent des colorations variant du brun clair au rouge très foncé, et passant par des teintes légèrement orangées, voire rosées. Selon l'hypothèse thermique, ce caractère indiquerait que les éléments ont subi des chauffés d'intensités et/ou de durées variables. Cependant, pris individuellement, les agrégats sont assez souvent d'une couleur homogène. Ceux nettement rouges, a priori du fait de la formation d'hématite (couleur rouge vif) voire de maghémite (rouge-brun) occupent environ 10 à 20 % de la surface totale. Sur les lames minces de l'A710, où les deux NR sont nettement plus déstructurés par l'activité biologique, les colorations observées sont plus restreintes, surtout très rougeâtres, même si on distingue des variations remarquables de clarté (Figure 111). Ceci vaut tant pour les quelques agrégats très nettement distincts, que pour le fond matriciel plus ou moins diffus (faciès désagrégé). Les agrégats et traces de teintes brun-rosé-orangé y sont très rares. Toujours suivant l'hypothèse thermique, on peut supposer que cela soit lié à une désintégration ou une altération différentielle de ces résidus, relative aux différences d'intensités de chauffe auxquelles ils auraient été soumis. De telle manière que, les plus rouges, a priori chauffés plus longuement ou plus fortement, auraient mieux résisté aux altérations biologiques et physico-chimiques post-dépositionnelles.

4.2.2.2. Les résidus de végétaux brûlés

Dans le microfaciès non agrégé du NR, on observe de nombreuses particules opaques, parfois concentrées sur de petites surfaces de quelques millimètres (Figure 113.A), qui correspondent à des résidus carbonisés de végétaux ou de matières organiques indéterminées. Ces résidus carbonisés sont absents ou très rares au sein du microfaciès structuré en agrégats. D'autre part, nous n'avons pas identifié d'éléments carbonisés pouvant correspondre de manière certaine à des charbons de bois de par leurs caractéristiques cellulaires. En effet, les seuls fragments qui pourraient montrer une anatomie de tissus ligneux sont de dimensions trop réduites pour être caractérisés. Ceux dont une partie de l'anatomie cellulaire est visible en coupe transversale, et qui possèdent des cellules larges (vraisemblablement des vaisseaux) ont des diamètres relativement petits (< 25 µm environ). Ceci tend à penser qu'ils appartiendraient plutôt à des végétaux non ligneux, voire éventuellement des essences arbustives (Schweingruber, 2007 ; Wheeler, Baas et Rodgers, 2007). Si une majorité d'éléments opaques carbonisés ne sont pas identifiables, la présence récurrente d'éléments à la morphologie allongée, fibreuse ou avec des tissus végétaux spécifiques (Figure 114.a), permet de les caractériser comme des résidus de monocotylédones (tiges) ou provenant d'organes non ligneux (dont possiblement de rares feuilles ; Babel, 1975). On observe aussi localement des éléments carbonisés dont la morphologie spiralée (Figure 114.b) rappelle ceux qui sont interprétés comme glumes (ou autres résidus) de céréales ou de graminées (Nicosia et Canti, 2017).

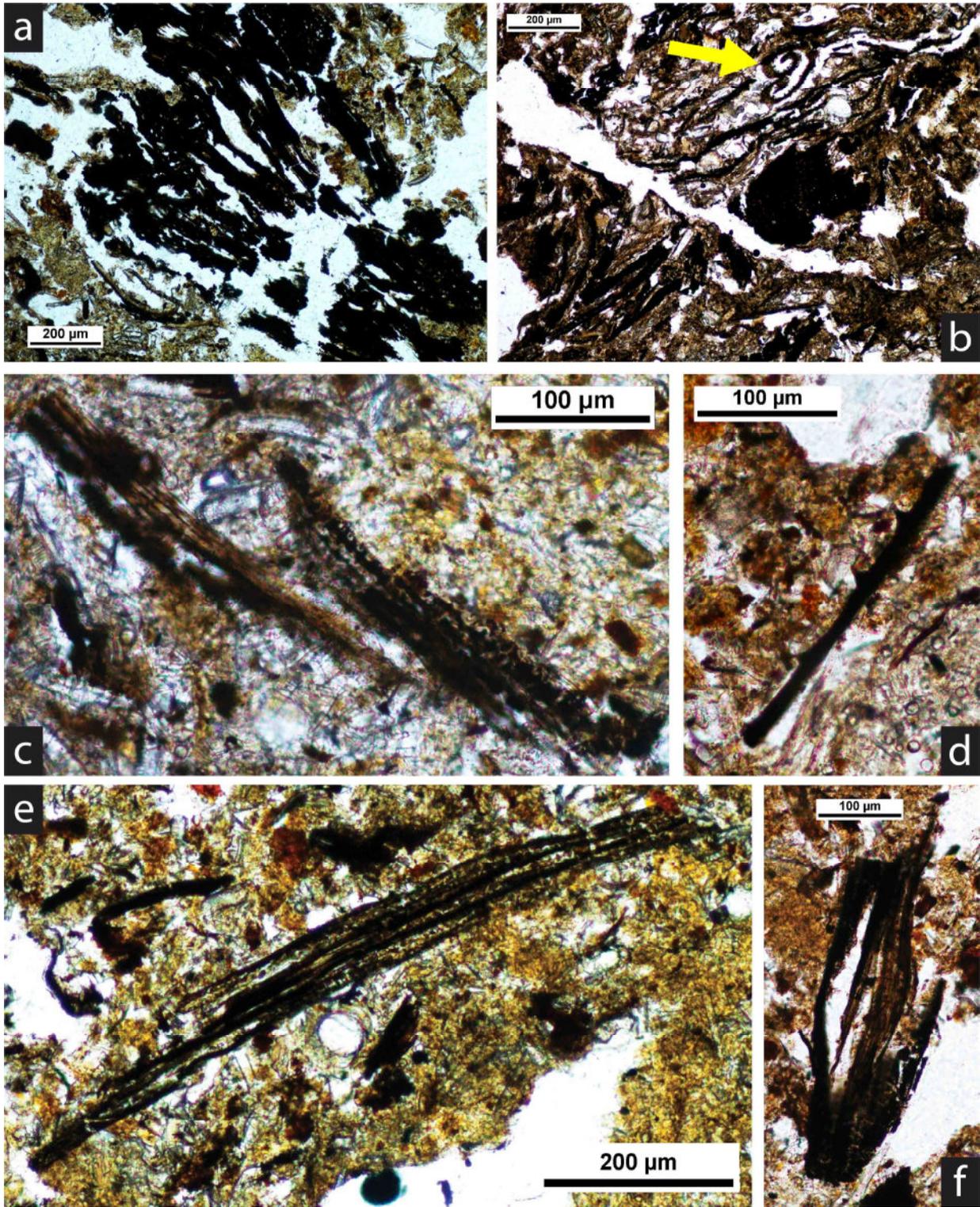


Figure 114 : Divers résidus végétaux carbonisés et phytolithaires du niveau rouge.

- (a) Restes végétaux carbonisés fibreux fragmentés en place (PPL).
- (b) Accumulation de résidus carbonisés selon un plan subparallèle (PPL).
- (c), (e) et (f) Squelettes siliceux carbonisés de graminées (PPL) ?

Sont également rencontrés, des corps siliceux phytolithaires dont un bon nombre sont plus ou moins noircis, mais souvent très opaques, du fait de leur combustion (Vrydaghs, Devos et Petó, 2017), et quelques-uns présentent une morphologie articulée (Figure 114.c et e). On relève aussi dans le fond matriciel du NR de nombreux phytolithes isolés, sans traces apparentes de carbonisation, comme c'est le cas dans l'US 6 sous-jacente. D'exceptionnels cristaux d'oxalate de calcium, associés à certains amas de résidus phytolithaires, ont aussi été observés. Enfin, un petit nombre de particules infra-millimétriques, qui sont possiblement des amas cendreaux cimentés (non recristallisés), certains associés à des concentrations ferro-manganiques, sont visibles, notamment à la base du NR. Ce type d'éléments implique des conditions de préservation nettement humides, mais est notable au vu de la rareté générale des éléments de carbonate de calcium (Mallol, Mentzer et Miller, 2017). Leur origine reste en l'état incertaine. Outre ces derniers éléments, l'abondance des résidus microscopiques carbonisés appuie très fermement l'hypothèse pyrogénique.

4.2.2.3. Autres traits microscopiques

Des revêtements argileux plus ou moins limpides ou poussiéreux sont présents sur les parois de plusieurs cavités biologiques. Quelques-uns de ces revêtements montrent une micro-stratification de dépôts possédant des caractères morphologiques bien distincts, ce qui suppose une formation sous l'influence de conditions pédologiques et environnementales variables dans le temps (Figure 115.a et b). Parmi ces séquences, on observe de façon récurrente des revêtements de faciès jaunes argileux limpides, très fins et bien orientés, recouverts avec une limite relativement franche, d'autres revêtements plus fortement poussiéreux constitués d'une matrice plus silteuse et mouchetée de particules organiques opaques (possiblement carbonisées). Si les premiers peuvent correspondre à des processus naturels d'illuviation, résultant de conditions hydrologiques où les écoulements sont de faible énergie, les seconds sont plus certainement le résultat de perturbations environnementales locales, dont la cause pourrait être anthropique (Deák et al., 2017 ; Kühn et al., 2018). En effet, les revêtements poussiéreux sont souvent associés à des pratiques culturelles. On ajoutera que quelques-uns des revêtements limpides, mono ou pluri-laminés, semblent tronqués ou remixés au sein du NR. Il est envisageable que ces indices correspondent à des changements d'usages des sols, ou à des activités humaines intervenant dans un milieu auparavant peu marqué par l'anthropisation. Leur chronologie vis-à-vis de la formation du NR reste à ce stade, incertaine.

Un trait micromorphologique nous questionne quant à une possible origine anthropique (Figure 115.d). Il s'agit d'un vide planaire d'orientation oblique, identifié à la jonction entre le NR et l'US6 sous-jacente. Il marque une limite assez franche entre un faciès agrégé et un faciès nettement désagrégé, tous deux appartenant au NR. Il marque une limite subparallèle à l'encaissant US6, dont la limite est à cet endroit également oblique. De plus, les matériaux végétaux humifiés de cette unité y apparaissent tronqués. Ce faciès nous évoque fortement une trace de coupe d'outil, avec effondrement et entassement subséquent des matériaux du sol (Deák et al., 2017, p. 252). Néanmoins, nous n'observons pas de zone de compactage sur la paroi inférieure, seulement ce qui semble être une fine pellicule poussiéreuse sombre. Nous manquons de référentiel dans ce contexte pour valider cette hypothèse.

Enfin, ajoutons que nous avons également observé la présence sporadique d'hypo-revêtement ferro-mangannique en surfaces d'agrégats. Il est fort probable que certains de ces traits résultent au moins en

partie d'un appauvrissement de la masse basale d'agrégats, ce que suggère leur décoloration interne (Figure 116.a-d). Ces traits sont clairement observés sur des agrégats bruns-orangés et rosés, mais pas sur ceux très fortement rougeâtres. Mais, on observe également des revêtements sur des agrégats ou une décoloration interne n'est pas certaine, mais qui sont intégrés dans un faciès désagrégé en partie d'aspect décoloré. Cela supposerait donc plutôt que le fer est remobilisé depuis ces plages externes (Figure 116.a). On peut supposer que ces phénomènes indiquent une remobilisation du fer postérieure à la chauffe, qui affecterait différemment les matériaux selon l'importance des altérations thermiques qu'ils ont connues. Ces traits rédoximorphes, localement très marqués, témoignent clairement de fluctuations dans le régime hydrique local, ce qui concorde avec les données contextuelles. Il est cependant difficile de préciser leur importance réelle à l'échelle totale du NR, puisqu'ils sont perçus à des échelles d'observation très fine. Néanmoins, ils sont récurrents et ne peuvent être négligés. De plus, on relève aussi la présence de concentrations de fer opaques, qui montrent des teintes rouges limpides et très vives en XPL, et dont les dimensions varient de quelques unités à quelques centaines de micromètre (Figure 116.e-f). Elles sont souvent d'aspect diffus et parfois associées à des résidus organiques carbonisés (Figure 116.d). Il s'agit certainement de fins cristaux d'hématites dispersés (voire de particules de fer amorphe ; Stoops, 2020). Il est notable qu'ils soient parfois abondants hors des agrégats très rouges, principalement dans la matrice désagrégée.

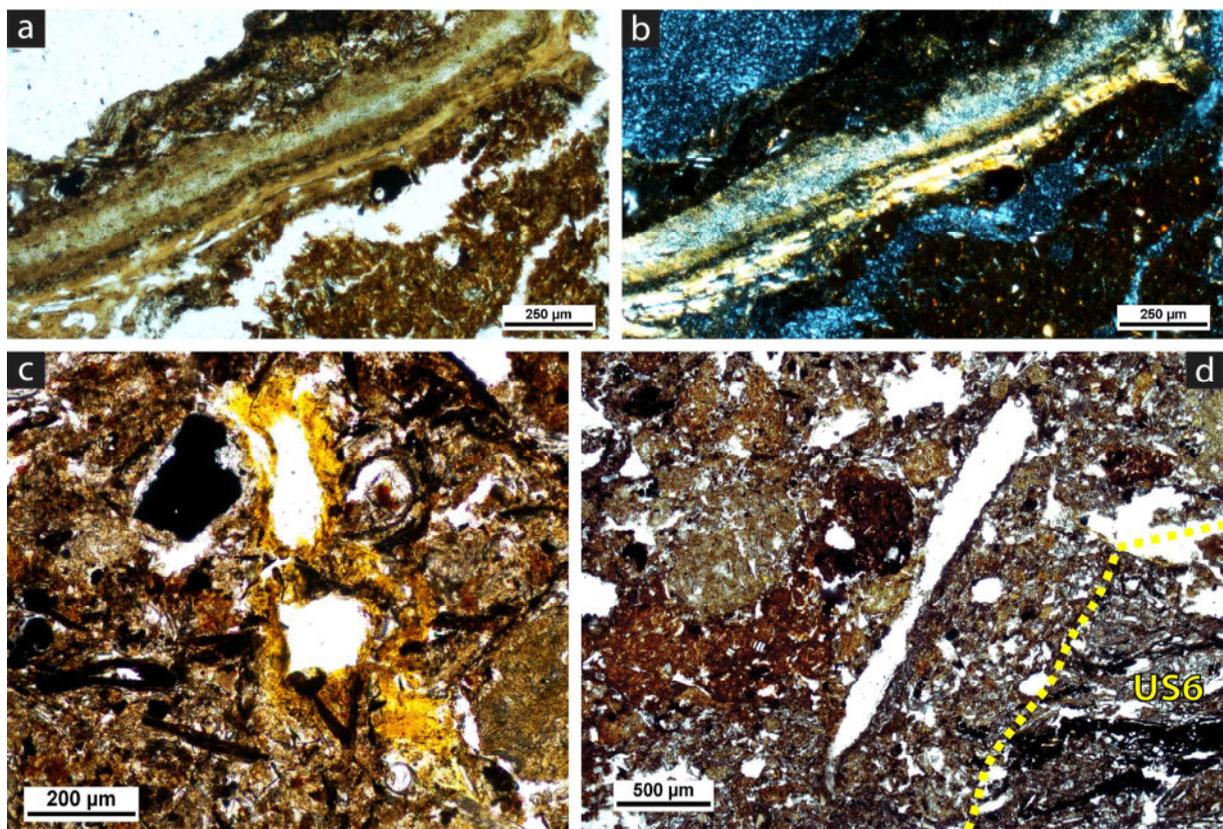


Figure 115 : Différents traits microscopiques ponctuels du niveau rouge.

(a) Revêtements multi-laminés bien délimités de différentes compositions et morphologies sur les parois d'une cavité biologique qui caractérisent de nettes variations dans la dynamique hydrologique et la couverture pédo-sédimentaire locale après la mise en place du NR, vue PPL. (b) Idem en XPL.

(c) Imprégnation phosphatée autour d'une cavité à la base du NR (observation unique ; PPL), qui dérive hypothétiquement d'excréments animaux (Nicosia, 2008).

(d) Possible trace de coupe d'un outil à la base du NR.

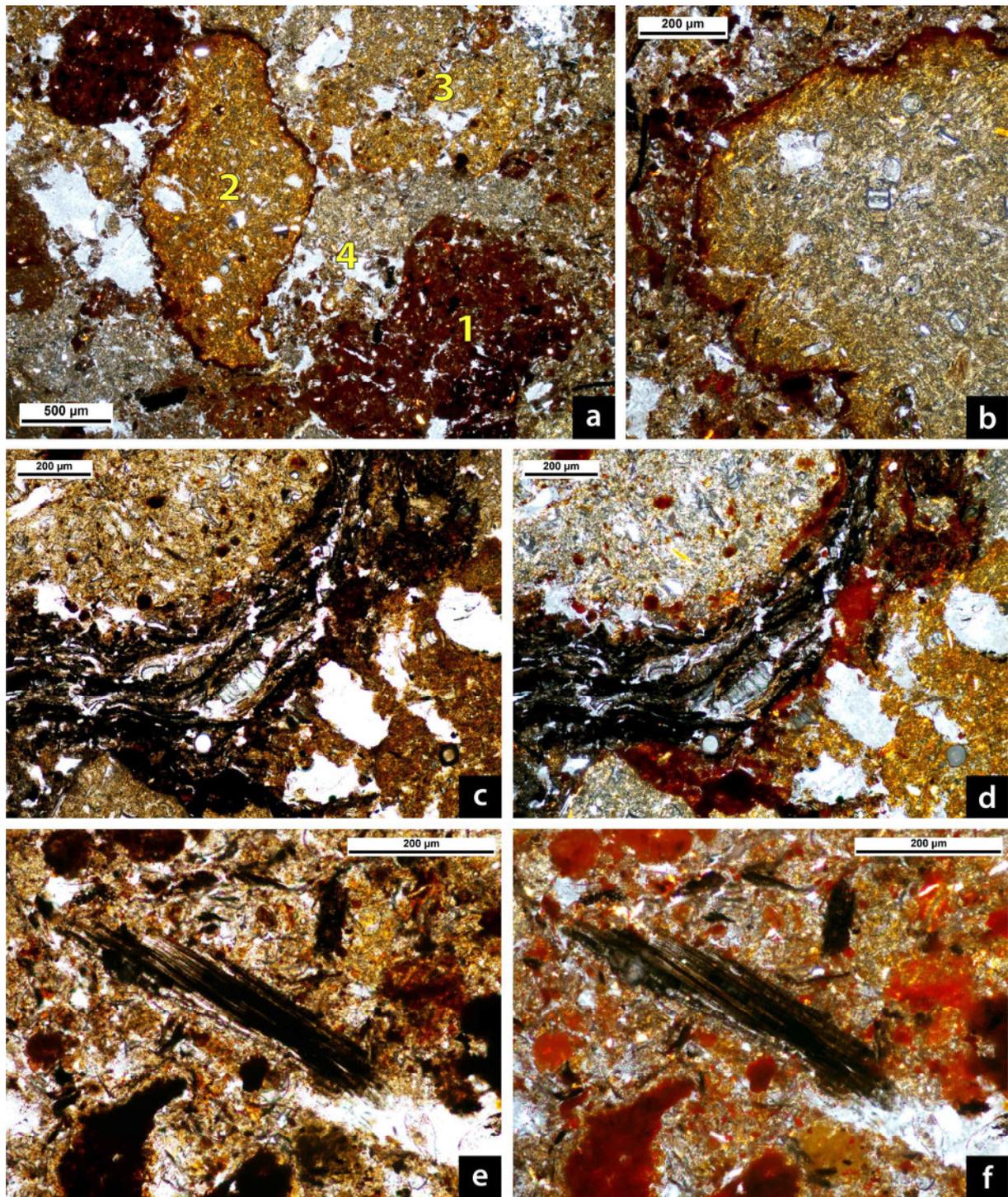


Figure 116 : Phénomènes rédoximorphes et formes du fer dans le niveau rouge.

(a) Exemple de faciès d'agrégats différenciés par leur préservation et la répartition du fer (XPL).

Avec : (1) un agrégat très rouge, de teinte très homogène, avec ponctuations rouge vif (hématite ?) et de nombreuses microfissurations internes (rétractions induites par la cuisson ?) ; (2) un agrégat brun peu rubéfié (apparaît en jaunâtre, possible présence de goéthite ?) et peu fissuré, avec un mince revêtement ferrique sombre sur quasiment toute sa surface externe ; (3) un agrégat brun plus clair en voie de désagrégation marquée et ponctuations de particules de fer diffuses ; (4) le faciès désagrégé peu teinté, pâle, qui indique une décoloration par départ du fer ?

(b) Revêtements ferro(manganiques) sur un agrégat présentant une légère décoloration de sa masse basale interne.

(c) Entassement d'éléments carbonisés et de concentrations ferro-manganiques et de fer amorphe ou d'hématite dans la matrice interstitielle des agrégats, PPL.

(d) Idem en XPL, noter les concentrations ferriques au sein de l'agrégat supérieur (décoloré ?) et sur sa bordure externe.

(e) Fins cristaux d'hématites ou de fer amorphe (?) dispersés autour d'un phytolithe noirci dans le fond matriciel du faciès désagrégé du NR. (f) Idem en XPL.

4.2.3. Caractérisation MEB-EDS

Pour compléter ces caractérisations micromorphologiques, nous avons réalisé un premier test d'analyses au microscope électronique à balayage avec dispositif d'analyse élémentaire (MEB-EDS) sur les échantillons en poudre des NR. L'objectif principal était de rechercher des marqueurs microscopiques, potentiellement exogènes, qui pourraient correspondre à des débris carbonés ou polymères, à mettre en relation avec les hypothèses d'une origine cosmique, liée à des flashes thermiques de très forte intensité ou d'impacts de foudre (Courty, 2017 ; Courty et Martinez, 2015 ; Courty, Allue et Henry, 2020). L'analyse au MEB-EDS permet d'obtenir une cartographie élémentaire de surface, qui peut être rapidement balayée à très fine échelle afin de rechercher des éléments de composition singulière par rapport au fond matriciel général, elle est particulièrement adaptée à cette recherche.

Les micro-prélèvements montrent des compositions relativement homogènes, majoritairement siliceuses et très riches en squelettes de diatomées (souvent très fortement fragmentés), et en corps phytolithaires siliceux (en particulier des morphotypes prismatiques allongés dont les marges et les types de surface sont assez variés). Une analyse spécifique de ces derniers serait particulièrement pertinente. Les seuls éléments de composition nettement distincte que nous avons observés correspondent à des grains de calcium et/ou de magnésium (carbonates calci-magnésiens ; possibles nodules de dolomites), des particules sphériques de silices (diamètre de 100 μm environ, possibles phytolithaires ?), et des particules ou concentrations submillimétriques d'aluminium et/ou de fer (accompagné de Ti). Nous n'avons trouvé aucun élément pouvant être lié à des matériaux exogènes ou indicateurs de conditions de combustion élevée.

4.3. Compositions élémentaires totales (XRF)

Le Tableau 30 présente les résultats des compositions élémentaires obtenues au XRF. Les éléments qui étaient pour un ou plusieurs agrégats en dessous de la limite de détection de l'appareil n'ont pas été retenus. Au total, 23 éléments chimiques majeurs et traces sont considérés. Compte tenu de la forme du matériel analysé (micro-agrégats et poudres), il n'est pas possible de préciser à quel point la densité et les éventuelles différences de taux de matières organiques influencent ces résultats. Cette matrice de données a fait l'objet d'une analyse statistique multivariée, par une analyse en composantes principales (ACP) sur les indices de corrélation. La représentation graphique des deux premières composantes calculées et les cosinus carrés des variables, permettant de visualiser les contributions de chacune d'entre elles pour les deux facteurs, sont présentés en Figure 117. Les deux axes reflètent un peu plus de 75 % de la variabilité totale des échantillons. Le regroupement des mesures par échantillons est assez cohérent. Toutefois, celles des échantillons rubéfiés de Gerzat-A23 sont relativement plus dispersées. Cela peut être relié au fait qu'il correspond à un faciès de NR très pédoturbé et discontinu (dans US4).

Tableau 30 : Résultats des analyses élémentaires par fluorescence X des agrégats rouges et encaissants de Limagne.

	Gerzat-A23		Gerzat-A3			Gravanches-S13				Ménérol-S11		
	Rubéfiés (n=5)		Rubéfiés (n=5)		Encaiss. (1)	Rubéfiés (n=5)		Encaissants (n=5)		Rubéfiés (n=6)		
	M	ET	M	ET	-	M	ET	M	ET	M	ET	
Éléments majeurs (%)	Al	2,44	0,89	3,26	0,36	2,40	1,01	0,57	2,32	0,27	5,52	1,19
	Si	27,49	4,23	25,10	2,69	16,30	29,77	5,32	15,42	1,72	13,51	2,01
	Fe	2,92	0,80	3,06	0,38	4,51	3,67	0,46	4,19	0,39	7,50	0,77
	Mg	0,55	0,13	0,60	0,08	1,07	0,58	0,14	0,89	0,07	1,32	0,06
	K	0,41	0,12	0,61	0,06	0,73	0,38	0,14	0,68	0,14	1,04	0,14
	Ca	0,65	0,20	0,99	0,05	0,95	0,75	0,14	0,90	0,21	1,48	0,16
	Ti	0,42	0,14	0,41	0,05	0,46	0,28	0,12	0,47	0,10	0,81	0,10
Éléments traces (ppm)	P	1680	1290	3127	286	713	1533	376	771	328	1516	391
	S	368	40	342	36	446	410	113	841	279	193	6
	V	341	53	238	35	297	280	71	311	22	137	25
	Mn	259	78	212	34	242	217	55	365	88	592	107
	Ni	29	7	31	2	36	26	2	29	3	56	7
	Cu	45	23	71	19	100	39	11	95	24	52	8
	Zn	74	45	81	12	131	67	11	103	16	181	14
	Ga	16	4	14	1	19	7	3	20	2	31	2
	As	115	77	117	15	80	27	2	40	3	39	4
	Rb	49	20	62	4	127	55	17	124	16	122	6
	Sr	177	30	237	9	192	198	50	310	122	438	29
	Y	14	3	23	3	33	32	13	40	4	42	3
	Zr	189	51	175	10	234	122	25	218	38	292	11
	Nb	48	15	33	3	53	34	7	60	4	72	2
	Ba	114	20	203	27	188	111	54	308	137	447	56
	U	9	2	13	4	21	7	2	15	1	18	1

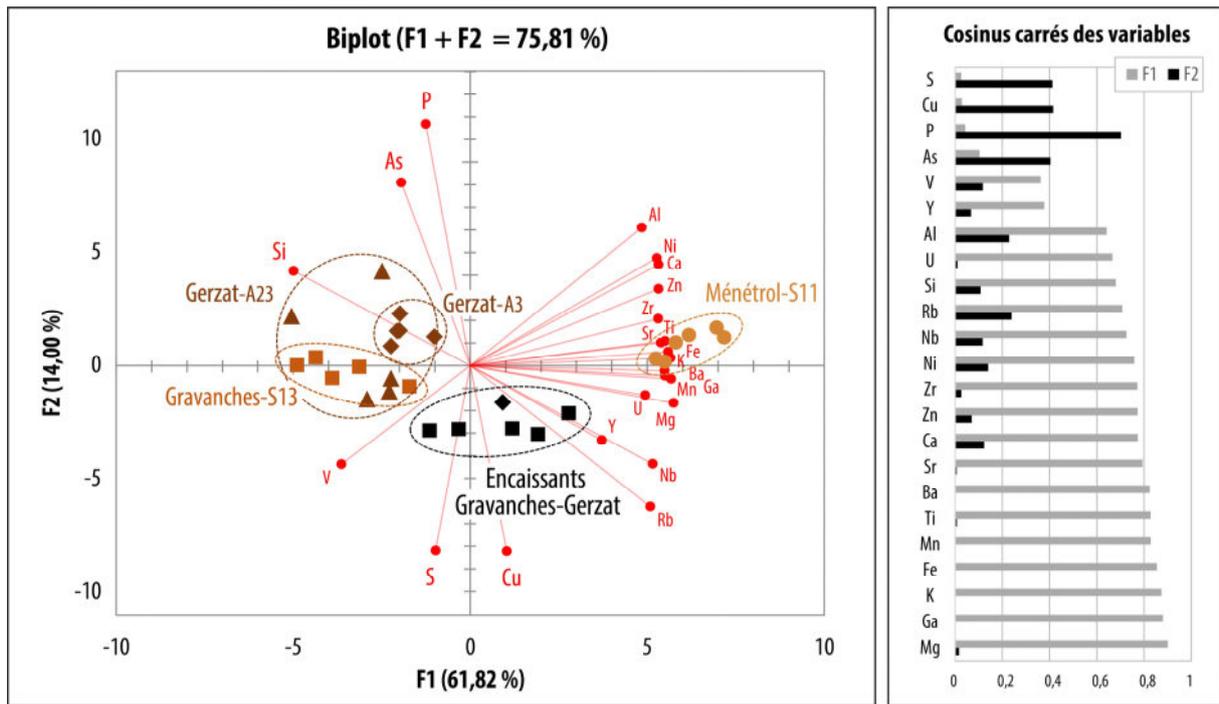


Figure 117 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des micro-agrégats des NR et de leurs encaissants. Les ellipses des groupes d'échantillons ne représentent pas un intervalle de confiance statistique (n trop faible). Le graphique en barres des cosinus carrés permet de visualiser rapidement le poids statistique des variables pour les deux axes.

Environ trois quarts des variables contribuent à un niveau assez proche à la composition de l'axe F1. Sur cet axe, les agrégats rubéfiés des sites de Gravanches-Gerzat sont très bien discriminés de ceux de Ménétrol, tandis que les agrégats encaissants apparaissent en position médiane. Les premiers sont principalement caractérisés par des proportions nettement plus élevées de Si, tandis que les seconds sont associés à un grand nombre d'éléments majeurs et traces. Ce résultat peut logiquement s'expliquer par le fait que le site de Ménétrol provient d'une couche rougeâtre identifiée dans un contexte légèrement différent, un peu en amont de la plaine marécageuse et surtout dans la plaine d'un petit affluent bien distinct (Figure 108, p. 311). Mis à part les échantillons de Ménétrol, nous pouvons observer que les agrégats rougeâtres présentent des valeurs de Si nettement plus élevées. Compte tenu des résultats micromorphologiques, il est assez probable que ce résultat corresponde à l'enrichissement en silice biogène (amorphe), qui compose les abondants phytolithes et diatomées identifiées (Badaut et al., 1979 ; Verleyen et al., 2017 ; Vrydaghs, Devos et Petó, 2017). De plus, étant donné que l'US6 possède également une très forte proportion de squelettes siliceux, cela suggère que les matériaux encaissants seraient à rapprocher de l'US4.

L'axe F2 discrimine quant à lui assez bien les agrégats rougeâtres, tous prélèvements confondus, des agrégats encaissants. Il est principalement défini par les valeurs de quatre constituants : phosphore (21,8 %), cuivre (12,9 %), soufre (12,8 %) et arsenic (12,5 %). Les valeurs relativement plus élevées de S et de Cu dans les sédiments encaissants paraissent cohérentes, car ces constituants sont généralement associés aux composés organiques (Conesa, Fardeau et Simon-Sylvestre, 1979 ; Kabata-Pendias, 2000 ; Mathieu et Lozet, 2011 ; Wainwright, 1984). Néanmoins, les taux de soufre élémentaire total sont très bas vis-à-vis des taux qui caractérisent les horizons sulfidiques, continuellement saturés en eau saumâtre

(> 7500 ppm ; AFES, 2009). Le soufre total ne peut être seulement associé aux récurrents framboïdes de pyrite (FeS_2), puisque ceux-ci sont aussi présents dans le NR, quoiqu'en proportions apparemment moindres, mais cela est difficile à estimer. On notera tout de même qu'en cas d'oxydation thermique, à partir de 500°C environ, la pyrite subit une désulfuration (libération de gaz SO_2) et se transforme principalement en hématite (Maurel, 1964 ; Xu et al., 2019 ; Hu et al., 2006). D'autre part, la combustion des matières organiques et des litières entraîne généralement des pertes substantielles de soufre, et cela à basse température, entre 375 et 575°C (Bodí et al., 2014 ; Sanborn et Ballard, 1991 ; Tiedemann, 1987). Quant au cuivre, il est dans les sols souvent présent sous forme de sulfures, et se lie aussi étroitement avec les complexes organo-humiques (Kabata-Pendias, 2000 ; Mathieu et Lozet, 2011). Ses plus faibles teneurs dans les agrégats rougeâtres pourraient être dues à la destruction de ces complexes par la chauffe. L'association de S et Cu avec les échantillons encaissants est donc congruente avec le fait qu'ils présentent une composante organique, même assez faible.

Le phosphore est l'élément chimique le plus discriminant entre agrégats rougeâtres et encaissants. Il est reconnu pour posséder une forte capacité à co-précipiter et être adsorbé aux oxy-hydroxydes de fer trivalent (Gasparatos, Massas et Godelitsas, 2019 ; Li et al., 2012). Cela est donc tout à fait cohérent vis-à-vis du faciès oxydé du NR. Avec la chauffe, le phosphore inorganique semble également pouvoir se lier fortement avec certains cations métalliques concentrés dans les cendres (Certini, 2005 ; Gray et Dighton, 2006 ; Schaller et al., 2015). De plus, P peut être un constituant relativement abondant dans certaines cendres végétales (Bodí et al., 2014 ; Raison, Khanna et Woods, 1985). En eux-mêmes, les plus fortes teneurs en P ne peuvent être strictement associées à la chauffe, néanmoins, elles sont tout à fait cohérentes avec le processus de rubéfaction (qu'il soit d'origine thermique ou non). Au vu des observations micromorphologiques, un enrichissement par l'intermédiaire des cendres est fortement envisageable. D'autre part, nous n'avons pas d'argument pour étayer que cette augmentation du phosphore puisse s'expliquer par des activités anthropiques spécifiques.

L'arsenic possède des propriétés chimiques générales assez similaires au phosphore, il peut notamment se trouver fortement lié aux oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium (et tout particulièrement aux formes hydroxydes), ou autrement aux minéraux argileux et aux matières organiques (Kabata-Pendias, 2000). Néanmoins, le schéma de l'As n'est pas aussi clair que le montre la projection de l'ACP. Alors que pour Gravanches-S13, les valeurs d'As sont légèrement plus faibles dans les agrégats rouges que dans l'encaissant, on observe le contraire pour Gerzat-A3. D'autre part, les taux mesurés sur les échantillons de Gerzat sont relativement assez élevés en comparaison de ceux indiqués dans la littérature. Ils sont dans les gammes de valeurs associées aux cas de fortes anomalies naturelles (Baize, 2000). Il est difficile d'interpréter ces résultats, car les voies évolutives de l'arsenic sont complexes vis-à-vis des effets de la combustion, notamment en ce qui concerne sa valence, les interactions avec d'autres composés, mais aussi en fonction des paramètres de chauffage (Fendorf et al., 2010 ; Johnston, Karimian et Burton, 2019 ; Terzano et al., 2021). Compte tenu du contexte géomorphologique, on ne peut exclure la possibilité d'une concentration en As post-dépositionnelle, liée à des retombées volcaniques, ou d'autres activités anthropiques plus récentes, lequel se serait préférentiellement fixé dans cette unité à caractère rédoxique (Kabata-Pendias, 2000 ; Terzano et al., 2021).

Enfin, on ajoutera en dernière remarque que les agrégats rougeâtres ne sont pas du tout enrichis en fer. Au contraire, ils possèdent même des taux légèrement plus faibles que ceux des encaissants (hormis

Ménétrol-S11, pour lequel nous n'avons pas d'encaissant en référence). Les niveaux rouges ne correspondent donc clairement pas à des horizons pédologiques d'accumulation du fer (ferriques ou pétroferriques ; AFES, 2009).

4.4. Caractérisations minéralogiques (DRX)

Sept échantillons ont été analysés par diffraction des rayons X. Ces analyses ont été réalisées sur les fractions sédimentaires < 200 µm. La Figure 118 présente les courbes de diffractions des échantillons, présentés par paire d'échantillons encaissant-rubéfié (excepté pour Ménétrol-S11), et les modèles de références des minéraux retenus.

Tableau 31 : Synthèse des cortèges minéralogiques des échantillons rubéfiés et encaissants (< 200 µm) de Limagne. Interprétation du degré d'abondance relatif : +++ ou ++++ : forte à très forte

++ : moyenne

+ : faible

(+) : assez/très faible (pics potentiels ou mal définis)

- : non identifié

Échantillon		Feldspaths	Quartz	Biotite / Illite	Type- Chlorite	Kaolinite	(Titano)Magnétite	Hématite	Amphibole
Agrégats rubéfiés	Ménétrol-S11	++++	+	++	++	-	+	++	+
	Gravanches-S13	+++	+	+	(+)	(+)	-	++	+
	Gerzat-A3	++	+	+	(+)	-	-	++	(+)
	Gerzat-A23	++	+	+	+	-	(+)	+	(+)
Agrégats encaissants	Gravanches-S13	++++	++	+	+	(+)	(+)	-	-
	Gerzat-A3	+++	++	+	++	(+)	(+)	-	-
	Gerzat-A23	+++	+	++	++	+	(+)	(+)	(+)

Tous les échantillons sont très largement dominés par les feldspaths. Ils paraissent principalement correspondre à de l'oligoclase (plagioclases ou feldspaths calcosodiques), mais également à de l'anorthose (ou anorthoclase : feldspaths alcalins). Ce sont des types de feldspaths que l'on retrouve principalement dans les trachytes (et certaines laves trachy-andésites) de la Chaîne des Puys (Boivin et al., 2017, p. 157). Il n'est pas toujours évident de les dissocier sur les spectres de diffractions, il n'est donc pas possible de préciser s'ils résultent de différentes sources ou d'une population plutôt homogène possédant un profil intermédiaire entre les modèles de références de ces deux types de feldspaths, dont la composition est néanmoins très proche. Il apparaît dans les trois cas que l'échantillon rubéfié possède une proportion nettement moindre en feldspaths que son encaissant respectif. En outre, les proportions

varient pratiquement du simple au double entre les différents échantillons. On trouve également du quartz dans tous les échantillons, dans des proportions qui varient, mais ils ne dominent jamais les compositions minéralogiques. Les proportions de quartz sont également inférieures dans les sédiments rubéfiés pour deux paires d'échantillons, mais elles sont équivalentes dans Gerzat-A23.

Parmi les phyllosilicates, on identifie une argile micacée, qui pourrait correspondre à de l'illite, voire de la biotite. Celle-ci, bien qu'en proportion faibles ou très faibles, est tout de même très clairement identifiable dans tous les échantillons. La superposition des raies de diffraction des feldspaths à celles des modèles d'illites de référence, empêche de préciser s'il s'agirait plutôt de micas peu ou pas altérés (biotite), ou formés par la pédogenèse et l'altération mécanique (illites). Cette argile micacée est très bien définie pour l'échantillon encaissant Gerzat-A23, mais elle est en proportion environ deux fois inférieure dans sa paire rubéfiée. Ceci serait à relier à la nature légèrement distincte de l'encaissant de Gerzat-A23 (US4). On peut également observer une oscillation, quoique mal définie (pic évasé), vers 19,8-20,0°, qui correspond à des minéraux argileux de nature non complètement assurée. Il s'agit certainement de minéraux interstratifiés ou d'intergrades dont les compositions se rapprocheraient des chlorites secondaires et feraient intervenir une composante micacée. Sa proportion est variable, mais pour les deux paires d'échantillons de Gerzat, elle est mieux définie dans leurs encaissants. Elle est également bien visible pour Ménérol-S11. Il est notable que nous n'identifions pas de smectites, peut être, car elles sont en trop faible quantité pour être identifiées sur les angles de diffractions aiguës où elles devraient apparaître, ou sinon tout simplement, car elles sont absentes. Seules des analyses sur la fraction granulométrique argile, avec préparations adéquates permettraient de s'en assurer. Le dernier phyllosilicate identifié est de la kaolinite, mais elle l'est seulement de façon très diffuse. On la trouve dans les deux encaissants de Gerzat, mais elle est seulement suspectée dans les deux échantillons de Gravanches-S13 par des oscillations autour son pic principal.

Plusieurs échantillons montrent également l'existence très discrète d'une amphibole, dont il n'est pas possible de préciser le type (variétés ferromagnésiennes ou calcosodiques). Les comparaisons inter-échantillons nous font suspecter la présence d'autres minéraux accessoires, du fait de variations peu cohérentes entre les pics majeurs et secondaires des feldspaths (sur la base des modèles de références disponibles), notamment autour d'environ 30° et 35°. Il pourrait s'agir de pyroxène (clinopyroxènes ferromagnésiens ou calciques, possiblement de type diopside ou augite) ainsi que de la titanomagnétite, voire très éventuellement de la titanite. Quelques autres pics encore nous posent des problèmes d'identifications. D'autre part, on peut observer sur plusieurs des diffractogrammes, un exhaussement général et diffus des courbes, à partir de 20° environ et jusque vers 25-28°. Ceci, en particulier pour les deux échantillons de Gerzat-A3, le rubéfié Gerzat-A23, et moindrement pour celui rubéfié Gravanches-S13. Ce phénomène entraîne par ailleurs des difficultés à caractériser l'importance relative du minéral type chlorite secondaire. Ce motif peut s'expliquer par la présence très importante d'opale biogénique : diatomées et phytolithes, qui sont abondants sur les lames minces (Monger et Kelly, 2002). En outre, le fait que ce phénomène soit également bien marqué pour l'encaissant Gerzat-A3 est aussi concordant avec l'abondance de ces restes siliceux dans l'US4.

Enfin, tous les échantillons rubéfiés montrent la présence très bien définie d'hématite. Elle est toutefois visiblement moins abondante dans Gerzat-A23, échantillon qui correspond au faciès pédoturbé. Au contraire, elle est la mieux définie dans le faciès rubéfié « massif » de Gerzat-A3 (ainsi

qu'en Gravanches-S13). L'échantillon encaissant de Gerzat-A3 montre également une très faible présence d'hématite, mais il s'agit très certainement d'une « pollution », car il a été très difficile d'isoler proprement des sédiments encaissants de cet échantillon (justement, car il était peu pédoturbé). Ces résultats sont finalement cohérents avec les mesures de susceptibilité magnétique très faible, puisque les propriétés magnétiques de l'hématite sont négligeables par rapport à la magnétite. La SM nettement plus forte de Ménétrol-S11 s'expliquerait par la présence de magnétite.

À l'exception de l'hématite, les compositions minéralogiques sont cohérentes avec les résultats des études antérieures sur les sols de la plaine de Limagne (minéralogie des argiles : Bornand et al., 1984 ; Ballut, 2001). Il conviendrait néanmoins de s'assurer si l'absence de smectites est effectivement un problème analytique et non une véritable absence. Son absence de l'unité palustre US6 ne serait pas non plus étonnante. D'autre part, les minéraux identifiés vont dans le sens d'une association avec ceux des assemblages des laves trachytiques : plagioclase, feldspath alcalin, biotite, amphibole, clinopyroxène (Boivin et al., 2017 ; Vernet et Raynal, 2008). Nous manquons néanmoins clairement d'assurance pour ces deux derniers minéraux. Certains auteurs indiquent que les clinopyroxènes sont difficiles à mettre en évidence en DRX du fait des faibles dimensions de leurs cristallites (Dondi et al., 1998). Il faut aussi considérer que les pyroxènes et les amphiboles sont potentiellement facilement altérés en conditions superficielles, relativement plus que la biotite et les feldspaths alcalins. La kaolinite en trace ainsi que le quartz traduirait quant à eux les apports détritiques des sédiments marno-calcaires (Aubert et al., 1975). Mais l'illite peut également provenir de ce substratum. En l'état, outre la présence éventuelle de chlorite secondaire (à vérifier dans les analyses futures), ces compositions indiqueraient une altération relativement ménagée.

Les compositions minéralogiques des échantillons rubéfiés sont globalement homogènes vis-à-vis de leurs encaissants. Cela confirme le caractère sub-autochtone des niveaux rouges. Les deux groupes se distinguent néanmoins sur deux aspects. Tout d'abord par la présence très nette d'hématite. La présence de cet oxyde de fer, dans ce contexte tempéré et fortement soumis à l'influence des engorgements de variations du niveau d'eau, constitue un autre critère fort en faveur de l'hypothèse thermique. Il est généralement considéré que l'hématite commence à cristalliser de manière bien ordonnée à des températures supérieures à 600°C (Cornell et Schwertmann, 2003). Cela indiquerait que ces échantillons ont connu des températures au moins de cet ordre. Il est possible que la titanomagnétite, si elle est effectivement présente, en soit un des précurseurs. Une oxydation du fer provenant de la biotite paraît moins probable, car seul l'échantillon rubéfié de Gerzat-A23 montre une moindre teneur en biotite que son encaissant. De plus, cet échantillon montre des pics d'hématite moins développés, et vraisemblablement encore de la titanomagnétite.

En second lieu, nous observons que la cristallinité des échantillons rubéfiés est nettement moins forte que celle de leurs encaissants respectifs. Ce phénomène est nettement visible pour les feldspaths et le quartz, car ils sont abondants, mais il s'observe également pour le minéral chloritique. Pour Gerzat-A23, la proportion de quartz est presque identique, mais l'argile micacée est, elle, diminuée. Il n'y a pas de situation très claire pour les minéraux secondaires. Cette cristallinité moins forte peut être imputée à l'altération engendrée par la chauffe (Cultrone et Carrillo Rosua, 2020 ; El Ouahabi et al., 2015). Le fait que l'oligoclase soit seulement diminuée, mais encore bien exprimée ; qu'il n'y ait pas d'augmentation des feldspaths potassiques au dépend des plagioclases ; que l'illite soit présente ; et

enfin qu'aucun nouveau minéral ne soit clairement identifié à l'exception de l'hématite ; tout cela semble indiquer que les températures n'ont pas dû dépasser les 800-900°C (Cultrone et al., 2001 ; Cultrone et Carrillo Rosua, 2020 ; Delbey, 2018 ; El Ouahabi et al., 2015 ; McConville et Lee, 2005). Les minéraux chloritiques et leurs intergrades hydroxylés ont des températures de déshydroxylation qui varient beaucoup selon leur nature. Ce processus intervient généralement entre 400 et 750°C, et se déroule parfois en plusieurs étapes (Bailey, 1975 ; Ross et Kodama, 1976 ; Zhan et Guggenheim, 1995 ; Kohut et Warren, 2002 ; Karathanasis, 1988, 2008 ; Georgiadis et al., 2020). Cela est cohérent avec la baisse partielle du minéral chloritique, et les autres indices de seuils de températures de chauffe. Étant donné que les clinopyroxènes sont très communs dans les roches volcaniques, et que les matériaux sont décarbonatés, il est peu probable que leur possible présence dans Gerzat-A3 s'explique par la chauffe (formé entre autres à partir du CaCO₃). Les quelques différences dans les minéraux secondaires – pour lesquelles nous ne trouvons aucune logique d'occurrence (kaolinite, amphibole, clinopyroxène) – sont certainement dues à une variabilité intra-échantillon (effet pépite), à relier à leur faible volume.

Le seul point que nous n'expliquons pas vraiment est celui du quartz, pour lequel aucune transformation ne devrait théoriquement advenir pour les gammes de températures envisagées d'après les précédents indices (< 1000°C ; Cultrone et al., 2001 ; Cultrone et Carrillo Rosua, 2020 ; McConville et Lee, 2005). Peut-être est-ce seulement dû à des différences d'abondance initiales entre les sédiments rubéfiés et ceux encaissants, ayant été postérieurement intégré. Néanmoins, très peu de cristaux de quartz sont en fait effectivement identifiables dans les lames minces, ce qui indique qu'ils sont en grande partie sous forme de microcristaux. Autrement dit, on peut se demander si une formation authigène de quartz, laquelle n'aurait pas affecté les sédiments rubéfiés, est possible. Ce quartz peut en particulier se former par précipitation des solutions enrichies en silice résultant de l'altération de verres volcaniques, et leur accumulation dans des fonds lacustres, notamment saumâtres (Fourmont, 2006 ; Fourmont, Macaire et Bréhéret, 2009). C'est un phénomène qui est mis en évidence dans le paléo-lac de Sarliève (ibid.), et pour le Grand Marais, les caractéristiques de l'US6 indiquent l'existence de périodes où la nappe d'eau était au moins saisonnièrement importante (argiles décantées et diatomées). Cela expliquerait que ce phénomène ne soit pas observé pour Gerzat-A23 qui est présent dans l'unité supérieure U4. D'autre part, la combustion des sédiments elle-même va libérer une certaine quantité de silicium par l'altération des alumino-silicates (dont les feldspaths). En l'état, cela reste seulement une hypothèse. Outre ce point précis, les spectres minéralogiques ne fournissent pas d'indices probants d'une chauffe de « forte intensité ». Il est néanmoins possible qu'elles aient pu dépasser les 600°C, mais il serait judicieux d'établir précisément pour ces sols, comment la chauffe influence les compositions minéralogiques.

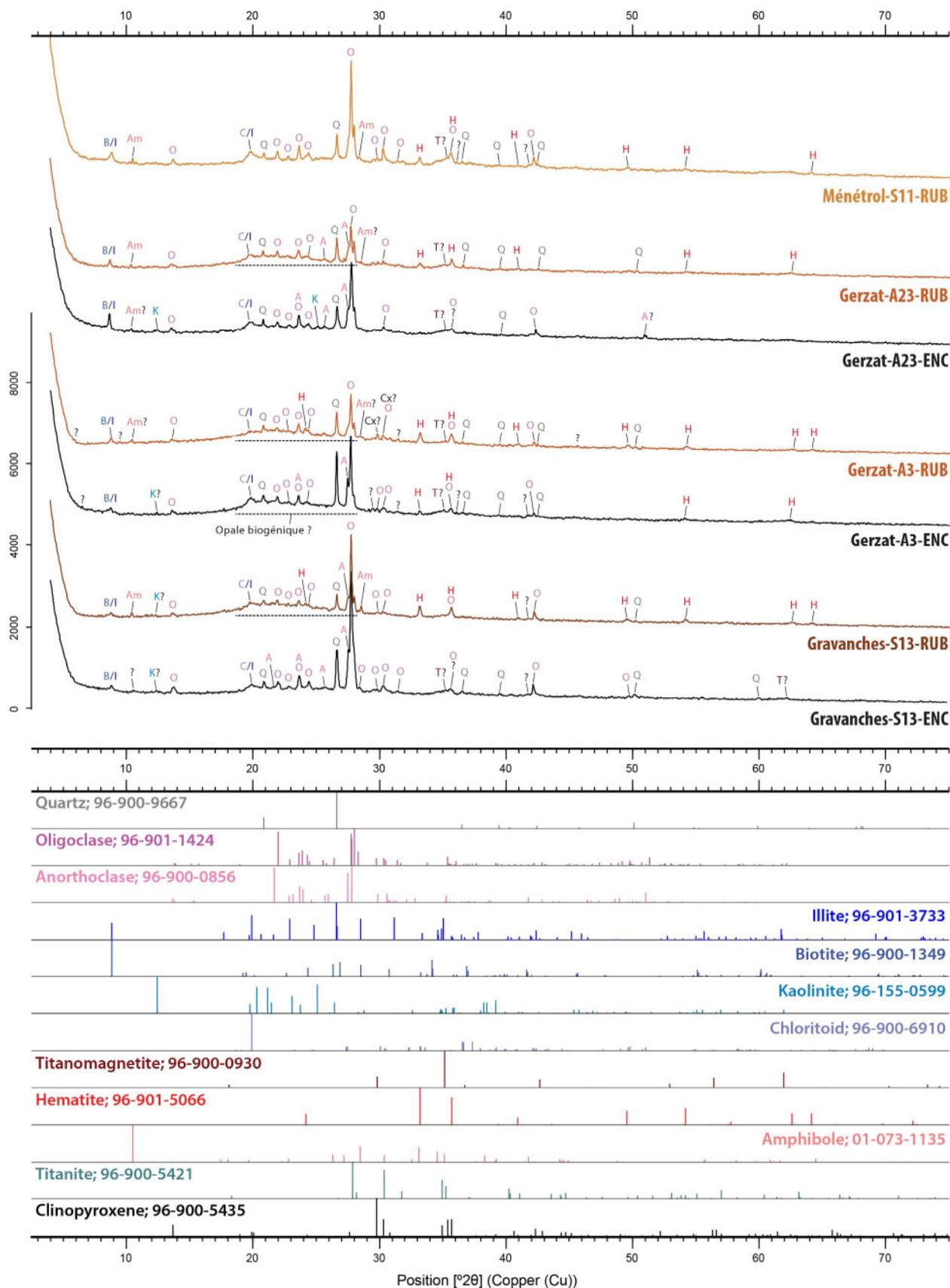


Figure 118 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons des NR de Limagne et des modèles de référence des minéraux identifiés (base de données COD).

4.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium

Le Tableau 32 présente les résultats des dosages des différentes extractions du fer, de l'aluminium et du silicium, selon la méthode Tamm en obscurité (extrait codé OX) et Mehra-Jackson (codé CBD), réalisées par le laboratoire INRAE d'Arras. Trois échantillons de sédiments rubéfiés ont été analysés. Les quantités de sédiments encaissants obtenus étaient malheureusement insuffisantes pour celles-ci. Sont présentés, les calculs des formes élémentaires extraites et différents rapports entre ces dernières (Cornell et Schwertmann, 2003 ; Baize, 2018).

Les proportions de fer total entre ces échantillons sont relativement équivalentes. Dans les trois échantillons, la proportion de fer libre (Fe_{CBD}/Fe_T) se montre assez haute, elle est équivalente dans les deux échantillons de Gerzat, mais elle est légèrement plus basse en Gravanches-S13. Ceci traduit un certain degré d'altération. Le résultat tout à fait remarquable est celui de la quasi-absence de fer amorphe ou faiblement cristallisé (Fe_{OX}). Autrement, la totalité du fer dans ses échantillons est présente au sein des réseaux des silicates ou sous forme de cristaux d'oxy-hydroxydes (on peut raisonnablement exclure la présence de fer lié aux complexes organo-humiques). Ainsi, d'un point de vue pédologique, le rapport Fe_{OX}/Fe_{CBD} qui approche ainsi la nullité, traduit un degré de maturité extrêmement avancé (Arduino et al., 1986). D'après Cornell et Schwertmann (2003), les ratios inférieurs à 0,1 prévalent dans les sols de très forte altération du type ferrallitique ou les Ultisols. Des valeurs de même ordre sont enregistrées dans des horizons de divers types de sols rubéfiés par voie pédologique (Jouaffre et al., 1991 ; Torrent, Schwertmann et Schulze, 1980). Toutefois, les rapports Fe_{OX}/Fe_{CBD} de cet ordre semblent aussi associés à des taux de fer libre encore plus élevé que ceux mesurés ici.

Pour ce qui concerne les formes de l'aluminium, Al_{SI} est nettement dominant, toutefois, dans l'échantillon Gerzat-A3, la proportion d'aluminium libre est relativement plus importante (Al_{CBD} et Al_{OX}). Pour les trois échantillons, on observe que Al_{OX} est supérieur à Al_{CBD} , et ceci de manière notable pour Gerzat-A3. Ceci indique clairement la présence d'alumino-silicates voire d'oxydes d'aluminium hydratés, tous deux non sous des formes cristallines, mais amorphes (Fey et Le Roux, 1977 ; Shang et Zelazny, 2008). Les valeurs de Al_{OX} mesurées restent néanmoins inférieures à celles qui sont enregistrées dans des horizons d'altération développés dans des matériaux volcaniques. La formation de complexes alumineux amorphes peut s'expliquer par la chauffe et la déstructuration d'une partie des alumino-silicates initialement présents (Singh et al., 1991). En comparaison des résultats de la DRX, il s'agirait vraisemblablement, en majeure partie, des plagioclases et/ou des feldspaths alcalins. Il est notable que ce soit dans l'échantillon où l'hématite est la plus abondante, Gerzat-A3, que l'aluminium « libre » le soit aussi. En outre, nous pouvons faire le lien entre cette fraction et l'association avec l'arsenic, puisque l'aluminium libre favoriserait sa rétention (Van Oort et al., 2017).

Le silicium extrait par les deux méthodes reste proportionnellement au silicium total, très faible. L'échantillon Gerzat-A3 se distingue seulement des deux autres, par un Si_{OX} équivalent à Si_{CBD} . Nous nous demandons si le fait que les proportions extraites par la méthode oxalate ne dépassent (presque) pas celle de la méthode CBD, pourrait s'expliquer, car ce sont surtout des formes d'aluminium amorphes qui sont présentes (ce qui serait à relier au fait que les précurseurs seraient principalement des feldspaths ?). Ceci reste à préciser. Ajoutons tout de même que normalement, aucun des deux traitements ne doit extraire les formes opalines de la silice (Shang et Zelazny, 2008).

Tableau 32 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si pour les échantillons rubéfiés de Limagne.

	Gerzat-A23	Gerzat-A3	Gravanches-S13
Fer total (Fe_T)	3,53	3,02	3,49
Fer "libre" total (Fe_{CBD})	1,88	1,67	1,56
Fer "libre" amorphe ou mal cristallisé (Fe_{OX})	0,09	0,07	0,13
Fer des silicates (Fe_{SI} = Fe_T - Fe_{CBD})	1,65	1,35	1,93
Fer des oxydes bien cristallisés et/ou fer complexé humique (Fe_{CBD} - Fe_{OX})	1,79	1,60	1,44
Rapport Fe_{OX} / Fe_{CBD}	0,05	0,04	0,08
Rapport Fe_{CBD} / Fe_T (%)	53,3	55,2	44,7
Rapport (Fe_{CBD} - Fe_{OX}) / Fe_T (%)	50,7	52,9	41,1
Aluminium total (Al_T)	2,59	2,97	1,98
Aluminium "libre" (Al_{CBD})	0,11	0,24	0,09
Aluminium "libre" (Al_{OX})	0,22	0,86	0,22
Aluminium des silicates (Al_{SI} = Al_T - Al_{OX})	2,37	2,10	1,77
Rapport Al_{SI} / Al_T (%)	91,6	70,9	89,0
Rapport Al_{CBD} / Al_T (%)	4,1	8,1	4,5
Rapport Al_{OX} / Al_T (%)	8,4	29,1	11,0
Silicium total (Si_T)	27,51	27,33	29,93
Silicium "libre" (Si_{CBD})	0,24	0,27	0,26
Silicium "libre" (Si_{OX})	0,09	0,30	0,08
Rapport Si_{CBD} / Si_T (%)	0,9	1,0	0,9
Rapport Si_{OX} / Si_T (%)	0,3	1,1	0,3

4.6. Colorimétrie et spectres de réflectance

La Figure 119 montre la projection spatiale des échantillons rubéfiés et encaissants, selon leurs teintes a* (rouge) et b* (jaune), dans le système colorimétrique CIELAB. Les échantillons de ces deux groupes sont assez bien discriminés. Les encaissants de Gerzat-A23 montrent toutefois des teintes légèrement plus élevées, ce qui peut s'expliquer par la pédoturbation fine et marquée de cet échantillon. De plus, on remarque aussi la grande dispersion des valeurs des échantillons rubéfiés de Gerzat-A23. Cette variabilité rappelle, par ailleurs, les résultats des compositions élémentaires totales observées sur cet échantillon. Malgré cette variabilité, ce sont ceux qui possèdent les teintes les plus élevées de tous les échantillons. Plusieurs des points de mesures chevauchent en partie les valeurs qui correspondent à celles d'hématites de synthèse. En outre, les résultats des autres échantillons montrent une moindre dispersion, du moins, celle-ci n'est pas du même type, puisqu'on observe un rapport a*/b* plus constant. Le caractère globalement plus accusé de la teinte rouge par rapport au jaune de Gravanches-S13 (décalage du rapport a*/b*) n'est néanmoins pas expliqué. Les teintes varient donc, non seulement à l'échelle d'un NR (échelle des agrégats, microscopique), mais se distinguent aussi plus ou moins entre différents NR. La colorimétrie suggère donc que le caractère rubéfié est, d'une certaine façon, local, à

l'échelle de la plaine. Cela pourrait être relié à des variations locales du/des phénomènes thermiques à leur origine, ou à des différences spatiales dans la composition des matériaux. Ces différences seraient néanmoins trop discrètes pour être expliquées sur la base des résultats géochimiques et minéralogiques.

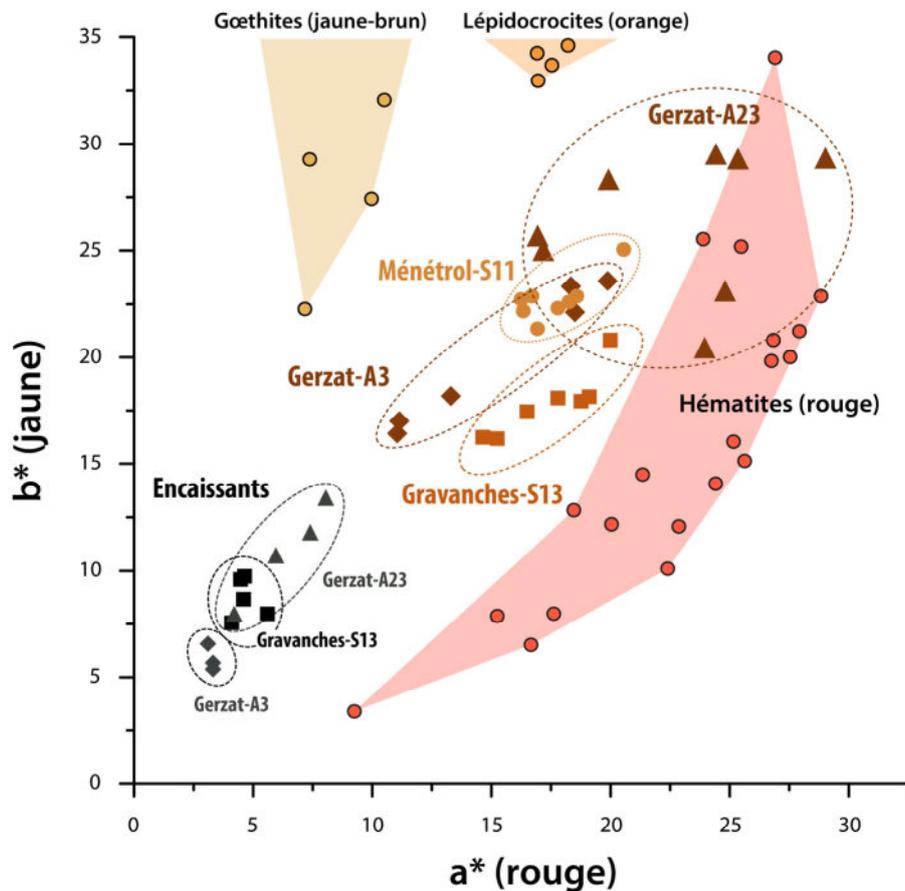


Figure 119 : Représentation spatiale des teintes (axes chromatiques a^* et b^* du système CIELAB) des échantillons rubéfiés et encaissants de Limagne. Les polygones colorés représentent les espaces colorimétriques des goethites, lépidocrocites (qui se prolongent hors du graphique) et hématites synthétiques, d'après Cornell et Schwertmann (2003, p. 132).

La Figure 120 présente les courbes moyennes des premières dérivées des spectres de réflectance du domaine visible (400-700 nm), des agrégats rubéfiés et de leurs encaissants. Les échantillons encaissants montrent des spectres relativement monotones. Ceux de Gerzat-A3 et de Gravanches-S13 sont particulièrement similaires. Le léger épaulement visible entre 400 et 420 nm pourrait éventuellement s'expliquer par la présence d'illite (Debret et al., 2011). On note également de légers rehaussements des spectres à 545 nm et à 590 nm. Ils pourraient indiquer la présence d'oxy-hydroxydes de fer, mais ils sont insuffisamment exprimés pour le proposer clairement. L'échantillon encaissant Gerzat-A23 se distingue légèrement et semble quant à lui, montrer des traces d'oxy-hydroxydes de fer chromophores, possiblement goethite et hématite. Ce résultat peut être relié au fait que le NR de cet échantillon présente un faciès assez pédoturbé : de l'hématite du faciès rubéfié serait alors finement incorporée au sein des matériaux encaissants. Cependant, nous n'identifions de la goethite sur aucun des spectres DRX, seule de la titanomagnétite serait éventuellement présente. Peut-être que cet oxyde

interfère aux mêmes longueurs d'onde que la goethite, et explique cette oscillation (Scheinost et al., 1998).

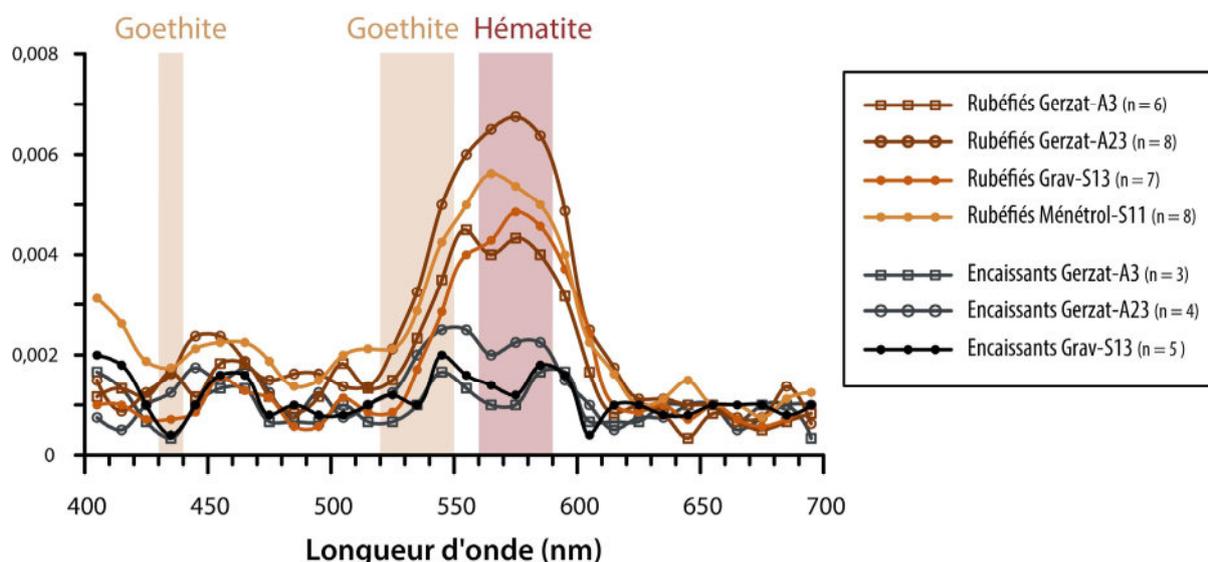


Figure 120 : Courbes moyennées des premières dérivées des spectres de réflectance des échantillons rubéfiés et encaissants de Limagne.

Globalement, les spectres moyens des échantillons rubéfiés montrent tous, et cela de manière très bien définie, la présence d'hématite. Dans le détail, on observe néanmoins des différences qui peuvent être considérées entre les différents groupes échantillons. La première est que les premières dérivées ne sont pas étroitement définies autour des bandes spectrales de l'hématite, mais montrent des épaulements qui s'étendent en direction des bandes d'absorption de la goethite. Cela suggère fortement une interférence d'au moins un autre oxy-hydroxydes, très probablement de la goethite (Deaton et Balsam, 1991 ; Zhou et al., 2010). Sur la courbe des échantillons de Gerzat-A3, on relève même un second pic qui se détache à 555 nm. D'autre part, il apparaît que ces résultats ne suivent pas ceux obtenus en DRX. Présentement, l'hématite serait ici la mieux définie telle que : Gerzat-A3 < Gravanches-S13 < Ménétrol-S11 < Gerzat-A23. La comparaison des hauteurs de la raie principale de l'hématite sur les diffractogrammes des rayons X ($33,2^\circ$), montre une situation totalement contraire : Gerzat-A23 \approx Ménétrol-S11 < Gravanches-S13 < Gerzat-A3.

L'hématite ne serait donc pas la seule responsable de la rubéfaction. Ce résultat est assez étonnant, non seulement car il est souvent considéré que c'est la teneur absolue en hématite qui dirige l'importance de la rubéfaction, voire du fer amorphe associé à de l'hématite (Jouaffre et al., 1991 ; Lamouroux et Ségalen, 1969). Or, les dosages extractifs indiquent l'absence presque totale de fer amorphe (Fe_{Ox}) au sein des échantillons rubéfiés. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que les cristaux d'hématite sont de taille extrêmement fine, ce qui impliquerait que les cristallites ont une organisation atomique plus régulière, et en conséquence des teintes plus rouges (Pailhé et al., 2008). Cela suggérerait également que les températures de chauffe n'ont pas été si élevée que précédemment supposé (< $600^\circ C$?), si l'on considère qu'avec l'élévation des températures, les dimensions des cristaux d'hématite devraient progressivement s'accroître (Cornell et Schwertmann, 2003). Il se peut également

que les cristaux d'hématite formés possèdent dans leurs structures, des substitutions par des groupes hydroxyle ou de l'aluminium, suffisamment marquées pour réduire les intensités des pics d'hématite en DRX (Stanjek et Schwertmann, 1992). L'aluminium « libre », obtenu par l'extraction au CDB, qui s'attaque aux oxydes de fer, correspondrait alors (en partie) non pas à de l'aluminium amorphe, mais aux substitutions structurales de l'hématite. Des analyses à des échelles d'analyses bien plus fines seraient nécessaires pour le démontrer. D'autre part, ces hypothèses suggèrent que les phénomènes post-dépositionnels (remaniements mécaniques ?) ont une influence importante sur la coloration des NR, et en particulier sur l'acquisition des teintes rouges fortement marquées. Cette constatation rejoint les observations micromorphologiques.

5. Discussion

5.1. Modalités de formation des Niveaux Rouges de Limagne

5.1.1. Aspects généraux de la formation des NR

Les caractéristiques micromorphologiques, par l'abondance de résidus de végétaux carbonisés, de même que les caractéristiques géochimiques et minéralogiques, fournissent des arguments très pertinents en faveur d'une combustion de ces niveaux rouges, comme cela était supposé. Néanmoins, l'analyse microscopique met clairement en évidence des traits pédologiques rédoximorphes, qui se surimposent à la rubéfaction thermique.

Le niveau rouge observé en lame-mince est très largement constitué d'une accumulation désordonnée d'agrégats pédo-sédimentaires chauffés à différentes intensités. Cette constitution tranche avec son aspect macroscopique apparemment homogène (et notamment sa couleur). Hormis les traits spécifiques à la combustion et redox, il présente un fond matriciel qui ne semble pas grandement différer des niveaux encaissants. L'homogénéité minéralogique et élémentaire générale des NR et de leurs encaissants confirme qu'ils ne résultent pas d'apports de matériaux exogènes. Les principales différences observées peuvent le plus souvent être attribuées à des altérations thermiques (baisse de la cristallinité, des constituants associés aux matières organiques). L'absence de nets mélanges avec du matériel pédo-sédimentaire non modifié par la chauffe (à l'exception de ceux liés à la pédoturbation, et qui peuvent être finement intégré) et d'une quelconque organisation ou classement granulométrique, alors même que l'épaisseur de sédiments rubéfiés est importante laisse penser qu'ils n'ont pas subi de déplacements latéraux très importants (Bertran et Texier, 1997 ; Mûcher, van Steijn et Kwaad, 2018). La relative hétérogénéité des compositions élémentaires et colorimétriques du niveau à la morphologie discontinue (Gerzat-A23), en comparaison des autres faciès, va aussi dans le sens d'une faible dispersion de ces derniers. À l'échelle de la basse plaine, relativement plane, la répartition de ces NR ne montre aucune logique claire, hormis vraisemblablement une meilleure préservation dans les secteurs à sédimentation « strictement » palustre (US6). Considérant cela, leur apparition sous forme de nappes concentrées et discontinues est difficilement explicable par des concentrations postérieures à la combustion (p. ex. dans des micro-dépressions). Tous ces caractères suggèrent que leur mise en place intervient dans un espace de temps relativement court, unique à l'échelle d'un niveau rouge.

D'autre part, aucun indice probant qui indiquerait un front de combustion *in situ* n'est identifié, tant en microscopie qu'à l'échelle macroscopique. Au contraire, sa limite avec l'unité sous-jacente est généralement bien nette et présente même localement des indices de « troncature » des dépôts antérieurs. Ces caractères sont d'autant plus notables, que les NR sont caractérisés en microscopie par une très importante fragmentation, qui contraste fortement avec l'organisation de l'US6. Cette fragmentation est en partie clairement liée à une activité biologique, mais les morphologies des agrégats suggèrent également un brassage mécanique. Il est néanmoins très difficile de faire la part entre ces deux catégories de processus (Deák et al., 2017 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017). Étant donné la position stratigraphique de ces niveaux rouges, à la base des Terres noires, et l'aspect préservé de l'US6, la possibilité d'un auto-brassage engendré par les alternances de dessiccation-engorgement n'est pas pertinente. Un remaniement mécanique d'origine anthropique, qui n'affecterait ces vestiges que superficiellement, ne peut pas être exclu. Bien que ces dernières observations impliquent que la morphologie originelle des niveaux rouges soit au moins partiellement masquée, nous pouvons en conclure que leur formation résulte d'un apport massif et plutôt rapide de résidus chauffés, et ceci à relativement faible distance de leur lieu de production initial.

5.1.2. Aspects chronologiques et dynamiques

D'autre part, à l'échelle des séquences pédo-sédimentaires, ces niveaux apparaissent le plus généralement (mais pas systématiquement) comme uniques, suggérant un phénomène monophasé. Si leur terminus post quem est calé avec certitude (apports téphriques CF7), leur attribution chronologique invite toutefois à la prudence. En effet, une seule datation absolue directe d'un de ces niveaux a pu être réalisée à ce jour (Chantemerle). De plus, on observe un décalage notable, entre cette datation et celle de l'US6 sous-jacente à un NR d'un autre secteur (Marmilhat), plus récente de quasiment un millénaire (entre les deux extrêmes de probabilités). Un effet vieux bois de la date de Chantemerle est tout à fait envisageable, mais nous n'avons pas plus d'indications sur ce charbon. D'autre part, la chronologie de la base des Terres noires (US4) est, elle-même, assez imprécise. Non seulement les taux de sédimentation au cours de l'Atlantique et au Subboréal seraient globalement très faibles, mais en plus, leur forte pédoturbation rend difficile d'assurer leur chronologie (Ballut, 2001). Étant donné que plusieurs de ces NR sont situés à l'interface entre l'US6 et l'US4, et que les éléments archéologiques présents au sein de cette dernière unité ne sont jamais antérieurs au Néolithique, on peut raisonnablement envisager qu'elles soient contemporaines des premières étapes du Néolithique régional (Néolithique final ou moyen ?), mais ce point doit indispensablement être précisé avec de nouvelles datations absolues (Vernet et al., 2013).

De plus, ces traces sont identifiées sur une surface particulièrement étendue, ce qui contraste avec les résultats qui soulignent leur caractère sub-autochtone. Puisque ces niveaux sont clairement discontinus, mais qu'ils montrent une morphologie générale assez homogène, il faut envisager qu'ils sont les produits de plusieurs « événements » localisés, de nature analogue, possiblement simultanés ou récurrents sur une période assez circonscrite, mais néanmoins longue (échelle pluriséculaire). Cette hypothèse nous semble la plus à même de concilier de telles spécificités.

Par ailleurs, plusieurs indices témoignent conjointement de variations régulières dans la hauteur de la nappe d'eau du secteur (palynologie, diatomées, traits rédoximorphes) aux alentours de sa mise en place. Si durant le Néolithique ancien et moyen l'humidité de la zone semble principalement liée aux variations saisonnières du régime hydrologique (Ballut et al., 2007), les temporalités de cette dynamique, de même que leur variabilité spatiale, restent très imprécises. Les caractéristiques de l'US6 traduisent une humidité nettement plus prégnante que celles de l'US4 postérieure. La préservation de la morphologie des fines lentilles de décantation des matériaux fins (US6) indique une bioturbation très limitée (essentiellement de petites racines) et certainement sans assèchement saisonnier prolongé. A priori, les NR sembleraient donc marquer une rupture avec un assèchement au moins temporaire du secteur, suffisant pour permettre une combustion. Cependant, sur le NR étudié en lame-mince, nous avons vu qu'une partie des dépôts qui le recouvrent sont assez comparables à ceux de l'US6. Il est difficile de dire si ces observations traduisent des évolutions hydro-climatiques à moyen ou long terme, ou si ce NR correspond seulement à un événement très court, ponctuel au sein d'un contexte qui varie assez peu. De plus, nous observons que l'enfouissement des niveaux rouges semble également associé à des phénomènes de ruissellement et de déstabilisation de la couverture pédo-sédimentaire plus « intenses » (apports alluvio-colluvionnés de CF7, qui sont postérieurs ou subcontemporains des dépôts décantés). Mais sur d'autres secteurs, le toit des NR apparaît tantôt nettement bioturbé ou autrement nettement nivelé (Figure 105). Il n'est pas clair si ces différentes morphologies peuvent s'expliquer seulement du fait de variabilités environnementales locales (secteurs plus ou moins humides), ou du fait que ces recouvrements sont asynchrones selon les localités (car les NR ne seraient pas strictement contemporains). Nous manquons donc grandement de précision sur les dynamiques pédo-sédimentaires locales contemporaines de ces traces, tant d'un point de vue spatial que temporel, pour en dire plus.

5.1.3. Particularités relatives à la combustion

La très faible quantité de matériaux organiques carbonisés par rapport à la masse de terre affectée par la chauffe constitue un des caractères éminemment singuliers de ces traces de combustion. L'analyse micromorphologique confirme cette observation, mais il est évident que cette approche ne permet d'observer qu'une surface relativement réduite par rapport aux dimensions des phénomènes. Cela étant, aucun charbon de bois n'est clairement reconnu sur les lames-minces. Bien que l'on ne puisse pas exclure que des restes carbonisés inidentifiables puissent correspondre à des bois très fortement fragmentés, aucun indice ne va dans ce sens. Au vu de la présence récurrente des indices de végétaux non ligneux carbonisés, il nous semble peu probable que cette absence puisse uniquement s'expliquer par des biais de préservation différentielle (pédoturbation ou dissolution) de ces témoins de combustion (Huisman et al., 2012 ; Mallol, Mentzer et Miller, 2017). D'autre part, compte tenu du contexte pédo-sédimentaire de plein air et très humide, les éventuelles cendres de bois et leurs pseudomorphoses calcitiques produites, auraient très probablement été dissoutes (Canti et Brochier, 2017). Néanmoins, il n'en reste pas moins que les phytolithaires sont quant à eux particulièrement fréquents, et cela bien que l'on se trouve dans un contexte où les sols sont relativement influencés par le calcium, a priori moins propice à la préservation de ces restes siliceux (Canti, 2003). Tous les phytolithaires ne peuvent être assurément associés à la combustion, car il est possible qu'une partie fût présente avant la chauffe, mais de nombreux d'entre eux sont nettement noircis, ce qui résulte de la combustion (même si ce type d'altération n'est pas systématique et semble varier selon les conditions de chauffe ; Parr, 2006 ;

Vrydaghs, Devos et Pető, 2017). Ces éléments nous amènent à la conclusion que les Poacées, s'ils n'étaient pas assurément le seul combustible, ont possiblement joué un rôle majeur lors de la combustion. Une analyse spécifique des phytolithes des niveaux rouges serait donc très pertinente. Cette hypothèse prend tout son sens confrontée aux trop rares données palynologiques ayant pu être acquises dans le Grand Marais, qui montrent un milieu assez ouvert, et où les taxons herbacés et les graminées sont abondants (US6 et NR).

Les teintes rouges relativement homogènes à l'échelle macroscopique des NR indiquent des combustions en conditions majoritairement suffisamment oxydantes. Ce fait pourrait peut-être expliquer la rareté des charbons, de ligneux ou non, par leur combustion. En outre, à l'échelle microscopique, le fait que les résidus carbonisés soient identifiés dans la matrice sédimentaire désagrégée, mais pas au sein des agrégats rubéfiés, nous semble être un bon argument pour attester du caractère unique de la chauffe. D'autre part, bien que les fortes colorations des NR pouvaient laisser supposer une chauffe de très forte intensité, nous n'avons pas identifié d'éléments qui vont clairement dans ce sens. Sur la base des résultats minéralogiques, nous pouvons proposer sur une base théorique (bibliographie) que les sédiments rubéfiés aient possiblement été chauffés au-delà de 600°C, mais vraisemblablement pas au-delà de 800°C. Cette hypothèse reste cependant largement discutable. Le principal argument qui suggérerait des températures de cuisson au-delà de 600°C, est celui de la présence d'hématite bien cristallisée (Cornell et Schwertmann, 2003, p. 367-368). Néanmoins, ce seuil est un seuil théorique général, car le développement de l'hématite avec la chauffe est un phénomène progressif, et qui peut nettement varier selon la nature des constituants précurseurs (Brodard et al., 2016 ; Canti et Linford, 2000 ; Röpke et Dietl, 2017 ; Terefe et al., 2008).

5.1.4. Rubéfaction et évolution post-dépositionnelle

Nous avons vu que les plus fortes teintes rouges n'étaient pas linéairement associées à l'abondance de l'hématite bien cristallisée, telle que perçue à travers les spectres de DRX. De plus, en microscopie, il apparaît de manière récurrente des traits redox qui semblent indiquer des migrations extrêmement localisées du fer, et la précipitation de particules conférant des teintes rouge très vif, qui sont logiquement liées à la présence des cristaux d'hématite puisque le fer amorphe est quasi absent (ce qui n'exclut pas que d'autres formes cristallines du fer existent en très faibles quantités, ou soient masquées par l'hématite, p. ex. de la goethite apportant très localement des teintes plus ocrées). Leur localisation préférentielle en revêtement des agrégats, mais surtout dans le faciès fortement désagrégé du NR, va clairement dans le sens d'une cristallisation postérieure à la chauffe. La question que nous posent ces résultats est la suivante : est-il possible, dans ce contexte précis, que l'hématite ou une partie de celle-ci ne résulte pas directement de la chauffe, mais d'une cristallisation post-dépositionnelle ?

Sans la chauffe, l'apparition de l'hématite est très improbable compte tenu du contexte climatique et pédologique très humide, mais également de la présence des matières organiques inhibantes. Par contre, elle a pu produire des formes cristallines plus ou moins bien ordonnées qui pourraient être le support de cette cristallisation secondaire (ferrihydrite ? protohématite ?). La différenciation texturale et structurale des NR (pseudo-particules micro-agrégées) par rapport à leurs encaissants très argileux, doit être à l'origine d'une dynamique de l'eau qui se distingue du reste du profil, avec un ressuyage

relativement accéléré par l'amointrissement de l'adsorption de l'eau sur ces particules (l'activité de l'eau diminue ; Didier et al., 1985 ; Trolard, 1988). Ces conditions pourraient avoir été particulièrement favorables à la cristallisation d'hématite (Michalet, Guillet et Souchier, 1993 ; Cornell et Schwertmann, 2003, p. 445). En outre, l'enrichissement en aluminium « libre » résultant de l'altération thermique des aluminosilicates (Al_{OX}), va également créer des micro-conditions très particulières, qui ont aussi pu favoriser la formation d'hématite par rapport à celle de la goethite (Cornell et Schwertmann, 2003, p. 399). Théoriquement, le pédoclimat spécifique des niveaux rouges a donc pu permettre la cristallisation de l'hématite. Si l'on y ajoute le facteur temps, au moins de quelques millénaires, une telle évolution, bien qu'assez originale, paraît possible. C'est la seule hypothèse que nous ayons trouvée pour concilier les résultats « contradictoires » de la micromorphologie, de la colorimétrie, des formes du fer et de la minéralogie. Cette hypothèse permettrait de plus d'expliquer l'échec de la datation thermoluminescence des sédiments rougeâtres, qui résulterait d'une chauffe insuffisante (comm. pers. Didier Miallier). La méthode nécessite normalement des températures de cuisson supérieures à environ 400-500°C (Bassinot, 2007).

5.2. Interprétation : l'écobuage

La répartition géographique bien particulière des NR, clairement associés aux anciens marais et dissociés des occupations archéologiques pénée-contemporaines, pourrait de prime abord, amener à penser qu'ils résultent de phénomènes naturels. Cependant, du seul point de vue morphologique, ces traces ne sont pas compatibles avec celles de feux naturels ordinaires. Elles se distinguent également des produits associés à des événements naturels exceptionnels de fortes intensités, comme les strates rubéfiées et leurs épaisses couches de verres naturels, identifiées dans les anciennes zones humides du désert d'Atacama, et datées de la fin du Pléistocène (dont l'origine est par ailleurs vivement débattue, incendies naturels ou événement cosmique : Roperch et al., 2017, 2022 ; Schultz et al., 2021, 2022). Les résultats obtenus n'indiquent pas que les sédiments auraient subi des chauffes de très haute intensité, d'ailleurs ceux-ci ne sont en aucun cas vitrifiés. Nous réfutons l'hypothèse cosmique, qui en sus, ne fournit aucune explication vis-à-vis des autres particularités de ces traces (Courty, 2017).

Au contraire, l'hypothèse de fourneaux d'écobuages apparaît tout à fait cohérente avec de tels vestiges, tant du point de vue de la nature de ces produits, que de leur morphologie et leur répartition spatiale. Nos résultats indiquent que les NR résultent d'apports importants, relativement localisés et monophasés (à l'échelle d'un niveau), tout en étant identifiés sur une surface particulièrement vaste. Ces caractéristiques sont pertinentes avec l'hypothèse de dépôts liés au démantèlement secondaire de structures de chauffe. Dans le cadre de l'écobuage, les combustions sont répétées en un grand nombre de points, produisant des vestiges relativement similaires sur des surfaces étendues. Cela permettrait d'expliquer la difficulté à identifier une logique de préservation des NR selon des critères uniquement géomorphologiques (p. ex. altitude ou concentrations dans des surcreusements). L'observation d'une limite assez nette, voire parfois abrupte, à la base des niveaux rougeâtres, est également un argument consistant, puisque cette technique débute par un pelage extensif de la surface du sol. Dans un second temps, suite à la combustion, les produits seront redéposés relativement rapidement sur ces surfaces, ce qui devrait créer une discontinuité relativement nette, tel qu'on l'observe pour les NR. La nature des produits retrouvés, formés pour l'essentiel de terre chauffée en conditions oxydantes et associées à de

nombreux résidus microscopiques de Poacées, correspond également bien avec l'hypothèse de l'écobuage, qui concerne avant tout les milieux herbacés et engendre la cuisson d'une portion très importante du sol. Suite à cette opération, des labours d'enfouissement superficiels, limités à l'épaisseur du niveau de combustion, vont alors le remanier sur toute son épaisseur, tout en préservant globalement la limite de base du décapage initial. En effet, dans le cas où l'opération a concerné un volume important de sol, il n'est nullement attendu que les travaux aratoires postérieurs (pour l'enfouissement des semences) s'opèrent plus profondément. Puis, la reprise de l'activité biologique, qui est possiblement stimulée par cette pratique, résulte également en un mélange de ces résidus. Ainsi, tant que ces produits ne seront pas recouverts, la bioturbation a pu être principalement concentrée dans ces niveaux, où les conditions sont plus propices que les niveaux argileux et plus humides sous-jacents. Cela expliquerait le caractère fortement brassé « sur lui-même », réintégrant finalement peu de matériaux encaissants. C'est seulement dans un second temps, suite au recouvrement progressif par les dépôts de ruissellement formant l'US4, que d'autres bioturbations notables se développeraient, comme des cavités de petits mammifères venant perforer et mélanger encore ces traces. Enfin, les fluctuations locales de la nappe d'eau vont mener à la formation de traits rédoximorphes et accentuer les teintes des NR. La Figure 121 illustre la séquence événementielle que nous restituons sur la base de ces résultats.

Les NR de Limagne correspondent donc parfaitement, selon nous, aux produits théoriques des écobuages dits des croûtes terreuses, en ce sens qu'un volume de terre assez important entre en jeu dans le processus de chauffe. La mise en évidence de pollens de céréales à Marmilhat, dans le niveau rubéfié et l'unité sous-jacente, amène une validation extrinsèque, mais non négligeable vis-à-vis de cette interprétation. En effet, leurs taux sont relativement importants, ce qui suggère que les prélèvements correspondent aux lieux mêmes ou à faible distance des terrains cultivés.

L'écobuage n'est pas, en règle générale, une opération récurrente à l'échelle d'une même parcelle. Et les spécificités de ces traces s'accordent aussi plutôt bien avec cette interprétation : traces ponctuelles, monophasées, correspondant à un épisode relativement court à l'échelle des dynamiques pédo-sédimentaires. Néanmoins, faut-il considérer que ces traces n'indiqueraient qu'une mise en culture unique, et qu'après la récolte, les terrains seraient ensuite abandonnés ? Deux observations nous questionnent plus particulièrement sur cet aspect. Tout d'abord, celui du très fort brassage de l'unité, qui paraît concentré dans cette dernière. Les agrégats sont très finement divisés et montrent une morphologie très irrégulière et souvent sub-anguleuse. Nous doutons que ces spécificités puissent seulement résulter de l'activité biologique. Ensuite, c'est la présence, bien qu'en faible nombre, des revêtements argileux et poussiéreux qu'il serait tentant d'interpréter comme des agricutanes (Jongerijs, 1970 ; Kühn et al., 2018 ; Deák et al., 2017). Ces indices ne constituent néanmoins pas des preuves univoques, d'autant que pour le moment nous n'avons pas de référentiel sur de tels vestiges. De plus, la chronologie des possibles agricutanes est également difficile à assurer. Malgré tout, a posteriori de notre interprétation, la possibilité que ces traits pédologiques illustrent des activités agricoles plus longues que l'écobuage en lui-même ne peut être passé sous silence.

Nous proposons donc, à titre d'hypothèse de travail alternative à celle d'une mise en culture unique, que l'écobuage intervienne certes comme méthode de préparation initiale de terrain, mais ait été suivi de quelques années de mise en culture postérieures. Suivant cette hypothèse, il faudrait considérer que la préparation du sol et les modifications morphologiques apportées par l'écobuage initial,

potentiellement assez profond, auraient permis de se passer de travaux aratoires ultérieurs plus profonds (voir Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007). En outre, la possibilité de mises en cultures répétées nous paraîtrait plus pertinente vis-vis de la relative abondance des pollens de céréales. De plus, on peut même envisager qu'une répétition des travaux aratoires ait joué un rôle dans l'accroissement de la cristallisation des oxydes de fer (Li et Richter, 2012). Quant à l'hypothèse d'une exploitation post-culturale des terrains, par exemple pour le pâturage, nous n'avons pas vraiment d'arguments matériels. Un seul trait microscopique excrémental est identifié, ce qui est trop peu pour en conclure quoi que ce soit. En tous cas, qu'il y ait eu une ou plusieurs années de culture, nous considérons bien qu'il s'agit là de pratiques agricoles temporaires. Après exploitation, les terrains auraient ensuite été abandonnés.

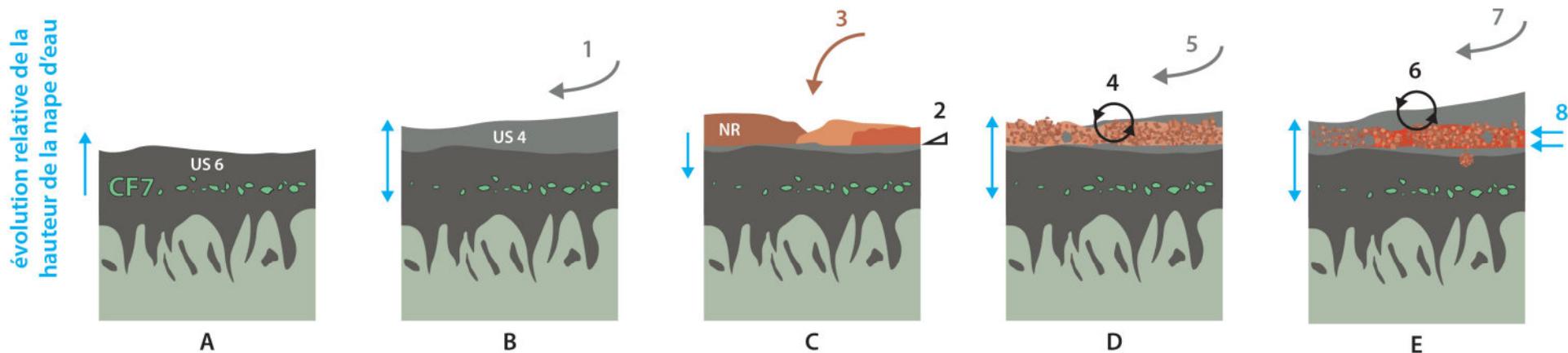
5.3. Quelques remarques et hypothèses

Les données géoarchéologiques et paléoenvironnementales nous indiquent qu'au moment des événements d'écobuage, et même tout au long du Néolithique (et de l'âge du Bronze), les terrains devaient être encore fortement marqués par l'humidité, avec des engorgements au moins saisonniers. En outre, les premiers siècles du Néolithique ancien sont caractérisés par un relatif refroidissement du climat et une hausse de l'humidité (Figure 107). Les « écobueurs » ont nécessairement dû s'adapter à ces contraintes, et, on ne peut que le supposer, profiter de périodes d'assèchements plus marquées pour mener à bien ces mises à feu. Mais à quelle échelle temporelle ? Le risque d'un engorgement saisonnier devait être grand et difficilement prévisible. Les traces observées en lames minces montrent bien un enfouissement sous une nappe d'eau prolongée et une reprise de la sédimentation palustre. Il est à ce stade impossible de dire si ces activités correspondent à des périodes effectivement prolongées de « sécheresse » ou si elles étaient menées en dehors de ces conditions, autrement dit, en dépit des risques d'échec de l'opération de brûlage (quoique moindre si elles étaient conduites en été) et surtout pour les plantations (risque de verse, amoindrissement des récoltes).

L'incertitude chronologique vis-à-vis de ces vestiges nous limite grandement pour les interpréter en relation avec les occupations archéologiques du secteur. C'est bien dommage, car il serait intéressant de savoir si ces pratiques seraient plutôt associées aux occupations du Néolithique ancien – dont les difficultés à les appréhender archéologiquement peuvent être mises en parallèle avec une emprise peu marquée sur leur environnement – ou plutôt à celles du Néolithique moyen – dont les occupations paraissent traduire une fixation plus marquée sur le territoire (Saintot et al., 2015) – ou autrement encore, ne seraient pas spécifiquement associées à l'une ou l'autre de ces différentes cultures. Si l'on peut raisonnablement exclure la datation ancienne obtenue dans le secteur de Marmilhat, dont la marge d'erreur est trop grande, nous pouvons tout de même faire l'hypothèse que les techniques agricoles de cuisson en fourneau étaient connues et pratiquées dès la période du Néolithique ancien (même avec un effet de vieux bois de plusieurs siècles). D'autre part, la superficie sur laquelle ces traces sont reconnues est très vaste, même si elles ne forment pas un maillage continu : environ une quinzaine de kilomètres carrés (1500 ha ; en excluant le site de Ménérol). À titre de comparaison, la très large majorité des exploitations agricoles en France, avant la Première Guerre mondiale, ne dépassaient guère la dizaine d'hectares (Madeline et Moriceau, 2012 ; Delleaux, 2015). Ces traces illustrent donc incontestablement de nombreuses opérations, ponctuellement répétées en différents lieux des marais. Il nous paraît donc tout à fait plausible qu'elles s'étalent en réalité sur un temps très long, potentiellement sur plusieurs

décennies voire même quelques siècles. La chronologie stratigraphique de ces dépôts n'est pas contradictoire avec cette hypothèse.

Les documents archéologiques concernant le Néolithique ancien de la plaine clermontoise sont trop indigents pour nous renseigner sur leurs activités agropastorales, mais un plus grand nombre d'indices existent pour le Néolithique moyen (Delrieu, 2023). Le schéma très général proposé pour cette période est celui d'une importance assez marquée de l'élevage, et en particulier de l'exploitation bovine, comme ressource alimentaire ou pour ces produits secondaires (Saintot, Ballut, et al., 2016 ; Saintot et al., 2012 ; voir aussi la nécropole de Pontcharaud dans Goude et al., 2013). L'image d'une vaste plaine de Limagne humide, bordée de prairie, avec quelques secteurs de pré saumâtres potentiellement très appétant (Bensettiti et al., 2005 ; Weller, 2006), concourt à l'interprétation de sociétés pour lesquelles l'élevage occupe une place forte vis-à-vis de l'agriculture, comme cela semble d'ailleurs être le cas dans d'autres régions (Beeching et al., 2000). L'existence de sites de chasse spécialisés dans l'acquisition de l'auroch au Mésolithique récent prolonge cette image d'une grande plaine très ouverte (Fontana, 2003 ; Saintot et Pasty, 2004). Néanmoins, pour ce qui concerne la période Atlantique, les données paléo-environnementales sont encore trop frustes pour vraiment confirmer ce modèle, qui pose en outre diverses questions quant à leur origine, leur persistance et l'implication de l'activité volcanique et surtout des interventions humaines dans ces paysages (Raynal, Vernet et Vivent, 1998 ; Vivent et Vernet, 2001). Mais admettons cette hypothèse. Dans un tel contexte, une des questions que l'on peut alors se poser est celle de la place de l'écobuage dans la dynamique globale de l'évolution et de l'exploitation de ce milieu spécifique. Concrètement, est-ce que ces écobuages ont pu avoir un lien étroit avec l'élevage, en permettant un relatif assèchement des terrains et le renouvellement des prairies – les cultures seraient alors en quelque sorte associées à un « système herbager » (Sigaut, 1975) – ou au contraire, est-ce qu'ils traduiraient l'existence d'agricultures largement indépendantes des pratiques pastorales et tout spécialement orientées en vue d'une production agricole céréalière (Portères, 1972) ?



Développement de l'US6	Amorce de la formation de l'US 4	Écobuage (Mise en place des matériaux des NR)	Mise en culture, et activités post-culturelles ?	Enfouissement et évolutions post-dépositionnelle
Dépôts progressifs et lents de matériaux fins et de résidus végétaux dans un milieu largement saturé en eau de type palustre ; Dynamique entrecoupée par les apports téphriques CF7 ; Dégradation lente des MO et altération contrainte ; Développement d'un milieu ouvert de type prairie ? Et premiers enregistrements de Céréales	Mise en place des colluvions fines (anthropiques ?) par ruissellements diffus (1) ; Milieu avec fluctuations saisonnières du niveau d'eau, alternance d'engorgements-dessèchements favorisant l'activité biologique et l'amorce de pédogenèse, mais altération très modérée	Écobuage à la faveur d'une baisse du niveau d'eau (saisonnière ou prolongée ?) avec : Décapage du sol induisant localement une troncature (2) ; Rapidement suivi d'apports massifs de terre chauffée (principalement en conditions oxydantes), correspondant aux produits des fourneaux démantelés (3) ; Mise en culture sans travail du sol, ou très superficiel	Forte fragmentation des NR liée à des travaux aratoires superficiels puis à l'accroissement de l'activité biologique (4) ; Localement, poursuite possible des activités culturelles et remobilisation et re-dépôts à faible proximité des NR ; Poursuite du colluvionnement de l'US 4 dans des conditions plus ou moins humides (5) associés à des déstabilisations de la couverture pédologique amont ; Abandon des terrains (valorisation pastorale ?).	Poursuite de la pédoturbation (6) et de l'accrétion sédimentaire (7) ; Les modifications morpho-texturales des NR engendrent un régime différencié de la dynamique de l'eau (8 : humidité moins forte, ressuyage accéléré) et favorise la migration et la cristallisation de particules d'hématite « ultrafine » et l'acquisition de teintes rouge vif ; en d'autres endroits, les traces sont progressivement et définitivement disparues.

Figure 121 : Schéma de la formation des NR de Limagne selon l'hypothèse de l'écobuage.

Partie 8 :
Un niveau rubéfié au sommet
du Puy de Dôme (Puy-de-Dôme)

1. Préambule

Au cours de notre recherche des niveaux rouges dans le secteur de Limagne, Didier Miallier¹⁰⁹ nous a mentionné le repérage ponctuel d'anomalies rubéfiées dans les sols du plateau des Dômes. L'une d'entre elles a retenu notre attention, de par sa situation géographique tout à fait singulière, sur le sommet du Puy de Dôme, vers 1420 m d'altitude. Elles ont été identifiées en 2007, lors de l'aménagement du train à crémaillère qui dessert le sommet du mont (sans prescription archéologique). Dans cette situation, l'hypothèse de phénomènes d'oxydo-réduction peut raisonnablement être écartée. Ces traces ont été, comme les niveaux rouges de la plaine de Limagne, interprétées comme résultant d'un phénomène radiatif de haute énergie d'origine cosmique ou lié à des plasmas atmosphériques, en particulier de la foudre (comm. pers. M.-A. Courty). D. Miallier a réalisé quelques caractérisations analytiques de ces résidus, sans relever de traceurs qui pouvaient indiquer de tels phénomènes. Le problème posé par ceux-ci étant qu'ils apparaissent finalement peu différents de la matrice dans laquelle ils sont inclus. Nous reprenons la documentation et présentons nos résultats sur les restes de prélèvements que nous a confiés D. Miallier.

2. Contexte géomorphologique et caractères macroscopiques

Le Puy de Dôme est un cumulo-dôme volcanique érigé il y a environ 11 000 ans (Boivin et al., 2017). Il s'élève à 1465 m de haut et surplombe le plateau des Dômes d'environ 500-600 m d'altitude. Il possède une morphologie assez singulière, avec une surface sommitale relativement tabulaire, voire légèrement déprimée en son centre, et des pentes assez abruptes (Figure 122). Il est dominé par une surélévation, où se dressent l'actuel laboratoire météorologique et le pylône de télédiffusion. Sa formation est le fait de plusieurs événements, qui possiblement se déroulent à l'échelle de quelques dizaines d'années seulement (Boivin et al., 2017). La dernière éruption du Puy de Dôme est datée vers 10700 cal. BP, fossilisant localement un paléosol possiblement âgé de quelques siècles (Miallier et al., 2010 ; Raynal, Vernet et Vivent, 1998). Le mont est ensuite largement recouvert par les projections de plusieurs éruptions provenant du cratère Kilian mises en place vers 9530-9310 cal. BP (Miallier et al., 2004, 2010). C'est à partir de ces dépôts pyroclastiques que la formation d'un nouveau sol s'opère, au sein duquel les traces rubéfiées ont été identifiées. Il s'agit d'un Andosol, certainement de type Silandosol, c'est-à-dire développé par une hydrolyse relativement rapide des verres volcaniques (Quantin, 2004 ; AFES, 2009).

Les traces rubéfiées ont été identifiées sur le flanc sud du mont, à une altitude d'environ 1410-1420 m, avant la rupture de pente (Figure 123). Elles apparaissent à 20-30 cm environ au-dessus des dépôts du Kilian. Elles se présentent sous forme de traces ponctuelles ou d'une unité discontinue d'environ cinq centimètres d'épaisseur, de teinte rouge-orangé qui se démarque très nettement au sein du sol gris-noirâtre. Elle apparaît globalement très homogène en termes de coloration. Elle possède des limites plus ou moins irrégulières et diffuses, mais en certains endroits, leurs limites basales sont

¹⁰⁹ Université Clermont Auvergne, CNRS, IN2P3.

particulièrement franches (Figure 123.e). Leurs bordures latérales semblent même littéralement tranchées (Figure 123.c et e). De plus, on observe à leur sommet, des formes en coins qui font la limite avec les matériaux encaissants, et au-dessus desquelles, des matériaux rubéfiés sont dispersés sous forme de concentrations irrégulières. L'une d'entre elles présente une morphologie ondulée et paraît dédoublée (Figure 123.e).

Latéralement, il a également été relevé un mince niveau brunâtre clair, très diffus et irrégulier, qui marque une nette discontinuité dans le sol (Figure 123.f). La partie inférieure est noirâtre et présente une sur-structure à tendance polyédrique, tandis que la partie supérieure est nettement plus claire, grisâtre, avec un faciès macroscopique continu, sans structuration apparente. La question se pose si ce liseré brunâtre résulte d'un phénomène similaire, et le cas échéant de sa contemporanéité, car il se présente dans un sol plus développé. La question de l'origine même de cette discontinuité reste également en suspend (sédimentaire colluviale ou pédologique ?).

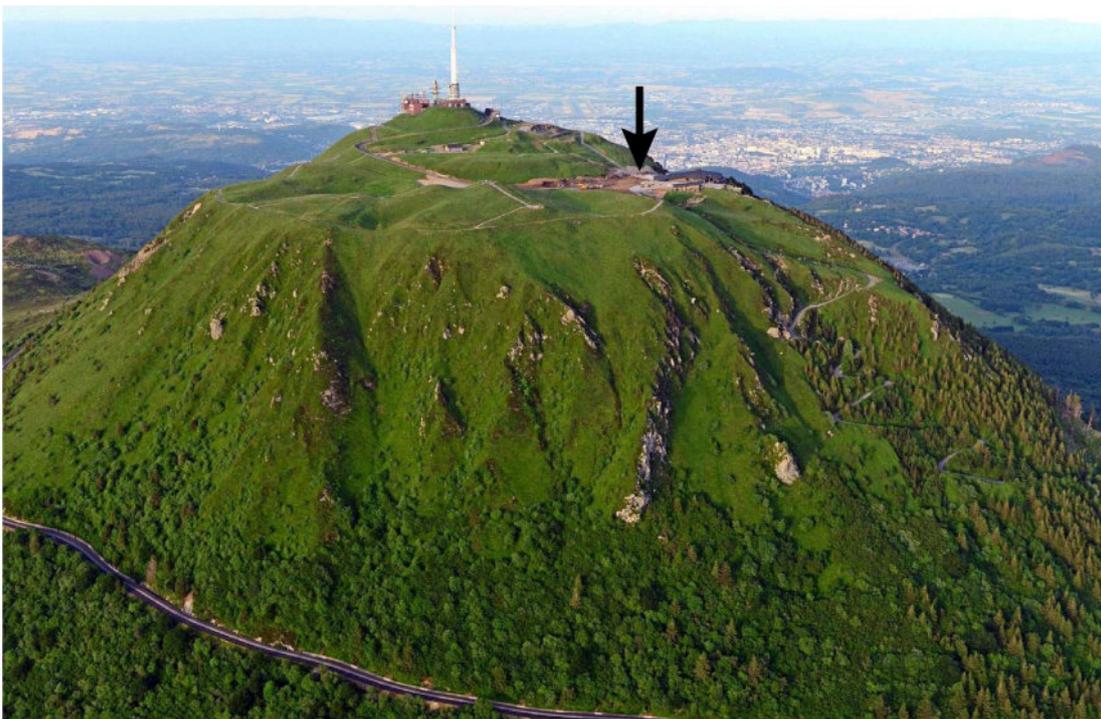


Figure 122 : Situation sur le Puy de Dôme des traces rubéfiées indéterminées identifiées.

En arrière-plan, Clermont-Ferrand et la plaine de Limagne (crédit photographique : Atelier Villes & Paysages ; <https://www.villesetpaysages.fr>).

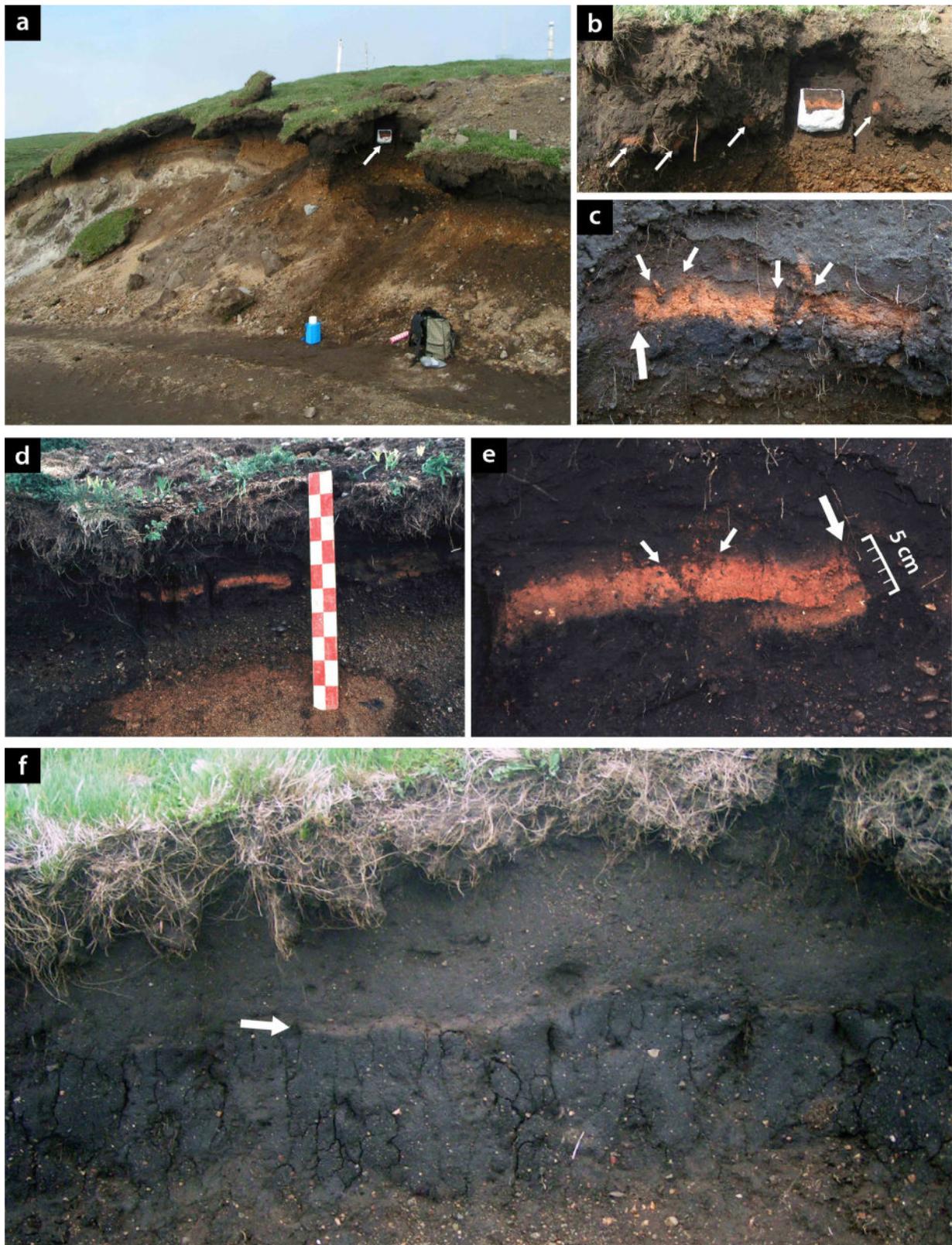


Figure 123 : Illustrations des anomalies rubéfiées du sommet du Puy de Dôme (crédits photographiques : Didier Miallier).

(a) Contexte général de l'observation des traces rubéfiées.

(b et c) Vue rapprochée des mêmes traces. Noter leur caractère discontinu, mais à des profondeurs comparables.

(d et e) Photographies d'une autre trace adjacente aux contours ondulés, mais très nets avec l'encaissant. Noter en particulier la bordure de droite coupée sub-verticalement et la limite supérieure en coin.

(f) Autres traces brunâtres (légèrement rubéfiées ?) qui marquent une nette discontinuité texturale du profil.

3. Résultats

3.1. Compositions élémentaires totales (p-XRF)

La Figure 124 présente les résultats des compositions élémentaires de l'unité rubéfiée, des matériaux de l'andosol encaissant et à titre de comparaison, d'un petit fragment de trachyte provenant du prélèvement. Pour les sédiments, les analyses ont été opérées sur la terre fine, tandis que pour la roche, la mesure est effectuée sur l'échantillon total, non broyé. Il faut également considérer que les matériaux encaissants possèdent une fraction grossière (> 2 mm) d'environ 15 % et surtout qu'ils sont assez riches en matières organiques, estimées à près de 21 % (PAF). Les matériaux rubéfiés étaient insuffisants pour cette analyse. Cette teneur en matière organique est tout à fait moyenne pour le type de sol considéré (AFES, 2009, p. 75).

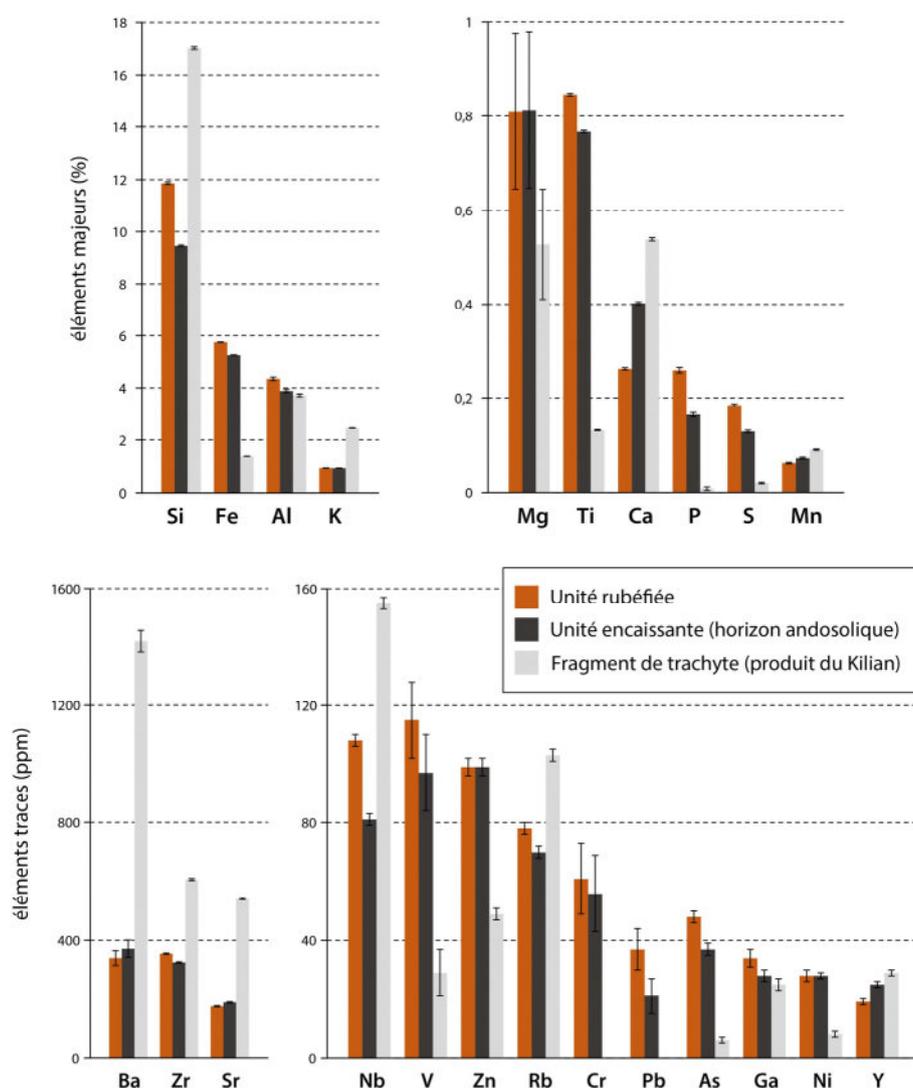


Figure 124 : Compositions élémentaires majeures et traces (p-XRF) des échantillons du sommet du Puy de Dôme.

Les compositions géochimiques de l'unité rubéfiée et de son encaissant sont globalement très proches. Il n'y a visiblement pas d'enrichissement en fer. L'unité rubéfiée se distingue seulement légèrement par des teneurs en silicium (Si) et en phosphore (P) plus hautes, et plus basses en calcium (Ca). Les autres différences observées sont assez mineures. Le P plus élevé est cohérent avec le caractère rédoxique de l'unité rubéfiée. Par contre, on relève que le soufre (S), qui est généralement associé aux matières organiques et commence à se volatiliser à des seuils de températures assez bas (Bodí et al., 2014 ; Sanborn et Ballard, 1991 ; Tiedemann, 1987), se montre légèrement plus élevé dans l'échantillon rubéfié.

Pour le fragment de trachyte, le rapport $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (éléments bien quantifiés avec la calibration employée) est comparable à celui indiqué pour les trachytes du Kilian (Boivin et al., 2015). Le fragment présente une meilleure représentation en silicium et en métaux alcalins (K, Rb) et alcalino-terreux (Ca, Ba, Sr) que les sédiments. Ce résultat est cohérent avec la dynamique d'altération géochimique attendue dans ce contexte drainant, puisque ces éléments sont les plus susceptibles d'être exportés en solution.

3.2. Caractérisation minéralogique (DRX)

La Figure 125 présente les courbes de diffractions interprétées des échantillons de l'unité rubéfiée et de l'unité encaissante. Les analyses correspondent aux fractions de terre fine (< 2 mm). Les deux échantillons sont principalement dominés par des feldspaths. Il est possible d'identifier assez clairement le signal de l'oligoclase (plagioclases), mais aussi de l'anorthoclase (feldspaths alcalins), bien que légèrement moins marqué. La présence d'amphibole est assez bien définie par son pic principal à $10,5^\circ$, mais ces pics secondaires sont peu marqués ou se superposent à ceux d'autres cristallites. Plusieurs phyllosilicates sont identifiés : de la vermiculite, de la kaolinite et une variété micacée, à plus forte présomption de la biotite. Bien que tous dans des proportions très faibles par rapport à l'échantillon total, la comparaison des intensités montre que les pics principaux de la vermiculite et de la biotite/illite sont inférieurs dans l'échantillon rubéfié. On observe de plus, uniquement sur le diffractogramme de l'encaissant, une raie très bien marquée à $42,1^\circ$ ($2,15 \text{ \AA}$; codé S sur le diffractogramme) pour laquelle aucun modèle minéralogique satisfaisant vis-à-vis des autres pics n'a pu être trouvé. Nous suspectons qu'elle corresponde à une variété de smectite, dont les autres pics majeurs aux angles de diffraction les plus aigus, ne sont pas identifiables sur les diffractogrammes (voir Brindley et Brown, 1980). Du quartz est présent et plutôt bien défini, mais on identifie également une autre forme de cristaux de silice, de la cristobalite polymorphe de très haute température de la silice. Sa signature cristallographique n'est pas évidente à identifier, car elle est quasiment définie par une unique raie de diffraction à $21,9\text{-}22^\circ$. Elle est reconnue par les incohérences des pics de l'oligoclase qui s'y superpose. Elle est faible, mais bien identifiable dans l'échantillon rubéfié, mais elle est incertaine dans l'unité encaissante. La cristobalite est un minéral commun des roches trachytiques, mais il semblerait qu'elle puisse également se développer au cours de la pédogenèse à partir des cendres volcaniques (Mizota, Toh et Matsuhsa, 1987 ; Boivin et al., 2015, 2017). Des clinopyroxènes sont également identifiés, mais aucun modèle de référence n'est totalement satisfaisant, il s'agit possiblement d'un pyroxène de type diopside. Les autres minéraux identifiés sont accessoires et mal définis. Il existe certainement de la titanomagnétite, mais ces pics secondaires sont très évasés, et de manière très incertaine, de l'ilménite (oxyde de fer et de titane).

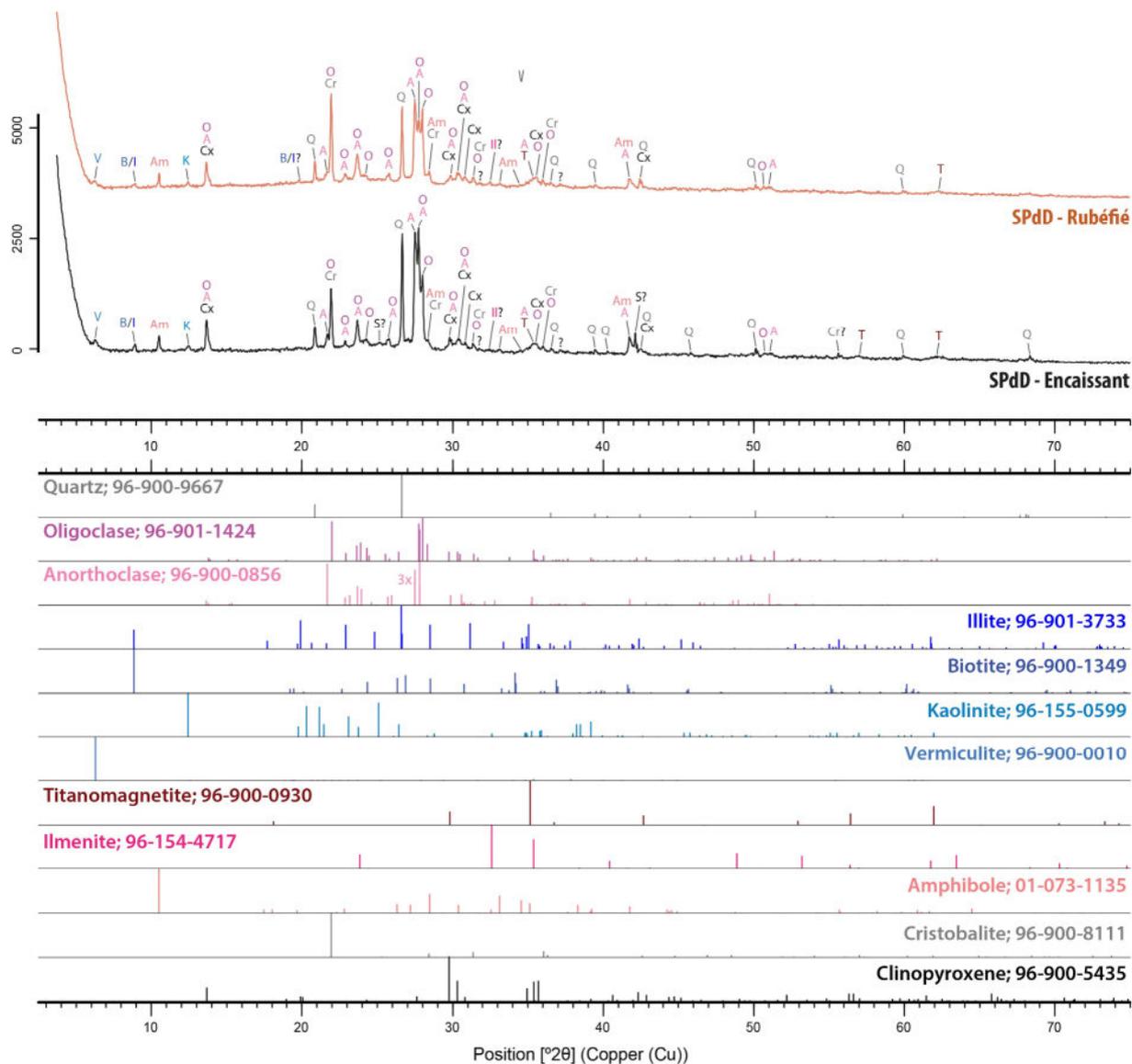


Figure 125 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons du mont Dôme et des modèles de référence des minéraux identifiés.

Les compositions minéralogiques des deux échantillons sont cohérentes avec les assemblages pétrographiques des trachytes locaux, et notamment du Kilian (Boivin et al., 2015, 2017 ; Colombier et al., 2020). Ces compositions évoquent vraisemblablement un horizon d'andosol encore relativement peu évolué (Hétier, Yoshinaga et Weber, 1977 ; Dahlgren, Shoji et Nanzyo, 1993 ; Raynal, Vernet et Vivent, 1998). Dans ce type de contexte, la vermiculite et la smectite sont considérées comme les premiers minéraux argileux qui sont néoformés (ibid.). La grande similarité des deux échantillons est tout à fait notable. Ils se distinguent seulement de façon claire par l'absence de la vraisemblable smectite (à vérifier par des analyses sur la fraction granulométrique argile), ainsi qu'une cristallinité globalement plus faible de l'échantillon rubéfié. En effet, à l'exception de la cristobalite, les constituants cristallins sont sinon équivalents, légèrement moins bien représentés (feldspaths, quartz, biotite, vermiculite). Ce phénomène, bien que peu marqué, pourrait s'expliquer par la chauffe.

L'autochtonie de l'unité rubéfiée est donc confirmée, mais outre l'absence (ou la disparition ?) de la smectite, les assemblages minéralogiques ne fournissent pas d'indices décisifs en faveur d'une cuisson, ou du moins d'une cuisson d'intensité suffisamment élevée pour affecter clairement les minéraux présents. On notera que généralement, la kaolinite et la biotite commencent à se déshydroxyler à partir de 400°C (Karathanasis et Hajek, 1982 ; Karathanasis, 2008 ; Smykatz-Kloss, Heide et Klinke, 2003). Les smectites et certaines vermiculites subissent une déshydratation autour de 250-300°C, mais celle-ci ne mène pas toujours à une déstructuration irréversible de ces édifices (Harris et al., 1992 ; Reid-Soukup et Ulery, 2002 ; Karathanasis, 2008 ; Ma et al., 2019). Ajoutons enfin que nous n'identifions pas d'hématite qui expliquerait la teinte nettement rouge de l'unité.

3.3. Cuissons expérimentales

Suffisamment de matériaux encaissants étaient disponibles pour réaliser une série de cuissons expérimentales. La Figure 126 présente synthétiquement les résultats colorimétriques obtenus. Que cela soit pour les teintes (a^* , b^*) ou la clarté (L^*), les modifications engendrées par la chauffe présentent un schéma d'évolution comparable. On peut observer la distinction de deux groupes d'échantillons. D'un côté, ceux chauffés à 200-300°C, très proches des matériaux encaissants non chauffés, et de l'autre, ceux chauffés à 500°C et au-delà. Les échantillons cuits à 800°C se distinguent toutefois nettement (quelle que soit la durée de chauffe), avec une augmentation forte de la teinte rouge par rapport au jaune (rapport a^*/b^*). Ceci traduit certainement la cristallisation d'hématite bien ordonnée, comme l'indiquent les dérivées premières des courbes spectrales à cette température (forte réflectance vers 545-575 nm). Les seuils de températures de 400 et 450°C font la jonction entre les deux pôles de températures, basses et hautes. Pour ces dernières, et plus particulièrement encore pour 400°C, le temps de cuisson apparaît comme un paramètre très discriminant des variations colorimétriques. Une chauffe d'une heure à 400°C n'engendre pas de changement significatif par rapport aux échantillons non chauffés ou à basses températures, alors que suite à des chauffes prolongées, les colorations évoluent très fortement.

La projection colorimétrique de l'unité rubéfiée se superpose nettement avec les courbes des séries de cuisson expérimentales. Pour le graphique des teintes, l'échantillon est quasiment superposé à trois modalités inversées de températures/durées : 8 h à 400°C, 2 h à 450°C et 1 h à 500°C. Pour le graphique relationnel incluant la clarté, l'échantillon rubéfié se place entre les deux premiers couples de modalités précédents. Ces résultats vont clairement dans le sens que les traces rubéfiées résultent d'une altération d'origine thermique, mais à des températures relativement modérées. Une cuisson de haute intensité peut être écartée. Si l'on considère la morphologie des traces observées, on peut supposer que la cuisson a dû être suffisamment longue pour rubéfier cette épaisseur de manière si homogène. On peut donc proposer qu'elles résultent de chauffes d'au moins 400°C, mais n'ayant pas dépassé les 450-500°C, du moins de façon prolongée. En outre, sur la base de ces résultats, aucune évolution post-dépositionnelle des teintes ne peut être identifiée.

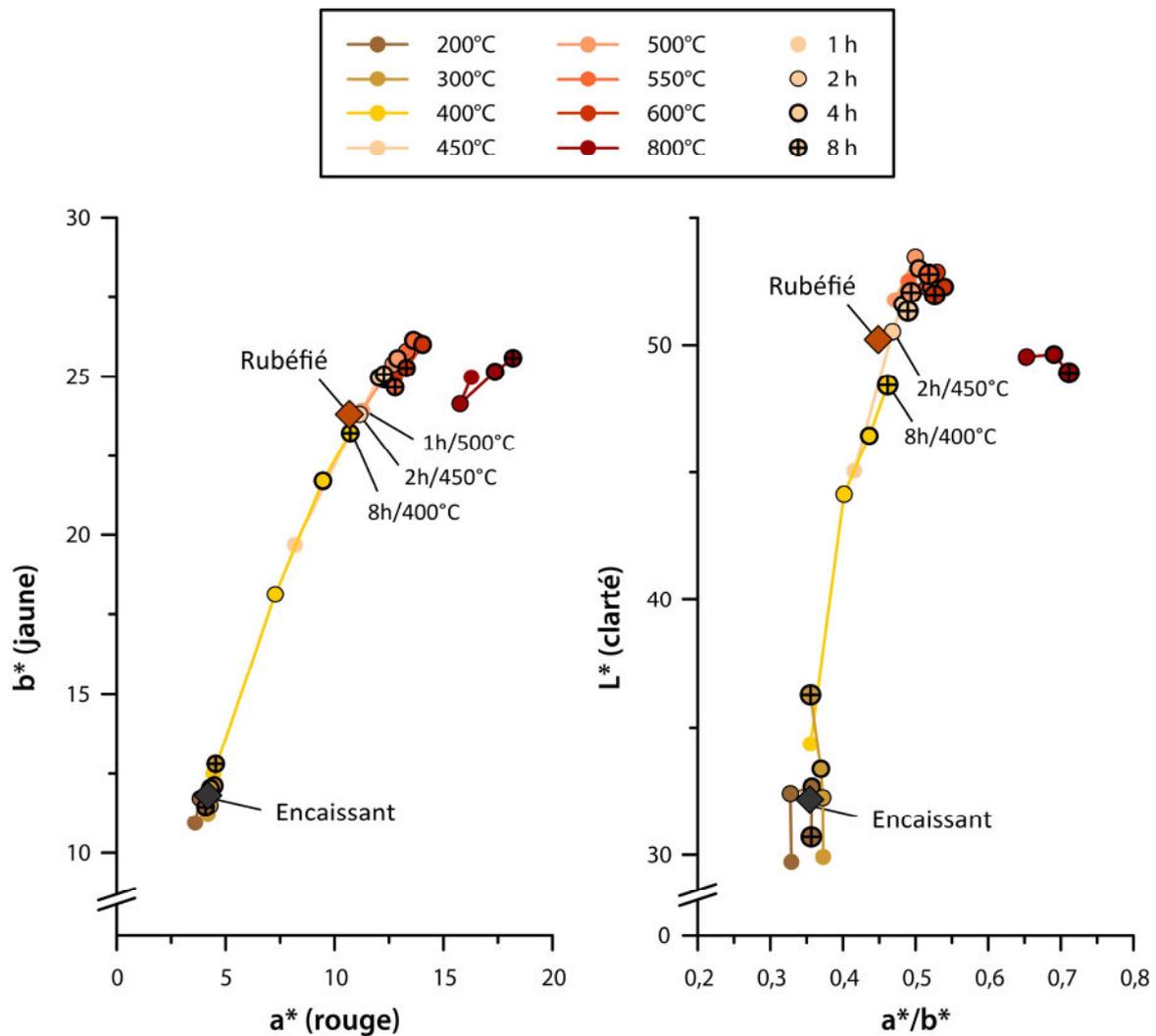


Figure 126 : Représentation graphique des résultats colorimétriques des cuissons expérimentales des échantillons du mont Dôme.

3.4. Datation et cohérence pédo-chronologique

De rares fragments infra-millimétriques de charbons ont été retrouvés associés aux sédiments rubéfiés. L'un d'entre eux a été daté au radiocarbone, mais il n'a pas été possible de faire une détermination anatomique (fragments trop petits). On ne sait donc pas s'il s'agit d'un taxon plus ou moins longévif. Le résultat obtenu nous donne un intervalle de probabilité à 7180-6830 cal. BC¹¹⁰. Cet intervalle correspond au Boréal, et il se situe juste à l'amorce d'une période de nette amélioration climatique (Magny, 2013 ; Mayewski et al., 2004).

¹¹⁰ Ou 9130-8780 cal. BP ; 8080 ± 40 BP ; Poz-97230

Les dépôts du Kilian à partir duquel se développe l'Andosol sont datés d'environ 7580-7360 cal. BC. Toute réserve gardée quant à la précision des datations, cela donne un écart de probabilité compris entre 200 et 750 ans avec l'âge du bois carbonisé. Si ce temps est largement suffisant pour la réinstallation d'une végétation ligneuse (au moins pionnière), on peut se poser la question pour le développement des 20-30 centimètres d'épaisseur de sol sous les traces rubéfiées. Généralement, l'altération des verres volcaniques est décrite comme un phénomène rapide, du fait que ces matériaux sont déjà finement divisés (Dahlgren, Shoji et Nanzyo, 1993 ; Quantin, 1972). À titre de comparaison, la durée de formation du paléo-andosol fossilisé sous les dépôts du Kilian, et dont l'épaisseur atteint localement une vingtaine de centimètres, a été estimée à environ 1500 ans (Raynal, Vernet et Vivent, 1998). La comparaison des intervalles de probabilités des nouvelles datations obtenues pour les dépôts du Kilian et les matériaux parentaux du paléosol s'échelonnent entre environ 900 et 1750 ans¹¹¹. Il faut toutefois considérer que les dépôts volcaniques parentaux en question ne sont pas les mêmes (matériaux du Puy de Dôme et non du Kilian) et que la formation du dernier se déroule dans des conditions climatiques vraisemblablement légèrement plus froides (fin du Préboréal et début Boréal). Si l'on considère pour les traces étudiées l'existence d'un léger effet vieux bois de quelques siècles, la datation obtenue n'est pas incohérente avec l'épaisseur de sol sous-jacent.

4. Discussion

Les résultats géochimiques et minéralogiques confirment la grande homogénéité entre les matériaux rubéfiés et les ceux de l'Andosol encaissant. Il s'agit donc bien de matériau autochtone ayant subi une rubéfaction. Celle-ci ne peut être expliquée par un enrichissement en fer. Les indices géochimiques qui orientent vers un phénomène thermique restent relativement ténus (légère réduction de la cristallinité globale, de la kaolinite et de la biotite, disparition probable de smectite). Par contre, les cuissons expérimentales montrent que la couleur des matériaux rubéfiés est tout à fait compatible avec cette hypothèse, et permettent même de proposer une plage de températures/durées de cuisson relativement restreinte. Compte tenu de l'épaisseur de la rubéfaction, on peut raisonnablement proposer qu'elle résulte d'une combustion prolongée de plusieurs heures autour 400-450°C.

Des analyses supplémentaires restent indispensables pour préciser les mécanismes à l'origine des teintes vives de ces traces, puisque nous n'identifions pas d'hématite en DRX et que pour les échantillons expérimentaux, la spectrocromimétrie ne permet de la repérer que pour les températures de 800°C. Si l'on considère que les matériaux volcaniques sont souvent riches en ferrihydrite, voire même qu'elle constitue l'oxyde de fer principal de ce type de sol (Dahlgren, Shoji et Nanzyo, 1993), alors il est possible que de l'hématite soit présente dans les échantillons, mais sous une forme nanocristalline (directement héritée de la ferrihydrite) et difficile à identifier en DRX. Selon cette voie de transformation, l'hématite pourrait s'être cristallisée à des températures aussi basses que 400°C (voir

¹¹¹ Les différences des extrêmes entre les intervalles de probabilités des dépôts du Kilian et les charbons de bois datés de l'unité U3 (9,460 ± 40 BP ; Lyon-3999 (OxA) ; 11060-10580 cal. BP ou 9110-8630 cal. BC) et sous les dépôts du Chemin de Ronde (9,370 ± 55 BP ; Lyon-3334(Poz) ; 10750-10420 cal. BP ou 8800-8470 cal. BC) sont respectivement de 1050-1750 ans et de 890-1440 ans (Miallier et al., 2004, 2010).

Towe, 1990, d'après Cornell et Schwertmann, 2003, p. 380). Mais peut-être qu'il n'y a pas d'hématite. En tout cas, la première dérivée du spectre de réflectance de l'échantillon rubéfié ne permet pas de l'identifier (données non présentées). Peut-être que les teintes vives s'expriment seulement par la ferrihydrite ou d'autres formes de fer trivalent (amorphe ou cryptocristallin ?) par simple contraste suite à la destruction des complexes organo-humiques (Schwertmann, 1993). Les données en notre disposition ne nous permettent pas de préciser cela. En outre, même si l'on n'observe pas de « dérives » des colorations entre les matériaux rubéfiés et ceux provenant des cuissons expérimentales, il conviendra de s'assurer définitivement qu'elles ne sont pas influencées par des phénomènes post-dépositionnels.

D'autre part, la morphologie des traces rubéfiées apparaît tout à fait singulière. L'une d'entre elles notamment, présente une limite inférieure très franche, une morphologie ondulée, et paraît superposée à une autre trace qui présente les mêmes caractéristiques, quoique plus mince (Figure 123.e). Ces caractéristiques sont difficilement explicables par une combustion d'une surface de sol en place. De plus, plusieurs troncatures sont observées à leur sommet, que nous ne pouvons pas expliquer sans faire intervenir une action humaine. Ces marques traduisent un remaniement de l'unité rubéfiée qui se présente alors sous forme d'agrégats disjoints mêlés à l'unité encaissante. Ces morphologies évoquent fortement les marques que peuvent laisser des travaux aratoires (Lewis, 2012). Du point de vue chronologique, elles ne sont toutefois pas contemporaines, puisqu'elles brassent aussi des matériaux encaissants présents au-dessus des traces rubéfiées. Par contre, il est envisageable que les bords latéraux abrupts des unités rubéfiées puissent être contemporains, ou plus précisément, antérieurs à la chauffe. Ces caractéristiques morphologiques nous donnent clairement l'impression qu'il s'agit de plaques de terre (et d'autres masses de formes indéterminées) cuites et redéposées. Les éléments réunis nous semblent concordants pour interpréter ces traces comme les vestiges d'un écobuage. À cet événement d'écobuage s'ajoutent des indices de labours postérieurs, mais dont la datation et la relation effective nous restent inconnues.

Nous avons vu que l'écobuage était renseigné dans des contextes de sols volcaniques d'altitude, comme dans les Andes, où la technique sert à la mise en culture de prairies denses pour la culture temporaire des pommes de terre (Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007). Les traces du mont Dôme s'en distinguent toutefois du fait qu'elles sont moins épaisses, mais elles sont compatibles avec les données de la littérature agronomique moderne sur l'écobuage. Ceci repose évidemment sur la considération que l'on observe une épaisseur complète de sol cuit. Or, les limites sommitales des traces ne sont pas aussi franches que leur base et leur bordure. Dans la littérature, il est indiqué que la déshydratation marquée des matériaux andosoliques, engendre des altérations structurales et mécaniques décrites comme irréversibles. En particulier, il se produit un abaissement drastique de la capacité de rétention en eau, capacité qui est initialement particulièrement élevée dans les andosols (Quantin, 1972 ; Nanzyo, Shoji et Dahlgren, 1993 ; Legrand, Bartoli et Curt, 2007 ; AFES, 2009). La déshydratation et la chauffe vont aussi fortement modifier leurs caractéristiques physiques, causant une augmentation texturale (agrégation en pseudo-particules ?) et un effondrement structural, suite à la destruction des matières organiques abondantes. À la suite d'une altération thermique, les agrégats cimentés et hydrophobes formés en surface sont particulièrement susceptibles à l'érosion mécanique (Clariond et Perret, 1990 ; Poulénard et al., 2001).

Ainsi, compte tenu de la situation topographique, il ne serait pas étonnant que la partie supérieure de ces traces ait pu être facilement érodée. Hypothèse qui pour nous ne fait que renforcer celle de l'écobuage (car elle indiquerait un volume encore plus important de terre chauffée). Les traces d'activités culturelles postérieures auraient aussi localement facilité leur disparition, au moins par le brassage mécanique. D'autre part, si les traces brunâtres diffuses observées non loin correspondent à un même phénomène (Figure 123.f), elles illustreraient leur progressive disparition et réintégration dans le sol encaissant. La préservation de ces traces apparaît d'autant plus exceptionnelle, et pose question quant au rôle de ces transformations « irréversibles ». Reste que nous avons là des phénomènes qui ne sont observés que très localement, dont l'extension spatiale n'est pas connue. À ce stade, de nombreux points restent donc à éclaircir.

Enfin, le seul point qui nous paraît véritablement s'opposer à l'interprétation de l'écobuage est sa datation. Nous avons dit qu'il était assez probable que le résultat radiocarbone (7180-6830 cal. BC) soit relativement plus ancien que la date de l'évènement. Dans tous les cas, il est clair que le radiocarbone ne nous indique pas le moment de la carbonisation, seulement la mort des tissus ligneux. De plus, nous ne savons pas d'où provenait précisément le charbon daté, c'est-à-dire de l'intérieur même de la masse rubéfiée ou de son interface. En l'état, on ne peut définitivement exclure que le charbon de bois fût déjà présent dans le sol avant l'opération. Malgré cela, il faudrait quand même expliquer l'arrivée de cet évènement de feu (incendie ou feu courant volontaire ?) antérieur à l'écobuage, et à une période marquée par des fréquences globales de feux de végétation très faibles (Marlon et al., 2013 ; Molinari et al., 2013 ; Zennaro et al., 2015). Mais même en considérant une marge d'erreur de plusieurs siècles, voir même d'un millénaire – intervalles maximums parfois donnés pour l'âge de bois mort en forêt (Carcaillet et Talon, 1996 ; Vallauri, André et Blondel, 2003 ; Dodelin et al., 2004) – cela nous donne une datation particulièrement ancienne, et tout de même antérieure au Néolithique ancien. Il apparaît donc indispensable, avant toute chose, de prélever à nouveau et de re-dater ces phénomènes. En l'état, nous considérerons donc que ces traces indiqueraient un évènement d'écobuage assez singulier de par sa localisation, et potentiellement assez ancien.

Partie 9 :
L'écobuage : identification géoarchéologique,
première synthèse et nouvelles questions

1. Identifier les vestiges de fourneaux agricoles

1.1. Quelques critères diagnostics

La synthèse de la littérature moderne et de la documentation actuelle extra-européenne nous a permis de mettre en lumière l'existence de pratiques agricoles singulières, dans lesquelles la terre des terrains à mettre en culture est décapée en mottes ou en plaques, qui sont mises à cuire dans des fourneaux. La mise en œuvre de ces pratiques d'écobuage peut, selon leur contexte d'application et leur chaîne opératoire, engendrer une cuisson oxydante et d'intensité notable, mais « modérée » d'un volume de terre très important. Les cas d'études présentés dans ce mémoire démontrent que dans des situations favorables (pédologiques, environnementales), les produits de ces fourneaux peuvent être préservés. Pour nous, l'existence de cette pratique permet d'expliquer logiquement des phénomènes originaux (voir partie suivante), sans avoir à faire intervenir des causes catastrophistes ou des modèles d'interprétation archéologique purement théoriques (jusqu'à preuve du contraire), comme celui des foyers d'essartages (voir ci-après).

Les résultats de nos cas d'études ainsi que le dépouillement de nombreux rapports d'opérations archéologiques préventives, nous permettent d'identifier différents critères géo-archéologiques et paléo-environnementaux qui, considérés conjointement, peuvent permettre l'identification de cette pratique, ou au moins d'en faire l'hypothèse. Il est évident que dans le cadre de l'archéologie préventive actuelle, il ne faut pas s'attendre à ce que de tels moyens deviennent courants pour l'analyse et l'étude de traces potentielles de telles pratiques, étant donné que la plupart du temps ces traces ne sont pas considérées comme de véritables objets archéologiques (lorsqu'elles ne sont pas simplement ignorées, comme on nous l'a plusieurs fois signalé), alors qu'elles concernent des problématiques qui sont largement préconisées par le Conseil national de la recherche archéologique (CNRA).

Pour tenter de pallier cette lacune, il est nécessaire de se recentrer sur les aspects de ces phénomènes qui peuvent être appréhendés a priori sans grand problème (voir ci-après) dès la phase de terrain, c'est-à-dire leurs caractéristiques physiques et morphologiques. Nous définissons que les traces de fourneaux agricoles devraient théoriquement et en général se manifester par les éléments suivants :

- Ce sont des traces principalement formées de matériaux en terre, qui peuvent prendre des teintes ocrées, jaunâtres à rougeâtre.
- En plan, elles se présentent sous forme de concentrations ou d'épandages plus ou moins diffus, possiblement avec un aspect « en motte » ; les dimensions de ces concentrations peuvent atteindre un diamètre de plusieurs mètres.
- En coupe, elles forment des strates plus ou moins épaisses, de 5 à 20 centimètres (voire plus), qui sont souvent irrégulières ou discontinues, mais leur limite inférieure est nette et franche ; elles peuvent parfois présenter des troncatures latérales.
- Elles ne correspondent pas à de véritables creusements (mais leur préservation est possible dans de légères dépressions).
- Elles peuvent être accompagnées de traces de découpes, franches ou d'extensions linéaires (c'est-à-dire de potentielles traces aratoires).

- Elles possèdent un caractère friable ou induré (mais toujours rompable) et plus sableux ou limoneux que leurs encaissants (d'autant plus que le contexte est très argileux).
- En contextes alluvionnaires de matériaux fins, ces traces sont ourlées ou mélangées à des matériaux argileux noirâtres (si distinct de l'encaissant) qui sont plastiques à l'état humide et très compacts à l'état sec (caractères à tendance verticale).
- La présence de charbons de bois est possible, mais non obligatoire.
- Elles ne sont pas associées à des indices ou mobiliers archéologiques liés à des activités artisanales ou spécialisées impliquant l'usage du feu (ou seulement de façon rare et non-diagnostic).

Il faut considérer que la concomitance de tous ces critères serait une situation « idéale ». La récurrence spatiale du phénomène nous semble également un critère important, mais il faut envisager que l'on puisse diagnostiquer ce type de vestiges à une échelle d'observation réduite (voir l'exemple de Chalain). La répétition ponctuelle de ces structures sur de vastes étendues (hectométriques) nous paraît être un argument fort. Néanmoins, il nous semble bien que la fouille en plan ne soit clairement pas la plus adaptée pour comprendre les phénomènes en question. Mais c'est surtout le concept même de « structure en creux » qui peut amener à des incompréhensions majeures. En cherchant à tout prix des remplissages dans des structures aussi irrégulières, toutes les formes possibles peuvent être trouvées, et d'autant plus facilement des formes que l'on suppose être également très irrégulières, comme des mâts racinaires. L'approche stratigraphique, et surtout non limitée aux structures seules, mais largement plus profonde doit être privilégiée, en première instance (si évidemment les conditions d'opérations le permettent). Cette recommandation n'a rien de nouveau (Brochier, 1999 ; Crombé et Langohr, 2020). L'approche planimétrique pourra dans un second temps permettre d'apporter des informations utiles. À défaut de pouvoir observer ces phénomènes sur de longues coupes (situation préférable), la multiplication de petites fenêtres d'ouvertures ponctuelles à l'intérieur ou en bordure de ces structures, sera moins laborieux et apportera nettement plus d'informations utiles que la fouille classique « de remplissage ».

Ajoutons que dans le cas de prélèvements en vue d'analyses géochimiques, il est indispensable que les encaissants pédo-sédimentaires de ces traces soient également prélevés. De faibles volumes peuvent largement permettre de réaliser une batterie d'analyses pertinente (¼ de litres).

En outre, ces critères sont essentiellement valides (pour le moment) dans des contextes pédo-sédimentaires de nature comparables à ceux que nous avons étudiés, c'est-à-dire en contexte de milieux humides au sens large (fluviaux, marécageux, bordures de lacs, etc.), néanmoins développés dans des matériaux globalement fins, argilo-silteux (mais ne serait-ce pas les lieux spécifiquement choisis pour pratiquer ce type d'écobuages ? voir plus bas). Cela étant, il s'agit de contextes somme toute assez fréquents dans le domaine de l'archéologie préventive.

1.2. Quelques problèmes rencontrés

Il nous faut également faire quelques remarques par rapport aux interprétations des couleurs, qui peuvent être assez trompeuses ; nous en avons fait l'expérience (pour les aspects pédologiques : Baize et Jabiol, 1995). L'exemple de Chalain est instructif, puisque nous avons vu que certaines couches enregistrées dans les stratigraphies hors-sites comme des « anmoors », du fait de leur coloration noirâtre, sont en fait des unités argileuses (à tendance verticale) particulièrement peu organiques. Il nous semble que l'attribution du critère « organique » de certains matériaux sombres des séquences alluviales en particulier, ne soit pas toujours exacte (si on ne réalise pas d'analyse) et puisse engendrer des confusions¹¹². Ce point, évident pour d'aucuns, est loin d'être anecdotique, car dans le cas de matériaux franchement organiques, on ne peut plus s'attendre à observer les mêmes phénomènes que ceux que nous avons évoqués (voir p. ex. la précipitation de fer dans le cas de marais organiques). En outre, les matériaux très organiques, comme les tourbes, peuvent brûler dans certaines conditions naturelles particulières, et c'est ainsi que sont d'ailleurs interprétés des phénomènes qui morphologiquement se rapprochent fortement de ceux que nous avons étudiés (voir ci-après). D'autre part, les teintes sombres peuvent aussi potentiellement résulter de cuissons réductrices. Dans le cas du site de Vaudes, nous ne pouvons que supposer a posteriori qu'au moins une part des traces noirâtres qui moulent celles rubéfiées corresponde à des phénomènes post-dépositionnels d'évolution des minéraux argileux, dont nous ne maîtrisons pas encore complètement les modalités de formation précises. Ces traces noirâtres, si elles sont diffuses et fines, peuvent aisément être confondues avec des poussières charbonneuses, car elles montrent un caractère luisant à l'état humide (confusion avec l'aspect vitrifié des charbons) et sont très résistantes à l'état sec. Nous pensons que cette confusion est assez fréquente concernant les phénomènes que nous avons étudiés. La rareté des charbons présents dans ces couches parfois décrites sur le terrain comme des nappes charbonneuses peut en témoigner (mais cela n'est pas systématique).

Un autre aspect est celui de la teinte rouge des sols et sédiments. Nous avons eu l'occasion de voir les différences de points de vue entre pédo-géologues et archéologues, les uns voyant des traits d'oxydation pédologiques quand les autres voyaient des altérations thermiques. Une fois de plus, les faciès observés en plan nous semblent encore plus trompeurs qu'en coupe. Nous avons nous-mêmes largement mésusé du terme de rubéfaction (au sens pédologique), ne sachant pas toujours sur quel pied danser pour décrire les phénomènes rencontrés. Sur ce point, ce n'est pas l'aspect terminologique qui nous semble problématique, mais l'idée que les teintes rouges marquées (ce qui est évidemment relatif) impliquent systématiquement des cuissons de fortes intensités. Nous avons vu que cela pouvait être contre-intuitif, puisque certains matériaux rubéfient au cours de la cuisson nettement plus vite et rapidement que d'autres, mais surtout que les altérations post-dépositionnelles de matériaux chauffés peuvent entraîner le développement de teintes rouges encore plus marquées. La mise en évidence de surimpositions de faciès rédoximorphes sur des matériaux chauffés, uniquement observables à des échelles d'analyses très fines, démontre que ces aspects ne sont pas toujours évidents. En outre, il faut

¹¹² La limite (théorique) indiquée par le Référentiel Pédologique, qui est fixée à 30 % pondéral de carbone organique sur la terre fine (< 2 mm), ce qui correspond à environ 50 % de matières organiques (le facteur de conversion à appliquer peut varier selon les matériaux ; AFES, 2009 ; Baize, 2000). Certains matériaux argileux peuvent être très sombres alors que très pauvres en matières organiques, comme c'est souvent le cas dans les Vertisols, où l'assombrissement est expliqué par des liaisons particulières des matières organiques aux minéraux argileux.

prendre en compte que les teintes rouges peuvent apparaître encore plus vives lorsque les matériaux sont humides. Nous ne pouvons qu'inviter à user de prudence sur ces aspects.

Nous n'avons pas connaissance de travaux ayant porté sur la possible convergence de faciès entre oxydations pédologiques et thermiques. Les deux processus semblent chacun être étudiés de manière assez cloisonnée, par les pédologues et les archéologues. Au vu des modifications édaphiques que peuvent engendrer l'écobuage, qui a pu être une pratique très courante dans certaines régions (au moins aux périodes historiques récentes), et d'autant plus qu'elle peut être pratiquée dans des contextes très sensibles aux processus de remobilisation du fer, il nous paraît indispensable de poursuivre le travail sur la question de la discrimination des deux phénomènes, et en particulier dans le cas de traces discrètes. L'exemple des traces médiévales de Chalain montre que des enrichissements en éléments traces sont possibles. En cas de forts remaniements mécaniques de ces résidus, on peut raisonnablement se demander sur quels critères les distinguer de certains types de nodules pédologiques (Cornu et al., 2005 ; Giosa et al., 2022).

Ces réserves mises de côté, pour ce qui est des phénomènes fortement visibles, sous forme de couches ou de concentrations épaisses/volumineuses, il nous semble que la description morphologique attentive devrait largement permettre de vérifier si l'on se trouve face à des produits de chauffe, et surtout de dépasser le constat, qu'il s'agit « seulement » de terre cuite.

2. Premiers résultats du dépouillement des archives archéologiques

La lecture d'un grand nombre de rapports d'opérations archéologiques nous a permis d'identifier de très nombreuses références à des foyers d'essartages/de déforestation et des chablis brûlés (plusieurs centaines). Dans la majorité des cas, il s'agit seulement d'une simple mention du phénomène, c'est-à-dire une première interprétation archéologique conduite sur le terrain. Ces mentions sont parfois accompagnées d'une description très sommaire, et moins souvent de photographies. La vérification systématique des inventaires montre que ces faits ne sont pas toujours inventoriés, et dans le cas où il s'agit de plusieurs faits, il est très rare que l'inventaire soit systématique. Il semble que dans les opérations de diagnostics, concernant des surfaces assez réduites et n'ayant livré que peu ou pas de vestiges archéologiques « classiques », leur enregistrement soit souvent plus complet. Étant donné les conditions particulièrement contraignantes de certaines opérations (conditions météo, temps alloué), on comprend aisément que ces phénomènes parfois très fugaces et difficiles à appréhender ne soient que très sommairement documentés. Néanmoins, il est flagrant que dans certaines opérations, ces phénomènes sont abondants, et qu'ils sont visiblement délaissés par les archéologues. Et ceci, quelle que soit leur attribution chronologique supposée (généralement stratigraphique). En bref, il existe une variabilité importante dans la documentation même de ces faits qui, dans la majorité des cas – soit, car insuffisamment documentés, soit car il ne s'agit que de faits isolés ou uniques (aussi bien documentés soient-ils) – rend très difficiles la réexploitation et l'homogénéisation de ces données. Partant de là, il est très subjectif de définir les critères précis pour assurer que ces faits correspondent à des phénomènes morphologiquement proches de ceux que nous avons étudiés. Dans une très large majorité de cas, nous ne pouvons que le supposer, ou au contraire en douter.

Ceci étant, nous avons tout de même rencontré quelques cas richement documentés, pour lesquels nous retrouvons une majorité des critères susmentionnés, ou que nous jugeons suffisamment pertinents, sur la base des descriptions et de la documentation photographique conjointe (Tableau 33, Figure 127). Outre ceux de cette thèse, nous retenons à ce stade 12 sites. Il faut donc considérer qu'il ne s'agit que d'un échantillon réduit, avec un tri assez strict des critères susmentionnés (avec une récurrence spatiale des phénomènes). Certains des sites retenus ont fait l'objet d'autres opérations préventives à proximité, avec parfois des traces qui s'apparentent très probablement aux mêmes phénomènes (Pagny-sur-Moselle, Metz, Mairy, Henri-Farman). Nous faisons l'hypothèse que ces vestiges résultent de pratiques agricoles du type écobuage.

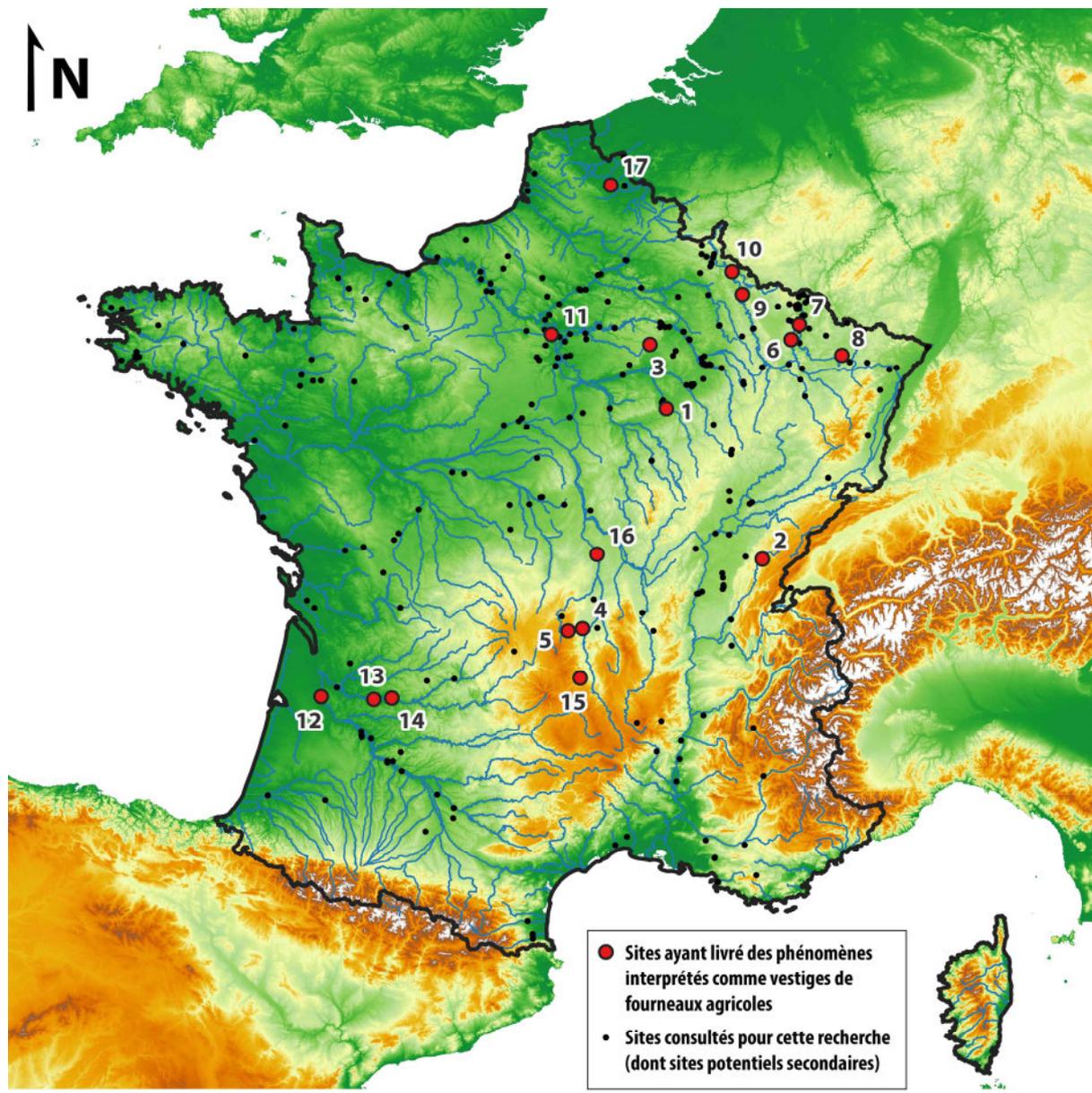


Figure 127 : Carte des sites potentiels avec des vestiges de fourneaux agricoles (sites issus du dépouillement des rapports d'opérations archéologiques préventives).

Tableau 33 : Principaux sites identifiés ayant livré des traces pédo-sédimentaires de morphologies similaires à celles de ce travail.

	Sites	Attribution chronologique	Datations (sur les faits archéologiques)	Références	Interprétation antérieure
1	Vaudes, Les Trappes, Aube (10)	Haut Moyen Âge / début Moyen Âge central	Voir chapitre correspondant		-
2	Bordure du Lac de Chalain, Jura (39)	Haut Moyen Âge	idem		foyers d'essartage/déforestation
3	Bordure des Marais de Saint-Gond, Marne (51)	Néolithique final	idem		foyers d'essartage/déforestation
4	Marais de Limagne, Puy-de-Dôme (63)	Néolithique (ancien à final ?)	idem		défrichements anthropiques, brûlis de tourbe, évènement cosmique catastrophique
5	Sommet du Puy de Dôme, Puy-de-Dôme (63)	?	idem		évènement cosmique catastrophique
6	Pagny-sur-Moselle, Meurthe-et-Moselle (54)	Âge du Bronze final et Âge du fer	Arguments chrono-stratigraphiques	(Blouet et Faye, 1986)	foyers d'essartage/déforestation
7	Metz, ZAC du Sansonnet, Moselle (57)	Âge du Bronze moyen/final et haut Moyen Âge	430-620 cal. AD (Poz-72785 ; 1510 ± 30 BP)	(Klag et al., 2016)	foyers d'essartage/déforestation
			580-660 cal. AD (Poz-72784 ; 1420 ± 30 BP)		
			1400-1140 cal. BC (Poz-72786 ; 3035 ± 35 BP)		
			1030-850 cal. BC (Poz-72788 ; 2800 ± 30 BP)		
8	Cutting, Moselle, Les Grandes Rayes, Moselle (57)	Âge du Bronze final	Arguments chrono-stratigraphiques	(Gazenbeek et al., 2013)	foyers d'essartage/déforestation
9	Mouzay, Lion-devant-Dun, Meuse, L'Aiguillon, Meuse (55)	Protohistorique	Arguments chrono-stratigraphiques	(Viller et al., 2016)	foyers d'essartage/déforestation
10	Mairy (Ardennes), Ardennes (08)	Fin de La Tène / Antiquité tardive / Haut Moyen Âge	120-25 cal. BC/AD (GrN-24238 ; 2040 ± 30)	(Laurelut, 2012, 2015)	foyers d'essartage/déforestation
			240-390 cal. AD (GrN-27706 ; 1730 ± 30)		
			420-600 cal. AD (GrN-22990 ; 1550 ± 40)		
			780-970 cal. AD (GrN-24240 ; 1160 ± 30)		
11	Paris, 62 rue Henry-Farman, Île-de-France (75)	Néolithique final / Âge du Bronze Ancien	Arguments chrono-stratigraphiques	(Souffi et al., 2011, 2013)	foyers d'essartage/déforestation
12	Villeneuve-d'Ornon, Gironde (33)	?	-	(Dunikowski, 2014)	foyers d'essartage/déforestation
13	Pineuilh La Mothe, Gironde (33)	Haut Moyen Âge / début Moyen Âge central	Arguments chrono-stratigraphiques	(Prodéo et al., 2007)	tourbe carbonisée, foyers d'essartage/déforestation
14	Bergerac, Pombonne, La Brunetière, Dordogne (24)	Atlantique ou début du Subboréal ?	Arguments chrono-stratigraphiques	(Bertran et al., 2009)	paléo-incendie
15	Espalem, La Pénide, Haute-Loire (43)	Âge du Bronze moyen	1530-1420 cal. BC (LY-9857 ; 3205 ± 35 BP)	(Blaizot et al., 2002, 2004)	dispositif de combustion de type "charbonnières"
			1620-1450 cal. BC (LY-10532 ; 3265 ± 35 BP)		
16	Neuvy, Allier (03)	Néolithique final / Âge du Bronze Ancien	Arguments chrono-stratigraphiques ; datation radiocarbone en cours	Site inédit, en cours d'étude ; resp. Michel A.	-
17	Marais de Dourges, Pas-de-Calais (62)	?	Datation incompatible avec notre hypothèse	(Deschodt et al., 2005, 2015)	-

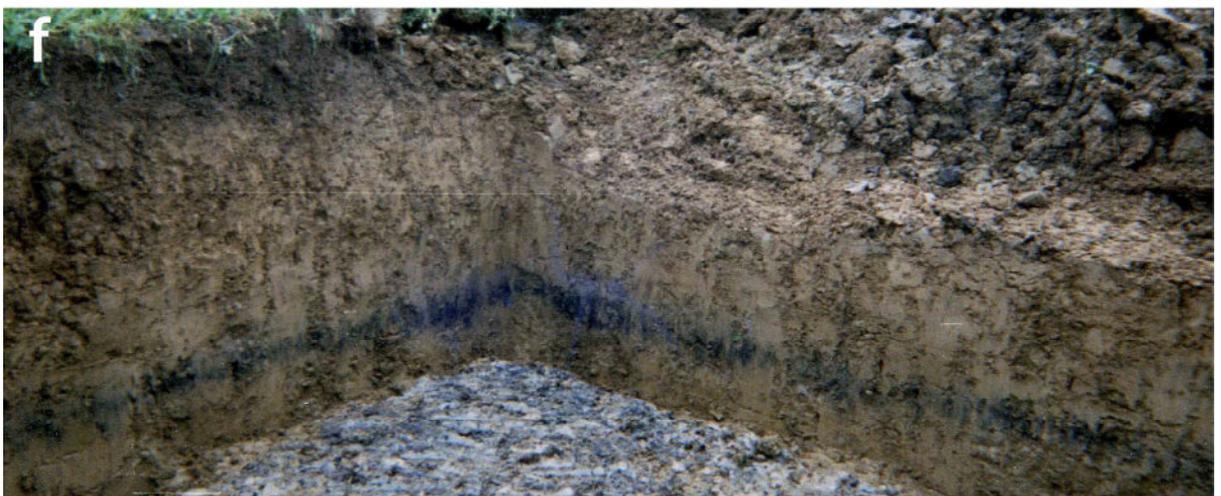
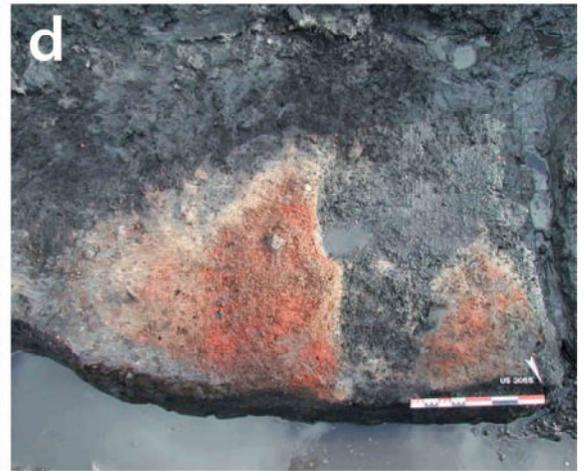


Figure 128 : Illustration des structures type « foyers d'essartage » identifiées dans les rapports d'opérations archéologiques et interprétées comme des vestiges de fourneaux agricoles.

- (a) Traces interprétées comme des souches brûlées associées à un essartage médiéval. Noter la ressemblance avec les structures de Vaudes (crédits Souffi et al., 2022).
- (b) Foyer de déforestation dans la Meuse, avec un aspect plus ou moins en « mottes » (crédits : Viller et al., 2016)
- (c) Exemple d'anomalies fréquemment identifiées dans la vallée de l'Oise et classée à défaut comme foyer d'essartage. Noter les nettes variations de couleurs (possiblement une évolution postérieure du fer ?) et l'ourlet diffus et non continu noirâtre (comm. pers. Clément Paris, site d'Houdancourt, Les Epinières dans l'Oise).
- (d) Foyers d'essartage médiévaux de Pineuilh. Les auréoles de couleur sont interprétées en lien avec le « front de combustion de la tourbe », elles correspondent pour nous à une migration et une cristallisation des oxydes de fer post-dépositionnelle (crédits : Prodéo et al., 2007).
- (e) Noter le mince niveau argileux noirâtre qui moule la base de l'unité rubéfiée. Cette base présente une morphologie ourlée et avec des angles abrupts qui évoque fortement une surface de décollement ou d'arrachage (inédit ; La Villeneuve-au-Châtelot dans l'Aube ; comm. pers. Jérôme Brenot).
- (f) Niveau argileux noirâtre (charbonneux ?) associé à des foyers d'essartages (crédits : Laurelut, 2012).



Figure 129 : Vestiges de combustion découverts en bordure de berges d'un ancien îlot de l'Allier à Neuvy. Les vestiges montrent un processus de « vertisolisation » extrêmement marqué et une migration et une précipitation des oxydes de fer dans la partie supérieure des faits (hypothèses de travail) ainsi que de nombreuses traces sécantes et anguleuses que nous interprétons comme des traces aratoires (inédit ; comm. pers. Alexandre Michel)

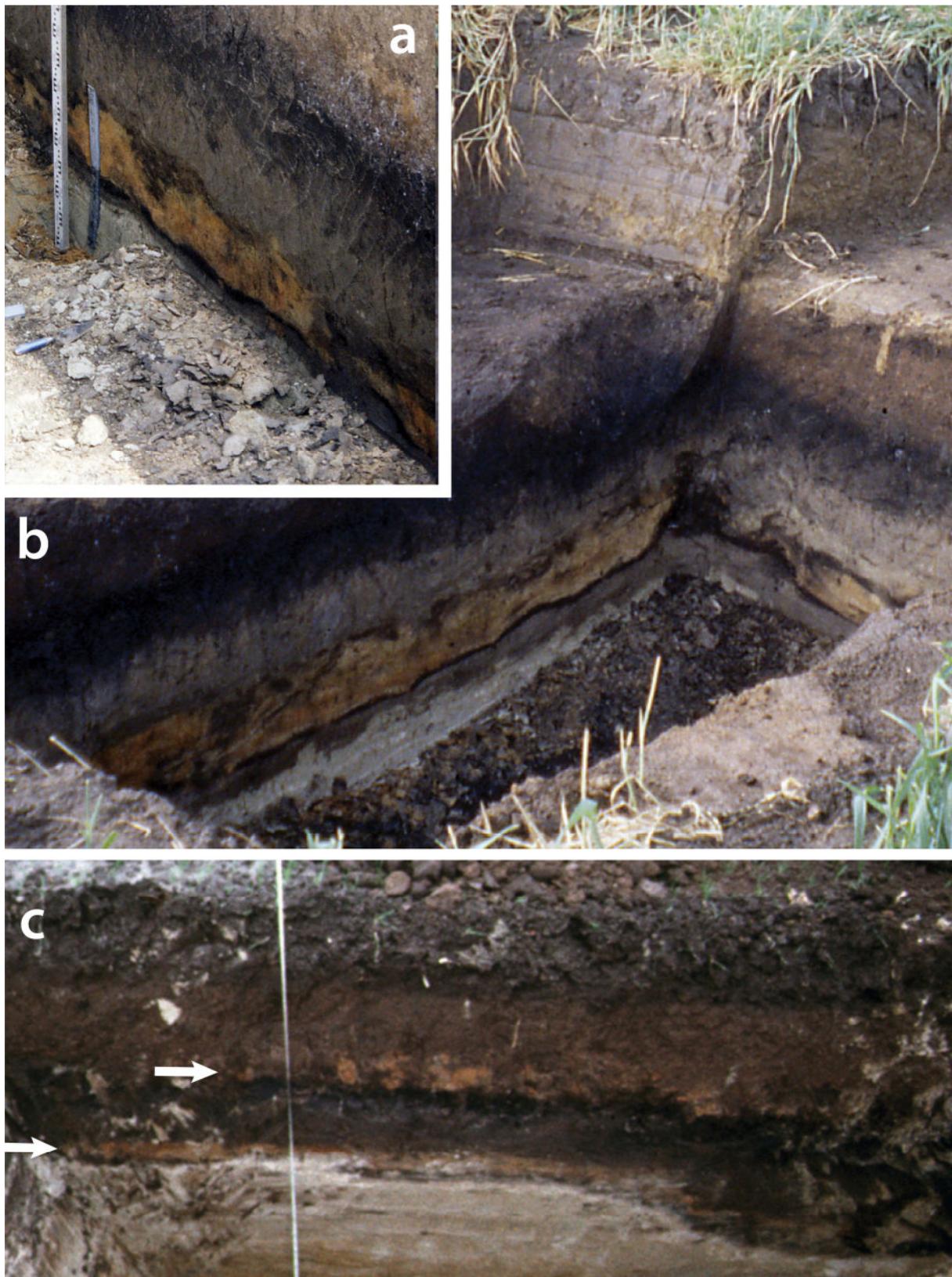


Figure 130 : Unités ocrées-rubéfiées identifiées dans les Marais de Dourges (crédits : Laurent Deschodt, comm. pers.)
 Noter les fortes différences de faciès entre la zone la plus basse (a et surtout b) et sur les rebords de la zone (c). Sur cette dernière zone, deux unités rubéfiées sont clairement distinguées. Les dépôts rubéfiés ont vraisemblablement été reconcentrés postérieurement depuis les bordures et remaniés sous une nappe d'eau.

Les faits archéologiques de la majorité de ces sites ont été interprétés comme des foyers d'essartage, des foyers de déforestation ou encore comme des chablis brûlés (Figure 128). Les découvertes d'Espalem ont fait l'objet de plusieurs études spécialisées (anthracologie, micromorphologie), et d'une publication (Blaizot et al., 2004), dont les conclusions correspondent pour nous assez bien avec les phénomènes que nous avons observés. Les auteurs concluent que les traces découvertes correspondent à un système de combustion à feu couvert démantelé (restant prudent sur l'interprétation fonctionnelle). Ils rejettent cependant l'hypothèse de feux agricoles, car le volume des matériaux en terre concernés par la rubéfaction serait trop important, que cette rubéfaction traduirait des altérations de forte intensité, incompatibles avec un objectif agronomique, et que les traits micromorphologiques habituels de mises en culture (agricultures) sont absents. Malheureusement, malgré l'aval de la responsable d'opération, il nous a été impossible de récupérer ces lames minces ayant « disparu », pour les comparer avec nos cas d'étude. On notera que le site d'Espalem est situé sur un plateau basaltique. Tous les autres sites que nous avons retenus sont dans des contextes de plaines alluviales ou de terrains fortement humides.

Un seul de ces sites pose clairement problème avec notre interprétation du fait de sa datation, celui des Marais de Dourges, puisqu'il est attribué au Dryas récent (Teheux, Lantoin et Deschodt, 2001 ; Deschodt et al., 2005, 2015). La similarité morphologique de ces dépôts avec les phénomènes que nous cherchons est du moins troublante (limons jaune orange vif ourlés dans une unité noirâtre ; Figure 130). Le site est positionné dans une large zone dépressionnaire au niveau de l'interfluve séparant la vallée de la Deûle de la plaine de la Scarpe. La récurrence spatiale du phénomène est non négligeable. On note toutefois que certaines de ces unités pédo-sédimentaires sont indiscutablement affectées par des phénomènes de solifluxion (non visibles sur ces clichés). Elles pourraient s'être redéposées en contexte subaquatique (lacustre). On les retrouve également sur les positions bordant la dépression. Les découvertes archéologiques exceptionnelles des niveaux antérieurs ont naturellement retenu l'attention, et ces traces et les séquences postérieures n'ont pas pu faire l'objet d'analyses plus avancées. L'origine des traces ocrées n'est pas définie, mais l'hypothèse qu'il s'agisse de précipitations de fer en milieu tourbeux nous a été signalée (comm. pers. Brigitte Van Vliet-Lanoë). Cependant, les teneurs en matières organiques indiquées pour l'unité noirâtre excluent qu'il s'agisse de tourbe (environ 2 %). Si nous suivons notre hypothèse, les mouvements en masse affectant précisément les couches noirâtres pourraient tout à fait s'expliquer par le développement de caractères vertiques (AFES, 2009). Certains de ces niveaux auraient ainsi soliflué depuis les bordures des terrains humides, ce qui aurait entraîné le remaniement de matériaux plus anciens, et en conséquence leur datation. Nous faisons l'hypothèse que ces traces ocrées correspondraient à des écobuages néolithiques. Cette hypothèse nous paraît également plus pertinente pour expliquer le temps de formation d'un paléosol avant la solifluxion (que nous situerions donc au début de l'Holocène). Malgré l'attribution chronologique, compte tenu de leur forte ressemblance morphologique, nous faisons le choix de garder ce site comme site potentiel de vestiges d'écobuages anciens. Dans tous les cas, cela nous semble plus honnête que de le passer sous silence, et peut-être que l'analyse future de ces traces le confirmera ou au contraire, permettra de définir des possibilités de convergences morphologiques avec d'autres phénomènes que nous ne connaissons pas. En attendant, le lecteur jugera.

Les autres sites ont permis d'attribuer ces vestiges à différentes périodes qui sont compatibles avec notre hypothèse. L'échantillon est trop réduit pour en tirer des conclusions du point de vue chronologique, mais les tendances semblent correspondre à celles que nous avons perçues au cours de

notre dépouillement des rapports d'opérations préventives. Le Néolithique final, l'Âge du Bronze et le haut Moyen Âge sont des périodes qui reviennent fréquemment, mais les datations absolues de ces vestiges sont encore trop rares. On observe que la période de l'Antiquité ne semble quasiment jamais concernée. Le site de Mairy dans les Ardennes est le seul que nous connaissons, et celui-ci a été daté au radiocarbone. La connexion entre ces vestiges et les occupations archéologiques n'est généralement pas faisable. À ce titre, le site de Bergerac pourrait se montrer intéressant (Bertran et al., 2009). Les traces découvertes ne sont pas bien calées chronologiquement, mais de nouvelles dates sur les séquences sédimentaires d'un site du Néolithique récent(-final), à quelques centaines de mètres (Bergerac, « Les Vaures »), suggèrent leur contemporanéité (voir P. Bertran dans Fouéré et al., 2018, p. 45-51).

Il est bon de considérer que cette sélection a été faite indépendamment de leur région de découverte et de leur datation, mais bien sur la base des caractéristiques structuro-morphologiques de ces traces. Certaines plaines alluviales ont livré un nombre important de phénomènes qui sont très certainement de même nature, mais que nous jugeons insuffisamment documentés. Un travail important reste à faire pour élargir cette première sélection. Malgré tout, un bon nombre de sites ont livré des phénomènes ponctuels ou discrets qui mériteraient d'être valorisés. Il semble apparaître que ces vestiges sont soit plus abondants, soit plus souvent enregistrés dans certaines plaines alluviales (Moselle Marne, Seine, Oise), ce qui est certainement aussi lié au grand nombre d'opérations préventives de diagnostic dans ces secteurs. Bien qu'il ne s'agît que d'un premier bilan très partiel, il nous semble que le constat s'impose que ces traces ne sont pas exceptionnelles, mais au contraire, relativement fréquentes.

2.1. Des « foyers d'essartages » aux traces de fourneaux

Pour ce qui est de l'interprétation de ces phénomènes en tant que « foyers d'essartages », nous n'avons jamais trouvé d'arguments matériels qui appuyaient cette interprétation. À ce jour, aucun des archéologues que nous avons interrogés n'a été capable de nous expliquer concrètement comment se produisait le phénomène et comment il expliquait la morphologie observée sur le terrain. Nous ne comprenons toujours pas si, pour les archéologues, il s'agit de souches qui auraient brûlé en place ou plutôt de foyers où les souches extraites auraient été entassées et brûlées. Le fait que les structures interprétées comme telles soient très majoritairement situées dans les lits majeurs des plaines alluviales, et en particulier dans des sols à granulométrie très fine retenant bien l'humidité, nous rend très dubitatifs sur la possibilité que ces souches aient pu sécher en place. Pour ce qui est de la seconde hypothèse, leur morphologie, quand elle est observée en coupe, s'oppose clairement à celle de fonds de foyers.

Si des souches brûlées ont pu laisser des traces archéologiques – ce que nous ne réfutons pas, mais nous attendons que la démonstration soit faite – elles ne correspondent pas à ces vestiges, qui sont jusqu'à preuve du contraire, des masses de terres cuites redéposées, effondrées et plus ou moins remaniées par les activités culturelles postérieures. Leur préservation est à mettre en relation avec le fait qu'il s'agit, dans la majorité des cas de vestiges de pratiques agricoles temporaires, autrement dit des mises en culture pour une à quelques années à la suite.

Nous ajouterons qu'un bon nombre d'archéologues interrogés nous ont avoué eux-mêmes douter de cette interprétation, donnée souvent à défaut du fait de la difficulté à appréhender ces structures et du manque de référentiel sur la question. Nous espérons ici répondre à leur demande, ou au moins leur apporter des pistes à creuser, pour valider ou le cas échéant réfuter notre hypothèse. Néanmoins, nous pensons qu'il est nécessaire d'abandonner le modèle des « foyers d'essartages » et « de déforestation », qui ne fait qu'entretenir la confusion autour des pratiques agricoles liées au feu. Les pratiques d'essartage par le feu ne sont pas associées à des « foyers » : soit elles s'opèrent avec un feu courant (c'est-à-dire l'abattis-brûlis), soit elles procèdent par la réalisation de fourneaux (c'est-à-dire l'essartage à feu couvert), comme dans le cas de l'écobuage.

2.2. D'autres exemples hors de France

Nous avons également relevé dans des publications l'existence de phénomènes similaires, dans les plaines alluviales d'Italie (Figure 131). On peut citer les exemples des Marais Pontins (Agro Pontino), au sud de Rome, où certaines de ces structures sont datées du Néolithique final et de l'Âge du Bronze (Feiken et al., 2012 ; Feiken, 2014 ; de Haas, 2017 ; Sevink, 2020)¹¹³. Ces traces sont documentées comme des niveaux ou des traces diffuses d'argiles brûlées (« terra bruciata ») pour lesquelles plusieurs interprétations ont été proposées, notamment des incendies de tourbe et des traces de feux agricoles (« ignicoltura », « slash-and-burn » ; *ibid.*), ou encore des résidus liés à la production de céramiques. Récemment, l'hypothèse qu'elles résultent d'une cuisson a été rejetée, et elles ont été interprétées comme la conséquence d'oxydation de sédiments anoxiques riches en pyrite, suite au drainage des terrains (Sevink, 2020). Les principaux arguments avancés par l'auteur étant la rareté des charbons de bois et l'absence de vitrification de ces matériaux (tout en attestant que certains de ces faits correspondent bien à des argiles cuites, sur la base de la présence d'hématite en DRX). Néanmoins, aucune donnée probante n'est avancée vis-à-vis de cette hypothèse d'une oxydation de matériaux pyritiques, en particulier aucune mesure du soufre ni d'analyses ciblées sur les formes du fer. Il s'agit pour nous de vestiges de fourneaux, dont la difficulté de caractérisation s'explique par le fait que ces matériaux sont chauffés dans des gammes de température modérées, en dépit de leurs colorations vives, et surtout qu'il ne s'agit pas de surfaces brûlées en place, mais de matériaux effondrés et redéposés. La considération du procédé technique de l'écobuage permet de dépasser les apparentes contradictions relatives à ces vestiges.

¹¹³ 2860-2480 cal. BC (GrA-38562 ; 4075 ± 40) ; 2460-2200 (GrA-38524 ; 3845 ± 35) ; 1440-1230 cal. BC (GrA-38565 ; 3085 ± 40) ; dates publiées dans Feiken (2014).

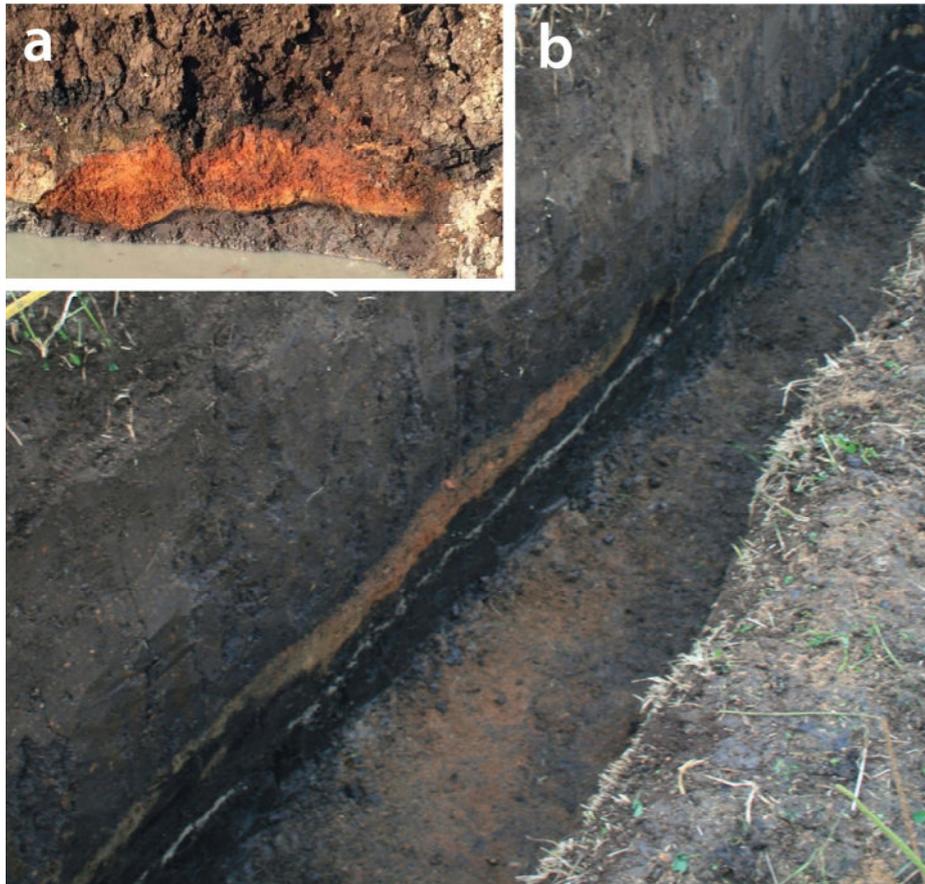


Figure 131 : Exemples de niveaux d'argiles cuites dans les Marais Pontins.

(a) Noter la présence fine d'argile noirâtre à la base de l'unité rubéfiée et plus marquée et irrégulière au sommet (crédits : Sevink, 2020).

(b) Noter la présence d'un mince niveau de cendres volcaniques blanches (téphra ?) dans l'unité encaissante inférieure (crédits : Feiken, 2014).

2.3. Des résidus de fourneaux agricoles en position secondaire ?

Nous avons au cours de notre recherche, fréquemment retrouvé l'existence de couches de matériaux épaisses et fortement rubéfiées, en position secondaire, dans le comblement de structure en creux ou de chenaux, mais clairement non directement associées à des sites d'occupation. Le volume de ces couches est quelquefois remarquable, et ces phénomènes nous ont fortement rappelé ce qui a été observé à Vaudes, dans le comblement de l'unique véritable chablis (voir la Figure 42, p. 134). Il nous semble que l'hypothèse de fourneaux agricoles permettrait là aussi d'expliquer la formation de tels dépôts (voir l'exemple très évocateur de Flaux, Scrinzi et Djerbi, 2022, dans un paléochenal moderne à côté de Nîmes).

Le contexte de découverte ayant surtout retenu notre attention est celui des comblements de fosses profondes de type *Schlitzgruben* (fosses à profil en « Y-V-W »), qui sont interprétées comme des structures cynégétiques (Achard-Corompt et al., 2013). Dans les comblements intermédiaires ou sommitaux de ces structures, des couches de sédiments rubéfiés somme toute relativement épaisses sont ponctuellement mises en évidence, et certaines attribuées à la période du Néolithique ancien (Achard-Corompt et al., 2021, vol. 1, p. 237 ; Achard-Corompt et Riquier, 2015). Ces vestiges sont interprétés

comme des foyers, ayant fonctionné en place (et creusés dans ces structures). Pour nous, la morphologie de ces unités ne correspond pas à des parois thermo-altérées ou des fonds de foyers en place, mais plutôt à celles de dépôts assez massifs de terre rubéfiée (certaines montrent des formes de glissement en loupe assez caractéristiques), certes plus ou moins réaffectées postérieurement par la bioturbation. En outre, les remplissages de ces structures étant considérés comme lents et progressifs (colluvionnements saisonniers), ces résidus de feu ne peuvent pas être liés à la préparation du gibier chassé. Étant donné le volume de matériaux affectés par la chauffe, la rareté des éléments archéologiques (rares fragments de faunes), et le contexte environnemental de ces fosses (hors-sites d'occupations ; milieu plutôt fermé ?), il nous paraît tout à fait envisageable que ces traces puissent résulter d'entreprises agricoles temporaires, à proximité de ces secteurs. D'ailleurs, il est documenté que certains agriculteurs qui pratiquent l'abattis-brûlis réalisent des chasses par piégeage (avec des fosses ou autrement) autour de leurs champs, les cultures servant alors d'appâts et les pièges intégrant un dispositif ou des activités liées à leur protection (Dounias, 1996 ; Dounias et al., 2000). À ce stade, il ne s'agit évidemment que d'hypothèses, mais il nous semble qu'il y a là matière à réflexion.

3. De nouvelles questions sur les agricultures préhistoriques

Jusqu'à présent, l'écobuage n'était renseigné que pour les périodes historiques récentes, et surtout, uniquement à partir de sources textuelles. D'après celles-ci, l'écobuage apparaît d'ailleurs comme une pratique assez récente, vieille tout au plus de quelques siècles (Sigaut, 1975). En considération du procédé technique très particulier de l'écobuage, et précisément du labeur nécessaire au décapage des sols, F. Sigaut a émis l'hypothèse que « *l'écobuage n'est pas antérieur à l'apparition des outils de fer* » (p. 194). La mise en évidence archéologique de l'écobuage pour les périodes anciennes, et en particulier dès le Néolithique, invite donc à revoir un certain nombre de postulats et de préjugés à propos des agricultures anciennes.

Il faut tout d'abord considérer les contextes pédologiques dans lesquels nous retrouvons ces vestiges de fourneaux, fortement contraints par l'humidité et relativement riches en argiles. Si l'on écarte les Andosols et les sols de Limagne, dont les propriétés sont particulières, il apparaît que les agriculteurs préhistoriques se trouvaient principalement face à une contrainte pédologique physique, de nature structurale. Pour mettre en culture ces terrains engorgés de façon intermittente, le laps de temps au cours duquel les sols sont aptes à être travaillés, ni trop secs, ni trop humides, doivent être particulièrement courts, et nécessitent des savoir-faire bien spécifiques. Ce premier constat, invite déjà à s'interroger sur la considération courante que ce sont les facteurs physiques des sols qui limitaient l'agriculture, et donc que les groupes néolithiques se soient systématiquement ou de manière prépondérante, implantés dans des contextes où les sols étaient plus facilement labourables, et cela en dépit d'une fertilité chimique moindre. Il nous semble tout à fait envisageable, par exemple à Chalain, que certains groupes néolithiques au moins, aient spécifiquement recherché ce type de terrain pour la culture. C'est notamment pourquoi il devient nécessaire d'essayer de définir l'importance relative de l'écobuage (si cela est possible), mais également si celui-ci était d'usage chez seulement certains groupes préhistoriques. Si l'écobuage a pu être, comme le suggère R. Portères (1972), une pratique à caractère « ethnique », alors elle pourrait théoriquement permettre de « suivre » le développement ou le déclin de certains « groupes techno-culturels ». Mais nous n'en sommes pas là.

Un deuxième préjugé courant, qu'il convient également de balayer, est celui que l'agriculture n'est pas possible dans les lieux humides. C'est une assertion que l'on trouve très fréquemment dans la littérature archéologique, mais pas seulement. Certes, l'écobuage ne résout pas tout, et ne permet pas de dépasser certaines contraintes naturelles, en particulier la présence d'une nappe permanente ou des engorgements très prolongés. Il est clair aussi que l'écobuage est particulièrement adapté aux marais à dominante minérale, et que les tourbières sont nettement moins propices à cette opération¹¹⁴. Mais si l'on considère que les paléo-lacs et les zones humides ont pu avoir dans certaines régions au moins, une importance nettement plus grande au Néolithique que de nos jours (Brochier, 1991b), alors la connaissance de l'écobuage dès cette période prend une tout autre ampleur. Il est déjà évident que les groupes préhistoriques ont su habilement s'adapter aux fluctuations naturelles des zones humides qu'ils fréquentaient couramment, s'ils n'y résidaient pas, et cette habileté vaut donc également pour le domaine de l'agriculture.

La question de l'outillage propre à cette opération est épineuse. Si l'on considère ceux en bois, il nous semble qu'une possibilité serait celle des longues pelles quelquefois documentées comme des pagaies, qui sont parfois indiquées comme adaptées pour le décaissage de sols argileux (Lerche et Steensberg, 1973 ; Brunhes Delamarre, 1985 ; Golson, 2017 ; Seignobos, 2017 ; Rostain, 2018). Il nous semble en tout cas que le travail devait certainement se faire sub-horizontalement, et non par percussion, mais par pression (Sigaut, 1984). C'est pourquoi nous pensons plutôt à des outils droits, plats. Ces pelles-pagaies pourraient permettre d'expliquer les dimensions relativement importantes des plaques de terres cuites observées à Chalain. Mais nous avons aussi vu que certaines traces (les plus profondes d'ailleurs) pourraient suggérer un travail outillé vertical (pour le basculement des masses de terre ?). En outre, des outils interprétés comme des pagaies ont été retrouvés à Chalain et Clairvaux, certains ont leur embout brisé, et ils ne sont pas en bois tendres, mais en chêne (Pétrequin et Pétrequin, 2021). Il serait bon de reprendre la question sur ces objets. Quoiqu'il en soit, l'opération devait être très difficile sans outillage en fer, et il nous semble assez certain que cette contrainte ait été en partie compensée par le travail collectif (Portères, 1972 ; Sigaut, 1975 ; voir aussi : Rios et Gade, 1972 ; Callier-Boisvert, 2004). R. Portères mentionne dans certaines régions africaines, l'existence d'années particulières à l'écobuage (voir le cas du *Muki*), où celui-ci est pratiqué de façon extensive, dans une « *sorte de fièvre collective et dirigée* ». Ceci ne fait qu'illustrer ce caractère collectif à une échelle plus vaste.

Par ailleurs, l'investissement indispensable en bras qu'implique la mise en œuvre de l'écobuage nous interroge sur les durées d'exploitation des terres ainsi préparées. Dans tous les cas, l'écobuage est une pratique agricole temporaire, il permet de préparer un champ, en apportant une bonification immédiate par l'apport de cendres et la libération des cations retenus au sein des minéraux argileux. Ces enrichissements ne sont pas durables. Par contre, les modifications texturales et structurales engendrées sur l'horizon de surface du sol le sont relativement plus (texture sableuse et structure

¹¹⁴ Quoique pas impossible, mais avec une possibilité de renouvellement incomparablement plus longue que dans le cas des écobuages des terres argileuses. La question de la visibilité archéologique des écobuages de tourbières semblerait évidemment, par la nature même des matériaux en jeu, impossible à mettre en évidence. Néanmoins, certains chercheurs mettent en évidence dans des tourbières des niveaux anthropisés un peu particuliers dit KTH pour « Kultureller Trocken Horizont » dont les caractéristiques ne nous paraissent a priori pas incompatibles avec des écobuages de tourbes (Renard, 2016).

friable). Il nous semble donc tout à fait envisageable que les mises en cultures aient pu être répétées quelques années après cette préparation. Les caractéristiques des vestiges de Limagne, assez brassés, sans toutefois être largement mélangés à des matériaux encaissants, pourraient être de bons arguments pour soutenir cette hypothèse. Ce qui nous semble le plus plausible est que le décapage initial ait été particulièrement épais (celui pour les fourneaux), ce qui aurait permis d'éviter d'avoir à labourer plus profondément lors de mises en cultures postérieures (voir Jobbé-Duval, Cochet et Bourliaud, 2007). Il paraît d'ailleurs assez certain que l'épaisseur du décapage du sol joue un rôle au moins aussi important que le nombre d'années de mise en culture, dans le degré de visibilité archéologique de cette pratique. À ce propos, les différences de préservation des phénomènes observés à Chalain (plaques de terres cuites quasi complètes versus niveaux noirs vertiques à résidus de terres cuites) pourront peut-être nous faire avancer sur ces questions.

Avec l'écobuage, il apparaît nécessaire de revoir profondément les considérations sur la nature des milieux les plus favorables aux agricultures anciennes, non seulement sur les aspects édaphiques, mais aussi du point de vue des milieux végétaux. Néanmoins, pour le moment, nous n'avons pas encore assez de données paléoenvironnementales associées à ces traces. Il est donc difficile de connaître leur potentiel réel, qui est certainement assez variable selon les contextes. C'est un aspect qu'il est indispensable de creuser (malacologie, phytolithaires, anthracologie, palynologie, etc.). Il serait facile de se contenter d'une hypothèse déductive, celle que la mise en évidence de l'écobuage caractérise en elle-même la présence de milieux prairiaux et ouverts. C'est certainement vrai de manière générale, compte tenu des types de sols considérés, très humides ou saisonnièrement engorgés. Néanmoins, nous avons vu que d'après les archives historiques, les fourneaux n'étaient pas uniquement associés à des milieux ouverts, c'est le cas particulier de l'essartage à feu couvert, qu'il ne faudrait pas a priori négliger. À ce propos d'ailleurs, pour le moment nous ne savons pas s'il serait effectivement possible de dissocier archéologiquement les vestiges de l'écobuage de l'essartage à couvert. Là aussi, les méthodes paléoenvironnementales devraient permettre de préciser les choses. Nous nous sommes demandé si les quantités relatives de bois carbonisés pourraient fournir un indice pour tenter de distinguer les deux techniques. Mais en fait, les charbons de bois étant particulièrement flottables, on peut penser qu'ils ont toutes les chances d'être remobilisés et exportés dans des contextes ponctuellement inondés. En attendant d'acquérir des données qui permettraient d'avancer sur la question, et étant donné la proximité opératoire entre l'essartage à feu couvert et l'écobuage, on peut raisonnablement considérer le premier comme une variante mineure du second. De plus, historiquement, l'essartage à feu couvert semble plutôt associé à des milieux boisés secondaires de faibles densités.

En tout cas, les premières pistes dont nous disposons révèlent assez clairement que les vestiges que nous relevons se rapprochent nettement plus des écobuages dits des « croûtes terreuses » de Roland Portères que des écobuages des gazons « classiques » de François Sigaut. Et ceci n'est peut-être pas un fait anodin. Car si les écobuages des gazons sont étroitement associés aux systèmes herbagers et à l'élevage, ceux des croûtes terreuses paraissent avant tout être reliés à des systèmes de culture. Ce schéma très simpliste est-il transposable pour les périodes préhistoriques ? Il est tentant, mais trop tôt pour y répondre. On se gardera donc de généraliser.

Néanmoins, pour ce qui est d'un site comme Chalain, étant donné les relativement petites surfaces exploitables entre les bordures des lacs et le versant morainique, nous aurions tendance à penser que ces terres auraient pu être exclusivement dédiées à l'agriculture (mais est-il certain que les écobuages aient été limités à la frange littorale ?). Il sera nécessaire de chercher des indices microscopiques ou géochimiques pour le vérifier ou le réfuter. Pour le moment, il n'a pas été repéré d'indices d'empreintes d'animaux. En bref, avec l'écobuage, on peut tout à fait imaginer que certains groupes néolithiques aient employé couramment le feu dans le cadre d'une agriculture temporaire, sans que celle-ci ne se déroule en forêt. L'opposition binaire entre abattis-brûlis et « agriculture intensive de jardin » doit donc être revue.

Il est évident que la pratique de l'écobuage possède des avantages particuliers et uniques pour la bonification des terres lourdes et humides. Cela étant, ces sols sont pour l'essentiel également situés dans les secteurs d'accrétion sédimentaire les plus favorables à leur préservation. Mais l'écobuage était-il uniquement employé dans ce type de contexte ? Par déduction, on peut seulement dire que d'un point de vue technique il était tout à fait possible que d'autres types de terres aient été cultivées avec cette méthode (exception faite des sols sableux). Mais si l'opération pouvait être plus aisée sur des terres plus légères, il n'est pas certain que l'écobuage y permette d'y obtenir des résultats aussi bons (du point de vue de la fertilisation) qu'en contextes très argileux. Les exemples du sommet du Puy de Dôme et d'Espalem montrent que cette pratique ne concerne pas seulement les bas-fonds humides. Mais la préservation de ces traces sur ces plateaux est certainement assez exceptionnelle (d'où la nécessité de vérifier les traces du mont Dôme), et pour une part liée aux propriétés particulières de ces sols volcaniques, et à une conjonction de facteurs favorables, qu'il est difficile de bien saisir¹¹⁵. C'est pourquoi la reconnaissance géoarchéologique des produits de combustion en position secondaire nous paraît loin d'être négligeable, puisqu'en contexte de plateau, il est vraisemblable que ce soit les types de traces les plus fréquentes que l'on puisse retrouver. Et il nous semble que les produits des fourneaux d'écobuages peuvent être suffisamment singuliers, pour espérer que l'on puisse les identifier dans ce type de situation. Nous ne pouvons donc pour le moment pas dire si l'écobuage était spécifique aux terrains argileux humides, mais nous pouvons raisonnablement en douter, et il est indispensable d'au moins en considérer la possibilité.

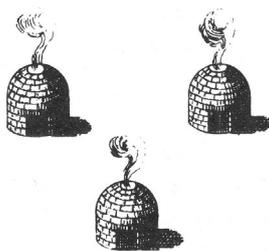
Nous avons dit qu'il serait pertinent de savoir si l'écobuage était seulement d'usage chez certains groupes néolithiques. L'enregistrement systématique de ces phénomènes et la multiplication des datations devraient apporter des pistes de réponse à cette question. Mais ceci en amène une autre, nettement moins évidente, celle de l'autonomie ou de la complémentarité de l'écobuage dans les systèmes agricoles préhistoriques. Pour l'abattis-brûlis, il est documenté que celui-ci peut aussi bien

¹¹⁵ Sur le site d'Espalem, les vestiges sont préservés en position de rebord de plateau et il apparaît que la datation du phénomène se produit au début d'une période de dégradation marquée des conditions climatiques. Ce petit plateau est ponctué de larges dépressions topographiques humides, dits « lacs », qui ne correspondent vraisemblablement pas à des formations d'origine volcanique mais seraient liées à une dissolution de couches sédimentaires inférieures aux niveaux de basaltes (Thonat, 2014). Nous nous sommes demandés si dans ce contexte très particulier, la dégradation du climat et l'augmentation des précipitations ne pourrait pas, d'une manière ou d'une autre, être lié à leur préservation (débordements des lacs ?). La chronologie située d'ailleurs ces traces à la fin de la période d'occupation de l'éperon barré du Razé, situé sur ce plateau (Dendievel, Delrieu et Duny, 2020).

apparaître comme la technique centrale, sinon unique de mise en culture, ou tout autrement, comme une méthode d'appoint. Par contre, si l'on suit les écrits de R. Portères (1972), cela ne serait pas le cas pour l'écobuage, qui serait une technique totalement indépendante de l'abattis-brûlis. Malheureusement, nous manquons de données sur cet aspect (il faudrait reprendre en détail la littérature ethnogéographique). En tout cas, il nous semble évident qu'il faudra essayer de confronter la chronologie de ces phénomènes avec des restitutions de « signal incendie ». Nous avons dit que d'un point de vue technique, il nous paraissait très peu probable que l'écobuage puisse participer à l'influx de charbons dans ces séquences, du moins par voie aérienne. Sur cette problématique précise, les approches géoarchéologiques et paléoenvironnementales n'en sont que d'autant plus complémentaires.

D'où vient l'écobuage ? S'est-il développé ponctuellement et indépendamment en divers endroits ? S'est-il propagé avec l'avancée des groupes méditerranéens, précisément à la recherche de ces terres humides et fertiles des plaines littorales ? Ou tout au contraire, pourrait-il avoir été développé au cœur du continent, dans les terres riches du Massif central ou encore dans diverses plaines alluviales, au sein d'une population néolithique déjà installée ? Nous n'avons pour le moment que des pistes très minces. Néanmoins, les premières datations obtenues à Chalain pourraient tout à fait correspondre aux périodes de colonisations attribuées aux groupes du Midi (groupe de Ferrières, à partir de 3100 cal. BC ; Pétrequin et al., 2000). Les événements observés dans les Marais de Saint-Gond semblent s'être déroulés plus ou moins à la même période. Et, il a été avancé qu'une partie du mobilier domestique de ce secteur présentait des caractéristiques qui les rapprochaient des traditions culturelles observées chez les groupes néolithiques qui occupent la Combe d'Ain (même si les influences stylistiques seraient là plutôt à rechercher du côté des groupes du Horgen). Dans le cas des occupations néolithiques de Limagne, les influences culturelles méridionales sont aussi clairement mises en avant. Si nous ajoutons les premiers indices discrets que nous avons repérés par exemple à Marseille (niveaux vertiques cultivés) et les sites des plaines littorales italiennes, il ne nous paraîtrait pas étonnant que la propagation de cette pratique agricole singulière, et il faut le rappeler, technique de culture temporaire, corresponde à celle des groupes néolithiques méditerranéens.

Si l'on revient au processus technologique de cette pratique, il est difficile de faire abstraction de la relation entre céramique et fourneaux d'écobuages. Les produits de cette méthode de préparation du champ appliquée à ces terres lourdes et argileuses sont, au sens premier, des matériaux céramiques. Alors certes, ces argiles sont plutôt « torréfiées » que cuites, mais tout l'art de l'écobuage n'est-il pas celui-là ? Si le Néolithique est l'âge de la céramique, alors du seul point de vue technologique, l'écobuage apparaît, plus que tout autre technique agricole, comme la technique de préparation du champ « emblématique » du Néolithique.



Conclusion

Dans ce mémoire, nous nous sommes attelés à répondre à la problématique suivante : *peut-on mettre en évidence, à travers les marqueurs de feu préservés dans les archives pédologiques et sédimentaires, l'existence de pratiques agricoles ou pastorales ?*

Nous avons réalisé une synthèse générale des modèles archéologiques concernant les agricultures du Néolithique, et nous avons constaté que deux principaux systèmes étaient généralement mis en opposition. D'un côté, l'abattis-brûlis, une agriculture forestière cyclique reposant sur l'emploi régulier du feu courant (Sigaut, 1975, 1979 ; Mazoyer et Roudart, 1997). Cette hypothèse, quasiment historiographique, découle en partie de comparatismes ethnographiques et parfois de préjugés – tant sur l'archaïsme des agricultures néolithiques, que des peuples actuels évoluant dans les forêts tropicales humides – ainsi que par une logique déductive des objets archéologiques, précisément sur l'apparition et la récurrence des haches polies. Si ces considérations péjoratives n'ont aujourd'hui en général plus cours, il persiste des amalgames à propos de l'abattis-brûlis. Les arguments en faveur de son existence durant les périodes préhistoriques, reposent principalement sur des données paléo-environnementales issues des archives sédimentaires naturelles (palynologie et signal incendie). En opposition, a été proposé un autre modèle décrit comme une « agriculture intensive de jardin », où de petites parcelles sont cultivées de façon permanente, amendées par des fumiers animaux et associées à un investissement important en main-d'œuvre (Bogaard, 2004a). Cette hypothèse est principalement fondée sur l'analyse des carpores conservés sur des sites d'habitats. Il nous apparaît que les données employées en faveur de chacune de ces hypothèses sont complexes et parfois ambiguës.

Bien qu'il soit souvent considéré que les pratiques agropastorales liées au feu ne laissent que des indices physiques extrêmement ténus et difficiles, voire impossibles à distinguer de ceux des feux naturels, nous relevons dans les publications archéologiques, des mentions fréquentes de traces de feux attribuées à des déboisements anthropiques ou traduisant des événements naturels. Il s'agit en particulier de faits dénommés comme des « foyers d'essartages », des « foyers de déforestations » ou encore des « chablis brûlés ». Malgré leur apparente fréquence, on ne trouve quasiment pas de renseignements concrets sur ces structures et les indications sur les processus menant à leur formation sont peu explicites. Elles correspondraient tantôt à des racines brûlées en place, notamment illustrées par des trainées rayonnantes, tantôt à des emplacements où des souches ont été brûlées (foyers à plat). Le fait que ces surfaces soient préservées, alors qu'elles se trouvent, à plus forte raison, dans des terrains d'exploitation agro-pastorale, n'est pas discuté.

La synthèse que nous avons réalisée sur les systèmes d'agricultures modernes apporte un autre éclairage sur les modèles archéologiques proposés par les archéologues préhistoriens. La question des méthodes de renouvellement et d'entretien de la fertilité des champs est centrale, et il apparaît que les cultures permanentes sont souvent étroitement dépendantes des ressources secondaires offertes par les cultures temporaires (friches). La complexité des systèmes d'agricultures préindustriels invite à beaucoup de prudence. Néanmoins, de manière extrêmement schématique, on observe qu'il y aurait d'un côté des systèmes où les cultures temporaires servent d'appoint (mais restent essentielles pour les

ressources secondaires), de l'autre, des systèmes où les cultures temporaires sont largement prédominantes (Sigaut, 1975 ; Viader, 2014). Si l'on considère que le problème de la fertilisation des cultures reste aussi central, quels que soient les outillages dont disposent les agriculteurs, alors ces observations paraissent tout à fait pertinentes pour analyser les agricultures préhistoriques. Ceci nous entraîne à douter fortement de la pertinence d'une opposition binaire et exclusive entre *abattis-brûlis* et *culture intensive de jardins*.

D'après les archives modernes et la littérature ethnographique et agronomique extra-européenne contemporaine, on apprend que dans le domaine de la préparation des champs à la culture, le feu peut être employé de deux manières radicalement différentes. Dans la première, qui correspond à la technique de l'abattis-brûlis, le feu est mené à courant, sur des arbres préalablement abattus et laissés à sécher au sol. Dans ce système, les souches ne sont jamais extirpées des terrains, car elles assurent la repousse de la végétation ligneuse, indispensable au renouvellement de l'opération après quelques dizaines d'années. Dans le second système, ce sont de véritables fourneaux qui sont réalisés. Pour cela, la surface du terrain à préparer est totalement pelée, sur une profondeur qui peut atteindre une vingtaine de centimètres. Les plaques ou les masses de sols décapées sont séchées puis sont entassées et architecturées comme des fourneaux qui brûleront très longuement (Portères, 1972 ; Sigaut, 1975). Cette technique correspond à l'écobuage, pris dans son sens « classique », technique qui recouvre en réalité plusieurs variantes selon son milieu d'application. L'écobuage ne concerne en règle générale que les terrains ouverts, herbacés ou engazonnés.

Les deux techniques se montrent – comme toutes les techniques – loin d'être simples et rudimentaires. Les nombreux exemples historiques de systèmes d'abattis-brûlis en Europe et en contexte climatique tempéré invalident certaines considérations négatives et persistantes vis-à-vis de cette pratique. Nous ne faisons là aucune démonstration originale, la littérature sur le sujet n'est simplement pas prise en considération. D'autre part, l'écobuage est une pratique méconnue alors qu'elle semble avoir occupé une place relativement importante à l'époque moderne.

Nous ne trouvons aucune information précise concernant un système ou une technique particulière visant à brûler les souches extraites des terrains déboisés pour l'agriculture (hors procédés mécanisés actuels). La pénibilité de l'opération d'extraction est telle, que les souches gagnent à être valorisées plutôt que réduites en cendres. La documentation forestière montre par contre que des souches d'arbres peuvent brûler en place lors d'incendies. Cependant, ce phénomène n'est renseigné que dans des terrains au climat assez sec et dans des stations suffisamment drainantes pour que les systèmes racinaires aient pu totalement sécher. Dans certains cas, mais pas systématiquement, des altérations thermiques notables peuvent advenir, qui se marquent par une morphologie assez singulière, sur les pourtours des cavités laissées par les troncs et les grosses racines, ces derniers ayant subi une combustion complète.

Les données relatives aux produits de l'écobuage sont relativement frustes, mais suffisamment éclairantes. Nous observons que l'écobuage, quand il ne se limite pas aux entrelacs racinaires des gazons, mais concerne une proportion du sol minéral notable, engendre une cuisson rubéfiante d'un volume important de terre. Sur la base de la comparaison des effets renseignés dans le cas d'incendies de végétation, naturels ou anthropiques, nous en concluons que les techniques agricoles procédant par

l'emploi des fourneaux doivent posséder une visibilité archéologique potentielle forte, du moins largement plus que tout autres types de feu de surface (tout contexte égal par ailleurs).

Dans ce travail, nous avons mené des analyses géoarchéologiques sur plusieurs sites où ont été identifiées des « anomalies », prenant la forme de concentrations ou de niveaux fortement teintés, particulièrement visibles dans les séquences pédo-sédimentaires. Nous avons réalisé des analyses sur des « anomalies » de quatre sites d'étude : à Vaudes, situé dans la plaine alluviale d'un affluent de la Seine (Aube) ; à Chalain, sur les terrains humides périphériques au lac (Jura) ; dans les anciennes zones humides de Limagne et au sommet du Puy de Dôme (Puy-de-Dôme). Un autre site en périphérie des Marais de Saint-Gond (Marne) a fait l'objet de descriptions et de prélèvements. Un panel analytique varié a été mis en place pour caractériser ces différentes traces : analyse minéralogique (DRX) et élémentaire (XRF), spectrophotométrie, susceptibilité magnétique, dosages du fer et de l'aluminium (analyses INRAE), micromorphologie, microscopie au MEB-EDS. Des cuissons expérimentales contrôlées de sédiments ont aussi été réalisées. En outre, nous avons essayé de garder une place importante à la caractérisation morphologique macroscopique de ces phénomènes. Les résultats obtenus nous ont permis de discuter de leurs processus de formation, et de mettre en évidence la pertinence et la complémentarité de ces diverses méthodes analytiques.

Les phénomènes étudiés se montrent dans le détail très variables entre eux, mais possèdent des caractères communs. Ils résultent d'une chauffe de matériaux locaux, pour l'essentiel minéraux, et très largement voire presque exclusivement formés dans des conditions oxydantes. Leurs morphologies en plan et en stratigraphie sont complexes. Elles se présentent comme des concentrations parfois volumineuses, mais très irrégulières à différentes échelles de description, et spatialement discontinues. Néanmoins, sur le site de Vaudes, la reprise de la documentation photographique zénithale nous permet d'identifier des faciès qui se répètent, où la terre rubéfiée est très concentrée, ou prend la forme de mottes plus ou moins bien définies. Nous relevons également la présence de longues trainées linéaires discontinues, incompatibles avec des traces de racines, que nous interprétons comme des raies de labour d'outils tractés (araire). Des traces rubéfiées prenant une forme étoilée sont observées, elles se trouvent dans des zones moins denses en traces. En considérant le continuum morphologique de ces faciès, nous en concluons que ces trainées rayonnantes résultent de plusieurs labours croisés. Nous supposons que la préservation de ce dernier faciès est la conséquence d'un volume de matériaux rubéfiés initialement plus important à cet endroit qu'alentour. Il ne correspond en aucun cas à des marques d'un système racinaire. D'autre part, l'observation en coupe, sur de petites fenêtres, peut fournir de premières pistes d'interprétation quant à leur modalité de mise en place (site de Chalain). La multiplication des observations permet d'observer des faciès (coupes, tronçatures) que nous ne savons pas expliquer comme étant le résultat de phénomènes naturels, mais qui nous évoquent fortement des traces d'outillages voire des traces aratoires.

Les différentes analyses géochimiques peuvent fournir des résultats contradictoires par rapport au fait que cette rubéfaction résulte d'une chauffe. Néanmoins, leur mise en œuvre conjointe permet de proposer des schémas de formation cohérents de ces matériaux. Ils résultent de la combinaison d'altérations thermiques et de phénomènes post-dépositionnels divers, les premiers favorisant dans certains contextes les seconds (Chalain et Limagne). Cela peut être expliqué par des modifications texturales et structurales (formation de pseudo-particules, brassage mécanique des matériaux) ainsi que

par des altérations thermiques qui restent relativement modérées (minéralogie). Ces dernières engendrent une décomposition plus ou moins grande des structures des minéraux argileux, la formation d'alumino-silicates plus ou moins amorphes et la formation d'oxydes de fer dont la cristallinité est mauvaise ou faiblement exprimée. Nous proposons que ces produits constituent des précurseurs qui peuvent évoluer de façon diverse selon les spécificités de leur milieu d'enfouissement, favorisant par exemple plutôt la cristallisation de goethite ou plutôt celle d'hématite.

Les observations micromorphologiques confirment que des processus rédoximorphes peuvent se surimposer aux matériaux déjà teints par la chauffe. Il semble que les couleurs vives de ces traces ne s'expliquent pas nécessairement par l'abondance d'hématite, mais plutôt vraisemblablement par sa présence sous une forme microcristalline (Limagne). Le croisement des différents résultats va dans le sens que les plus fortes teintes rouges s'expliquent par des processus postérieurs plutôt que par la chauffe elle-même. Le même phénomène est mis en évidence à Chalain, mais il ne s'exprime que ponctuellement, dans des microsites favorables. Il apparaît donc qu'une interprétation des teintes, uniquement selon un point de vue thermique, peut être erronée. Les processus de remobilisation et de cristallisation du fer postérieurs à la chauffe constituent le premier groupe de phénomènes qui modifient ces traces.

Le second processus notable identifié, qu'il nous a été difficile à comprendre et à mettre en évidence, est celui d'une évolution post-dépositionnelle des matériaux encaissants et/ou des matériaux chauffés, sous la forme d'un processus qui s'apparente à une « vertisolisation ». Ces matériaux se présentent du point de vue granulométrique de façon relativement similaire aux matériaux encaissants non modifiés, ils sont par contre nettement plus plastiques à l'état humide, très denses à l'état sec et montrent une structure sphéroïde. Ils sont également nettement noirâtres, alors même qu'ils sont moins riches en carbone organique total (site de Chalain). Du point de vue géochimique, les premiers éléments dont nous disposons suggèrent une néoformation ou une aggradation de minéraux chloritiques, notamment en fer. Nous interprétons ce phénomène comme une conséquence de l'enrichissement en fer et en alumino-silicates amorphes résultant de la chauffe, en milieu relativement confiné. Cette « vertisolisation » s'opère à une échelle vraisemblablement inférieure à quelques siècles et possiblement même bien plus rapidement. En outre, ce processus peut entraîner une confusion avec des poussières charbonneuses (aspect luisant) ou des indices de cuisson réductrice. Ce phénomène n'est pas mis en évidence en Limagne et sur le Puy de Dôme. Ceci pourrait être associé au fait que ces terrains sont nettement moins riches en argiles minéralogiques et que la rétention d'eau y est moins forte, à moins que cette altération ne soit simplement pas visible du fait de la nature des matériaux encaissants très sombres. Il sera nécessaire de pousser plus avant les caractérisations pour comprendre précisément ce mécanisme.

Les cuissons expérimentales de sédiments, couplées à la colorimétrie, illustrent que les évolutions des couleurs peuvent nettement varier selon les matériaux, mais aussi pour des matériaux dont la constitution est apparemment proche (Chalain et Vaudes). D'autre part, il apparaît que les durées de chauffe constituent un paramètre qui influence fortement l'évolution des couleurs, et en particulier dans des gammes de températures modérées (400-500°C). En outre, ces résultats montrent qu'il ne faut pas considérer que l'importance de la rubéfaction implique nécessairement des chauffes de forte intensité. Cette approche nous permet de proposer des gammes de températures-durées de cuisson des traces étudiées, ainsi que de discuter de l'évolution post-dépositionnelle des couleurs des traces étudiées.

Nous faisons l'interprétation que ces « anomalies pédo-sédimentaires », aussi diversifiées semblent-elles, peuvent s'expliquer par des pratiques d'écobuages. Elles correspondent, pour nous, aux résidus de cuisson des fourneaux en terre, redéposés sur la surface où le décapage a été opéré. C'est ce qui explique que leur morphologie ne corresponde pas à celles de surfaces brûlées. Dans des situations favorables, dont il n'est pas toujours possible de préciser la ou les raisons exactes (dans des micro-dépressions ? du fait d'une conjonction de facteurs ?), les résidus de cuisson peuvent être préservés quasiment « intacts », sous forme de mottes (Vaudes ; dans ce cas, certainement associées à des micro-dépressions de la surface décapée) ou de plaques (Chalain, Puy de Dôme). Elles correspondent sinon au niveau basal de ces traces, qui peuvent avoir été largement brassées, soit directement par les pratiques aratoires, soit par l'activité biologique postérieure (possiblement même concentrée dans ces traces aux propriétés physiques favorables). Nous interprétons leurs différents états de préservation, comme la conséquence du nombre de mises en culture postérieures. Il est toutefois évident que pour le moment, ceci reste totalement hypothétique, car il n'existe pas de référentiel de comparaison sur ce type de techniques agricoles. Dans tous les cas, la préservation de telles traces peut être directement liée au fait que l'écobuage est une pratique agricole temporaire, c'est-à-dire qu'elle implique un arrêt des cultures ou un abandon des terrains, une ou quelques années après la réalisation des fourneaux.

La concomitance de pollens de céréales dans ces vestiges renforce cette hypothèse agricole (Chalain et Limagne). Par contre, il est flagrant que nous n'observons pas les traits micromorphologiques « classiquement » associés à des indices de mises en culture. Il est indispensable pour la suite de développer les analyses paléo-environnementales sur ces vestiges.

Nous avons présenté nos premiers résultats du dépouillement des rapports de diagnostics et de fouilles préventives. Les données archéologiques des faits dénommées comme « *foyers d'essartages* », « *foyers de déforestations* » ou « *chablis brûlés* », se montrent très hétérogènes. Il s'agit souvent de faits ponctuels ou isolés, qui dans la majorité des cas se limitent à de courtes mentions. Néanmoins, nous relevons plusieurs opérations où, un grand nombre de ces traces sont répertoriées et documentées. Bien que ces phénomènes ne soient généralement pas étudiés par des approches géoarchéologiques, nous retrouvons des caractéristiques morphologiques et contextuelles similaires aux vestiges que nous avons analysés. Compendieusement, il s'agit des concentrations ou de masses de terre, ocrées à rubéfiées, considérées comme chauffées, retrouvées dans des séquences pédo-sédimentaires dominées par des matériaux fins (argiles-silts) et marqués par l'hydromorphie. Certains possèdent des faciès que nous jugeons comme tout à fait caractéristiques. Nous faisons l'hypothèse que ces traces correspondent à des vestiges de fourneaux d'écobuages.

Nous faisons également le postulat que leur relative diversité morphologique s'explique, pour l'essentiel, par les caractéristiques mêmes des matériaux concernés (différences de composition minéralogique et élémentaire) et la dynamique hydrologique spécifique à chaque contexte d'enfouissement. Ceci se traduirait par des différences dans les colorations des matériaux cuits, conséquence d'une migration et d'une cristallisation du fer au sein même des traces, ainsi que d'une transformation des minéraux argileux encaissants sous une forme de « vertisolisation » plus ou moins accentuée. Ces phénomènes nécessiteraient d'être étudiés, au cas par cas, pour être validés et comprendre les dynamiques précises qui régissent ces différentes évolutions.

Cela étant, nous en concluons qu'il est possible d'identifier grâce aux approches géoarchéologiques, au moins une pratique agricole singulière : l'écobuage. Elle possède, pour nous, une visibilité archéologique très importante, qui peut s'expliquer de manière logique par sa chaîne opératoire (fourneaux en terre, pratique agricole temporaire). En l'état, celle-ci est largement sous-évaluée. Ces produits peuvent potentiellement être confondus avec des traits pédologiques de type rédoxique. Un travail très important reste à faire sur cet aspect. À terme, dans des cas favorables et des contextes courants (p. ex. alluvions argileuses des plaines alluviales et marais minéraux), il devrait être possible d'assurer la reconnaissance de traces de fourneaux agricoles, uniquement par des caractérisations morphologiques. Nous faisons aussi l'hypothèse que les vestiges d'écobuages puissent n'être préservés que sous la forme de minces niveaux argileux noirâtres aux caractéristiques vertiques.

Nous avons proposé une liste de critères généraux qui peuvent permettre d'orienter les descriptions et l'identification de ces traces. Il est évident que dans certaines régions ce type de traces est déjà bien connu des archéologues. Cependant, nous réfutons clairement l'interprétation dite de « *foyers d'essartage* » ou de « *foyers de déforestation* ». Ces traces ne correspondent aucunement à des foyers, et encore moins à des vestiges de souches brûlées. Si certaines de ces traces le sont effectivement, la démonstration n'en a pas été faite, à notre connaissance. Au vu des éléments en notre disposition, nous soutenons que cette interprétation est un modèle archéologique purement théorique, qui est non seulement contredit d'un point de vue systémique à travers les archives modernes, mais également par la documentation forestière portant sur les incendies de forêts naturels et, qui est maintenant contredit par des arguments géoarchéologiques.

La découverte de ces traces de fourneaux atteste des lieux mêmes qui ont été autrefois cultivés. Il faut néanmoins considérer que ces traces ne correspondent, malgré tout, qu'à une infime portion du sol ayant été mis en œuvre par ce procédé. Elles peuvent donc être considérées comme des lambeaux de paléosols cultivés, qui sont des objets archéologiques à part entière. Un travail important reste encore à faire pour que ces traces révèlent la totalité de leur potentiel en termes d'archives pédo-sédimentaires. Le procédé de l'écobuage était déjà connu au Néolithique, en diverses régions du territoire français et en toute logique également ailleurs. Ces découvertes invitent à revoir un certain nombre de préjugés et de postulats sur les agricultures préhistoriques. Certains groupes néolithiques, au moins, mettaient en œuvre des procédés techniques relativement complexes et entraînant des modifications très importantes sur les sols, afin de cultiver des terrains riches, mais très contraignants. Son emploi démontre ainsi que le travail de la terre avait déjà une importance majeure dans ces agricultures (au contraire de l'abattis-brûlis), et que les bénéfices empiriques de la cuisson de la terre étaient déjà largement connus. Cela ouvre de nouvelles pistes de réflexions et d'analyses pour comprendre les sociétés des premiers agriculteurs.

Bibliographie

Références antérieures à 1900

Baudet-Lafarge, Jacques-Antoine (1800). *Agriculture du département du Puy-de-Dôme*, par la Société centrale d'agriculture de ce département, sous la direction de M. J.-A. Baudet-Lafarge, son secrétaire général. : Clermont-Ferrand, éd. P. Hubler ; <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb300666659.public>

Berg (von), Carl Heinrich Edmund (1860). *Anleitung zum Verkohlen des Holzes ein Handbuch für Forstmänner, Hüttenbeamte, Technologen und Cameralisten*, Darmstadt
<https://mdz-nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:12-bsb10304383-7>

Dombasle, Mathieu de (1862). *La richesse du cultivateur, ou les secrets de Jean-Nicolas Benoit*, la Fabrique d'instruments d'agriculture ; <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb30906524r>

Duhamel Du Monceau, Henri-Louis (1762). *Illustrations de Eléments d'agriculture*.
<https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb38495202g>.

Duhamel Du Monceau, Henri-Louis (1780). *Des semis et plantations des arbres, et de leur culture : ou Méthodes pour multiplier et élever les arbres, les planter en massifs & en avenues ; former les forêts & les bois ; les entretenir, & rétablir ceux qui sont dégradés : faisant partie du Traité complet des bois & des forêts*.
<http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb30370443q>

Lasteyrie, (de), (1827). « *De l'écobuage* » en Catalogne. *Journal des connaissances usuelles et pratiques*, Paris, p. 36 et 89

Laure, Henri (1837-1839) *Manuel du cultivateur provençal, ou Cours d'agriculture simplifié pour le midi de l'Europe et le nord de l'Afrique*. 2 vol. ; <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb307505705>

Naudin, Charles (1860). *Le potager, jardin du cultivateur*, Librairie agricole de la Maison rustique, 1 vol., 228 p.

Poiré, Paul et Perrier, Edmond (1924-1925). *Nouveau dictionnaire des sciences et de leurs applications*.
<https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb32285543h>)

Ringelmann, Max (1890). *Étude dynamique sur les moissonneuses-lieuses*, Paris : impr. de G. Chamerot,
<http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb31218774g>

Thaer, Albrecht (1811-1814). *Principes raisonnés d'agriculture*, traduits de l'allemand d'A. Thaer par Crud Élie-Victor-Benjamin. 3 Tomes. <http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb30289452w.public>

Turbilly Louis-François-Henri de Menon (1760). *Mémoire sur les défrichemens*. Deuxième édition. Paris
<http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb393093066>

Villeneuve, Louis de (1843) *Manuel d'agriculture pratique, à l'usage des départements du sud-ouest*, 2 vol.,
<http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb315831481>

Références postérieures à 1900

A. de Beaune S., 2014, « François Sigaut (1940-2012) ou la technologie, science humaine », *Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines*, 1, p. 7-10.

Achard-Corompt N., Riquier V., 2015, « Les fosses à profil en Y: un nouveau champ de recherche pour le Néolithique ou pourquoi continuer de fouiller les fosses à profil en Y », *Occupations et exploitations néolithiques. Et si on parlait des plateaux*, p. 365-384.

Achard-Corompt N., Auxiette G., Fechner K., Riquier V., Vanmoerkerke J., 2013, « Bilan du programme de recherche : fosses à profil en V, W, Y et autres en Champagne-Ardenne », dans *Chasse, culte ou artisanat ? Les fosses « à profil en Y-V-W » : Structures énigmatiques et récurrentes du Néolithique aux âges des Métaux en France et alentour*, Dijon, ARTEHIS Éditions (Suppléments à la Revue archéologique de l'Est), p. 11-81.

Achard-Corompt N., Bellavia V., Brunet P., Dandurand G., 2021, « Un gisement exceptionnel de fosses profondes du Mésolithique et du Néolithique : Recy et Saint-Martin-sur-le-Pré, Marne, Parc de référence, « Le Mont Grenier » 2013 - 2014 », Rapport de fouille, Metz, Inrap Grand Est.

AFES 2009 *Référentiel pédologique 2008 (Association française pour l'étude du sol)*, BAIZE D., GIRARD M.-C. (dirs.), D. Baize et M.-C. Girard (coord.) ; Éditions Quae, 405 p.

Agee J.K., Skinner C.N., 2005, « Basic principles of forest fuel reduction treatments », *Forest Ecology and Management* 211: 83-96, 211, p. 83-96.

Aldeias V., 2017, « Experimental Approaches to Archaeological Fire Features and Their Behavioral Relevance », *Current Anthropology*, 58, S16, p. S191-S205.

Alfonso G., 2002, « Gerzat (Puy-de-Dôme) : Parc logistique de Clermont-Auvergne - Tranche 2 », Rapport de diagnostic, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.

Alfonso G., 2003, « Beaumont (Puy-de-Dôme) : Champ Madame et Artière-Ronzière : A.F.U. Les Jardins de Bernard Maître : Etablissement rural gallo-romain : Occupation et sépultures médiévales : rapport de fouilles », Fouille Archéologique Préventive : Document Final de Synthèse, Bron, Inrap Rhône-Alpes/Auvergne.

Alfonso G., 2006, « Les Martres-de-Veyre – Rue du Lot (lotissement Manlhiot) », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.

Alfonso G., 2014, « Les Martres-de-Veyre (Puy-de-Dôme) : Soucheiroux », Rapport de diagnostic, D107152, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Alfonso G., 2015, « Aulnat, Puy-de-Dôme, Auvergne. Rue Léon Maniez-Les Chapelles », Rapport de diagnostic, D108880, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Alfonso G., Deberge Y., Thomson I., Vernet G., 2019, « Clermont-Ferrand, Puy-de-Dôme, Auvergne-Rhône-Alpes. Rue Adrienne Bolland », Rapport de diagnostic, D125071, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Alfonso G., Georjon C., 2014, « Lezoux (Puy-de-Dôme) : Zone d'activités entre Dore et Allier », Rapport de diagnostic, D105975, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Amare T., Yitaferu B., Hurni H., 2013, « Effects of " Guie" on Soil Organic Carbon and Other Soil Properties: A Traditional Soil Fertility Management Practice in the Central Highlands of Ethiopia », *Journal of Agricultural Science*, 5, 7, p. 236.

Anderson M.K., 1996, « The Ethnobotany of Deergass, *Muhlenbergia rigens* (Poaceae): Its Uses and Fire Management by California Indian Tribes », *Economic Botany*, 50, 4, p. 409-422.

Antoine A., 2014, « Cycles culturels, usages et appropriation de l'espace rural (France, fin du Moyen Âge-Époque moderne) : Les enjeux d'une comparaison avec le modèle anglais », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturelles et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 147-168.

Antoine P., 2002, « Les lœss en France et dans le Nord-Ouest européen », *Revue Française de Géotechnique*, 99, p. 3-21.

Antolín F., Jacomet S., Buxó R., 2015, « The hard knock life. Archaeobotanical data on farming practices during the Neolithic (5400–2300 cal BC) in the NE of the Iberian Peninsula », *Journal of Archaeological Science*, 61, p. 90-104.

Arbogast R.-M., Magny M., Pétrequin P., 1996, « Climat, cultures céréalières et densité de population au Néolithique : le cas des lacs du Jura français de 3500 à 2500 av. J.-C. », *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 26, p. 121-144.

Arcand B., 1988, « Il n'y a jamais eu de société de chasseurs-cueilleurs », *Anthropologie et sociétés*, 12, 1, p. 39-58.

Arduino E., Barberis E., Ajmone Marsan F., Zanini E., Franchini M., 1986, « Iron oxides and clay minerals within profiles as indicators of soil age in Northern Italy », *Geoderma*, 37, 1, p. 45-55.

Argant J., 2004, « Végétations holocènes et premières traces d'anthropisation dans le bassin du Rhône révélées par l'analyse pollinique », *Néolithisation précoce : premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques*, p. 135-145.

Arnaud P., 2003, « Aulnat (Puy-de-Dôme) : Ilot des Martyrs, rues Lamartine, du Commerce, du 11 novembre : rapport de diagnostic », Rapport de diagnostic archéologique, Bron, Inrap Rhône-Alpes/Auvergne.

Arnaud P., Georjon C., Thomson I., 2014, « Vertaizon (Puy-de-Dôme) : Les Noyeraies », Rapport de diagnostic, D106093, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Arnaud P., Thomson I., Vernet G., 2014, « Cournon-d'Auvergne (Puy-de-Dôme) : Chemin des Chemerets », Rapport de diagnostic, D105554, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Arroyo-Kalin M., 2012, « Slash-burn-and-churn: Landscape history and crop cultivation in pre-Columbian Amazonia », *Quaternary International*, 249, p. 4-18.

Ashbee P., Smith I.F., Evans J.G., 1979, « Excavation of Three Long Barrows near Avebury, Wiltshire », *Proceedings of the Prehistoric Society*, 45, p. 207-300.

Aubert M., Bouillier R., Camus G., Cochet A., D'Arcy D., Giot D., Jeambrun M., Roche A., Bonhomme N., 1975, « Clermont-Ferrand. XXV-31. Notice explicative. Feuille 693 », dans *Carte Géologique de la France à 1/50 000.*, Orléans, France, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, p. 22.

Augereau A., Brunet P., Costa L., Cottiaux R., Hamon T., Ihuel E., Langry-François F., Magne P., Maingaud A., Mallet N., Martineau R., Mille B., Millet-Richard L.-A., Polloni A., Renard C., Richard G., Salanova L., Samzun A., Sidéra I., Sohn M., 2007, « Le Néolithique récent dans le Centre Nord de la France (3400/3300-2800/2700 av. J.-C.) : l'avenir du Seine-Oise-Marne en question », 3, p. 165.

Azéma J.-P.H. 2004 *Moulins du cuir et de la peau: moulins à tan et à chamoiser en France, XIIIe-XXe siècle*, EDITIONS CREER, 240 p.

Bábek O., Grygar T.M., Faměra M., Hron K., Nováková T., Sedláček J., 2015, « Geochemical background in polluted river sediments: How to separate the effects of sediment provenance and grain size with statistical rigour? », *CATENA*, 135, p. 240-253.

Babel U., 1975, « Micromorphology of Soil Organic Matter », dans GIESEKING J.E. (dir.), *Soil Components: Vol. 1: Organic Components*, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 369-473.

Badaut D., Risacher F., Paquet H., Eberhart J.P., Weber F., 1979, « Néof ormation de minéraux argileux à partir de frustules de diatomées : le cas des lacs de l'Altiplano bolivien », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série D : Sciences Naturelles*, 289, p. 1191-1193.

Bahuchet S., Betsch J.-M., 2012, « L'agriculture itinérante sur brûlis, une menace sur la forêt tropicale humide ? », *Revue d'ethnoécologie*, 1.

Bailey S.W., 1975, « Chlorites », dans GIESEKING J.E. (dir.), *Soil Components: Vol. 2: Inorganic Components*, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 191-263.

Baize D. 1997 *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France): Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET*, Quae, 416 p.

Baize D. 2000 *Guide des analyses en pédologie. 2ème édition, revue et augmentée*, Inra, Éditions Quae, 266 p.

Baize D. 2018 *Guide des analyses en pédologie: 3e édition revue et augmentée*, Editions Quae, 338 p.

Baize D., Chrétien J., 1994, « Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédo-géochimiques », *Etude et Gestion des Sols*, 1, 2, p. 7.

Baize D., Jabiol B. 1995 *Guide pour la description des sols*, Paris, Éditions Institut National de la Recherche Agronomique, 375 p.

Bajard M., Poulénard J., Sabatier P., Develle A.-L., Giguet-Covex C., Jacob J., Crouzet C., David F., Pignol C., Arnaud F., 2017, « Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene », *CATENA*, 150, p. 39-52.

Bajard M., Poulénard J., Sabatier P., Etienne D., Ficetola F., Chen W., Gielly L., Taberle P., Develle A.-L., Rey P.-J., Moulin B., Beaulieu J.-L. de, Arnaud F., 2017, « Long-term changes in alpine pedogenetic processes: Effect of millennial agro-pastoralism activities (French-Italian Alps) », *Geoderma*, 306, p. 217-236.

Bal M.-C., 2006, *Constructions et dynamiques des espaces et des terrasses agro-pastorales en zone intermédiaire des Pyrénées du Néolithique à nos jours (Cerdagne, Pays Basque et Pays de Sault). Approche archéoenvironnementale par la pédoanthracologie*, Thèse de doctorat : Géographie, Université Toulouse II - Le Mirail.

Bal M.-C., Allée P., Liard M., 2015, « The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses: Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. », *Quaternary International*, 366, p. 3-14.

Bal M.-C., Métailié J.-P., 2005, « Propositions méthodologiques pour l'étude des feux agro-sylvo-pastoraux en montagne pyrénéenne. Evaluation qualitative et quantitative des résidus d'incendies à partir des analyses pédoanthracologiques. », *Anthropozoologica*, 40-1, p. pp.81-93.

Bal M.-C., Rendu C., Ruas M.-P., Campmajo P., 2010, « Paleosol charcoal: Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic. A case study in the Eastern French Pyrenees. », *Journal of Archaeological Science*, 37, 8, p. 1785-1797.

Balek C.L., 2002, « Buried artifacts in stable upland sites and the role of bioturbation: A review », *Geoarchaeology*, 17, 1, p. 41-51.

Ballut C., 2000, *Évolution environnementale de la Limagne de Clermont-Ferrand au cours de la seconde moitié de l'holocène (Massif central français)*, These de doctorat, Limoges.

Ballut C., 2001, « Évolution géomorphologique et hydrologique dans les marais de Limagne au cours de la seconde moitié de l'Holocène (Massif central, France) / Geomorphological and hydrological evolution in the Limagne swamps during the second part of the Holocene (Massif central, France). », *Quaternaire*, 12, 1, p. 43-51.

Ballut C., Gaby G., Prat B., Lopez-Saez J.A., Cabanis M., 2007, « L'étude interdisciplinaire des relations sociétés-milieus humides dans la région clermontoise: contribution de la géographie physique », *Actes du Séminaire de lancement du programme «Au fil de l'eau. Approche socio-environnementale de l'eau et des zones humides du Néolithique à nos jours: ressources, gestion et risques*, p. 7-12.

Balsam W.L., Beeson J.P., 2003, « Sea-floor sediment distribution in the Gulf of Mexico », *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50, 12, p. 1421-1444.

Barnhisel R.I., Bertsch P.M., 1989, « Chlorites and Hydroxy-Interlayered Vermiculite and Smectite », dans *Minerals in Soil Environments*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 729-788.

Barranco F.T., Balsam W.L., Deaton B.C., 1989, « Quantitative reassessment of brick red lutites: Evidence from reflectance spectrophotometry », *Marine Geology*, 89, 3, p. 299-314.

Barrau J., 1972, « Culture itinérante, culture sur brûlis, culture nomade, écobuage ou essartage ? », *Études rurales*, 45, p. 99-103.

Barrau J., 1996, « Vous avez dit « essart » ? Réponse à Françoise Grenand. », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 38, 1, p. 55-58.

Bassinat C., 2007, *Datation par luminescence: recherches méthodologiques et applications au volcanisme dans l'environnement de Laschamp*, phdthesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Battesti V., 1992, *Une charbonnière expérimentale, Méthodologie de l'anthracologie sur charbonnière pour une approche de la gestion du milieu forestier en Languedoc*, Mémoire de Maitrise, Biologie des Organismes et des Populations, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. Laboratoire Paléobotanique, Archéologie et Environnement, Cnrs Ura 1477, 44 p.

Baucheron F., Deberge Y., Pasty J.-F., 2016, « Aulnat, Puy-de-Dôme, Auvergne. Rue Jean-Jacques Rousseau », Rapport de diagnostic archéologique, D111020, Inrap Rhône-Alpes/Auvergne.

Baum T., Nendel C., Jacomet S., Colobran M., Ebersbach R., 2016, « “Slash and burn” or “weed and manure”? A modelling approach to explore hypotheses of late Neolithic crop cultivation in pre-alpine wetland sites », *Vegetation History and Archaeobotany*, 25, 6, p. 611-627.

Beadle N.C.W., 1940, « Soil Temperatures During Forest Fires and Their Effect on the Survival of Vegetation. », *Journal of Ecology*, 28, 1, p. 180-192.

Beall F.C., 1968, *Thermal degradation analysis of wood and wood components*, Thesis, State University of New York College of Environmental Science and Forestry.

Beaudouin A., 2014, « Autour de la question des cultures temporaires : les îles Shetland et les systèmes agraires de Norvège et d'Écosse (xve-xixe siècle) », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 217-234.

Beaufils T., 1983, « Végétation et sols des forêts de la Combe d'Ain et des reliefs environnants », dans *L'Homme et la forêt en Franche-Comté. Structures et dynamisme de l'écosystème forêt en rapport avec les activités humaines passées et actuelles*, Besançon, Centre universitaire d'études régionales, p. 325-383.

Beauverie J.-J. 1905 *Le bois. Fascicule I*.

Beeching A., Berger J.-F., Brochier J.-L., Ferber F., Helmer D., Maamar H.S., 2000, « Chasséens : agriculteurs ou éleveurs, sédentaires ou nomades ? Quels types de milieux, d'économies et de sociétés ? », p. 59-76.

Bégin Y., Marguerie D., 2002, « Characterization of tree macroremains production in a recently burned conifer forest in northern Québec, Canada », *Plant Ecology*, 159, 2, p. 143-152.

Beiner M., Harmand D., Cordier S., Occhietti S., 2009, « Les minéraux lourds des alluvions quaternaires du bassin de la Moselle : nouvelles données », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 20/1, p. 63-80.

Bell J., Watson M., 2007, « Ados en Irlande depuis le XVIIIe siècle », *Nous labourons*, p. 201-208.

Bell M., 1981, *Valley sediments as evidence of prehistoric land-use: a study based on dry valleys in south east England*, Thesis for the degree of Ph.D., London, University of London, Institute of Archaeology, 479 p.

Bell M., 1983, « Valley Sediments as Evidence of Prehistoric Land-use on the South Downs », *Proceedings of the Prehistoric Society*, 49, p. 119-150.

Bellomo R.V., 1993, « A Methodological Approach for Identifying Archaeological Evidence of Fire Resulting from Human Activities », *Journal of Archaeological Science*, 20, 5, p. 525-553.

Beltrametti G., Cevasco R., Moreno D., Stagno A.M., 2014, « Les cultures temporaires, entre longue durée et chronologie fine (Montagne ligure, Italie) », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 235-258.

Bensettiti F., Boulet V., Chavaudret-Laborie C., Deniaud J., (coord.) 2005 « Cahiers d'habitats » *Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 4 (vol. 1) - Habitats agropastoraux*, Paris, MATE/MAP/MNHN, Éd. La Documentation française, 445 p.

Bento-Gonçalves A., Vieira A., Úbeda X., Martin D., 2012, « Fire and soils: Key concepts and recent advances », *Geoderma*, 191, p. 3-13.

Berger J.F., 2009, « Impact de la paléodynamique fluviale holocène sur l'occupation du sol dans les basses plaines alluviales du Rhône moyen: corrections taphonomiques et modélisations prédictives », *Ol'Man River: Geo-archaeological Aspects of Rivers and River Plains*, 5, p. 77.

Berger J.-F., Brochier J.-L., Vital J., Delhon C., Thiebault S., 2007, « Nouveau regard sur la dynamique des paysages et l'occupation humaine à l'âge du Bronze en moyenne vallée du Rhône », *Le Temps, Actes du 109e congrès des CTHS, déprises et rythmes agricoles à l'Age du Bronze*, p. 260.

Berna F., Behar A., Shahack-Gross R., Berg J., Boaretto E., Gilboa A., Sharon I., Shalev S., Shilstein S., Yahalom-Mack N., Zorn J.R., Weiner S., 2007, « Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel) », *Journal of Archaeological Science*, 34, 3, p. 358-373.

Bertran P., Allenet G., Fourloubey C., Leroyer C., Limondin-Lozouet N., Maazouzi Z., Madelaine S., Perrière J., Ponel P., Casagrande F., Detrain L., 2009, « Paléoenvironnements tardiglaciaires en Aquitaine: la séquence alluviale de la Brunetière (Bergerac, France) », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 20/2, p. 161-193.

Bertran P., Texier J.-P., 1997, « Géoarchéologie des versants: Les dépôts de pente », dans BRAVARD J.-P., PRESTREAU M. (dirs.), *Dynamique du paysage: Entretiens de géoarchéologie (Table ronde tenue à Lyon les 17 et 18 novembre 1995)*, Lyon, Alpara (DARA), p. 59-86.

Béteille R., 2014, « Brûlis, culture sur brûlis. », *Encyclopædia Universalis*.

Bétrémieux R., Le Borgne E., Monnier G., 1960, « Évolution de certaines propriétés du sol sous l'influence du chauffage », *Compte Rendu hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 251, p. 2753-2755.

Betsch J.-M., 2001, « La biodiversité dans les sols forestiers: quelle importance pour le fonctionnement et les usages de la forêt? », *BOIS & FORETS DES TROPIQUES*, 268, p. 69-79.

Bezot P., 1966, « Les recherches rizicoles au Tchad », *L'Agronomie Tropicale*, 1, p. 33.

Bigham J.M., Fitzpatrick R.W., Schulze D.G., 2002, « Iron Oxides », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 323-366.

Bigham J.M., Smeck N.E., Heckendorn S.E., Jaynes W.F., 1991, « Stability of Iron Oxides in Two Soils with Contrasting Colors », *Soil Science Society of America Journal*, 55, 5, p. 1485-1492.

Billard C., Bourhis J., Desfossés Y., Evin J., Huault M.-F., Lefèbvre D., Paulet-Locard M.-A., 1991, « I. L'habitat des Florentins à Val-de-Reuil (Eure) », *Gallia Préhistoire*, 33, 1, p. 140-171.

Birks H.J.B., 2005, « Mind the gap: how open were European primeval forests? », *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 4, p. 154-156.

Bishop R.R., Gröcke D.R., Ralston I., Clarke D., Lee D.H.J., Shepherd A., Thomas A.S., Rowley-Conwy P.A., Church M.J., 2022, « Scotland's first farmers: new insights into early farming practices in North-west Europe », *Antiquity*, 96, 389, p. 1087-1104.

Bishop R.R., Kubiak-Martens L., Warren G.M., Church M.J., 2022, « Getting to the root of the problem: new evidence for the use of plant root foods in Mesolithic hunter-gatherer subsistence in Europe », *Vegetation History and Archaeobotany*.

Bissonnais Y.L., 1996, « Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology », *European Journal of Soil Science*, 47, 4, p. 425-437.

Blache J., 1923, « L'essartage, ancienne pratique culturelle dans les Alpes dauphinoises. », *Revue de géographie alpine*, 11, 3, p. 553-575.

Blache J., 1932, *Les massifs de la Grande-Chartreuse et du Vercors : étude d'économie montagnarde*, Thèse de doctorat, Grenoble, France, 387 p.

Blackford J.J., 2000, « Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 1-4, p. 33-42.

Blaizot F., Fabre L., Vital J., Wattez J., Combes P., 2002, « Espalem, Nécropole Tumulaire des Lacs (canton de Blesle, Haute-Loire) », Rapport d'évaluation complémentaire, RAP 03379 (Patriarche), Clermont-Ferrand, SRA Auvergne, AFAN Rhône-Alpes-Auvergne.

Blaizot F., Fabre L., Wattez J., Vital J., Combes P., 2004, « Un système énigmatique de combustion au Bronze moyen sur le plateau d'Espalem (canton de Blesle, Haute-Loire) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 101, 2, p. 325-344.

Blanchemanche P. 1990 *Bâtisseurs de paysages: Terrassement, épierrement et petite hydraulique agricoles en Europe XVIIe-XIXe siècles*, Les Editions de la MSH, 348 p.

Blanchemanche P., 1991, « Paysages ruraux et techniques agricoles (XVIIe - XIXe siècle) », dans *Pour une archéologie agraire. A la croisée des sciences de l'homme et de la nature*, Paris, Armand Colin, p. 259-278.

Blinnikov M., Vyazov L., Bakumenko V., Ponomarenko E., Ershova E.G., 2019, « Reconstructing spatial and temporal dynamics of slash-and-burn cultivation practiced in Central Russia »,.

Bloch M. 1931 *Les caractères originaux de l'histoire rurale française. Tome I*, Paris, France.

Blouet V., Buzzzi P., Dreidemy C., Faye C., Faye O., Gebus L., Klag T., Koenig M.-P., Maggi C., Mangin G., Mervelet P., Vanmoerkerke J., 1992, « Données récentes sur l'habitat de l'Âge du Bronze en Lorraine » MORDANT C., RICHARD A. (dirs.), *Actes du colloque international de Lons-le-Saunier, 16-19 mai 1990*, 4, p. 177-193.

Blouet V., Faye C., 1986, « Pagny-sur-Moselle (54) "En Navut", Fouille de Sauvetage Urgent », rapport de fouilles, Metz, A.F.A.N., S.R.A.

Bobrovsky M.V., 2019, « The history of fires in old-growth Korean pine — broadleaved forests in the middle reaches of the Bikin River (western slope of the Sykhote-Alin Mountains) according to dendrochronological and pedoanthracological data | RJEE », *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 4, 1, p. 27.

Bobrovsky M.V., Loyko S.V., 2016, « Patterns of pedoturbation by tree uprooting in forest soils », *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 1.

Bodí M.B., Martin D.A., Balfour V.N., Santín C., Doerr S.H., Pereira P., Cerdà A., Mataix-Solera J., 2014, « Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects », *Earth-Science Reviews*, 130, p. 103-127.

Bogaard A., Ater M., Hodgson J.G., 2018, « Arable weeds as a case study in plant-human relationships beyond domestication », dans *Hybrid Communities. Biosocial Approaches to Domestication and Other Trans-species Relationships*, Routledge, p. 97-112.

Bogaard A., Heaton T.H.E., Poulton P., Merbach I., 2007, « The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals: archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices », *Journal of Archaeological Science*, 34, 3, p. 335-343.

Bogaard A., 2002a, « Questioning the relevance of shifting cultivation to Neolithic farming in the loess belt of Europe: evidence from the Hambach Forest experiment », *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1-2, p. 155-168.

Bogaard A., 2002b, *The permanence, intensity and seasonality of early crop cultivation in Western-Central Europe*, phd, University of Sheffield.

Bogaard A. 2004a *Neolithic farming in central Europe. An archaeobotanical study of crop husbandry practices*.

Bogaard A., 2004b, « The nature of early farming in Central and South-east Europe », *Documenta Praehistorica*, 31, p. 49-58.

Bogaard A., Fraser R., Heaton T.H.E., Wallace M., Vaiglova P., Charles M., Jones G., Evershed R.P., Styring A.K., Andersen N.H., Arbogast R.-M., Bartosiewicz L., Gardeisen A., Kanstrup M., Maier U., Marinova E., Ninov L., Schäfer M., Stephan E., 2013, « Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 31, p. 12589-12594.

Boissinot P., 2000, « À la trace des paysages agraires: L'archéologie des façons culturales en France », *Études rurales*, 153/154, p. 23-38.

Boissinot P., Brochier J.-É., 1997, « Pour une archéologie du champ », dans *Les formes des paysages. Tome 3. L'analyse des systèmes spatiaux*, Éditions Errance, Paris (Collection Archéologie aujourd'hui), p. 35-56.

Boivin P., Besson J.-C., Briot D., Deniel C., Gourgaud A., Labazuy P., Langlois E., De Larouzière F.-D., Livet M., Merciecca C., Mergoïl J., Miallier D., Morel J.-M., Thouret J.-C., Vernet G. 2017 *Volcanologie de la Chaîne des Puys*, Edition du Parc naturel Régional des Volcans d'Auvergne, 6e édition.

Boivin P., Miallier D., Cluzel N., Devidal J.-L., Dousteysier B., 2015, « Building and ornamental use of trachyte in the center of France during antiquity: Sources and criteria of identification », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 3, p. 247-256.

Bongni F., 2000, *Contribution à l'étude des sites littoraux du Néolithique et de l'Age du Bronze au nord-ouest des Alpes : étude des collections du Muséum national d'histoire naturelle (Laboratoire de préhistoire, Musée de l'homme et Institut de paléontologie humaine)*, These de doctorat, Paris, Muséum national d'histoire naturelle.

Bonhage A., Hirsch F., Schneider A., Raab A., Raab T., Donovan S., 2020, « Long term anthropogenic enrichment of soil organic matter stocks in forest soils – Detecting a legacy of historical charcoal production », *Forest Ecology and Management*, 459, p. 117814.

Bonhôte J., Davasse B., Dubois C., Isard V., Métailié J.-P., 2000, « Charcoal kilns and environmental history in the eastern Pyrenees (France). A methodological approach », *BAR International Series 1063*, p. 219-228.

Bonhôte J., Vernet J.-L., 1988, « La mémoire des charbonnières. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). », *Revue Forestière Française*, XL, 3, p. 197-211.

- Bonneau M., 1979, « Chapitre XVI. La température du sol », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 324-328.
- Bonneau M., Duchaufour P., Millot G., Paquet H., 1964, « Note sur certains sols vertisoliques formés en climat tempéré », *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 17, 4, p. 325-334.
- Bornand M., Dejou J., Robert M., Roger L., 1984, « Composition minéralogique de la phase argileuse des Terres noires de Limagne (Puy-de-Dôme). Le problème des liaisons argiles-matière organique », *Agronomie*, 4, 1, p. 47-62.
- Borrello M., 2015, « La recherche archéologique et les origines de l'agriculture », *Le Globe. Revue genevoise de géographie*, 155, 1, p. 9-31.
- Boserup E. 1965 *The conditions of agricultural growth: The economics of agrarian change under population pressure*, London, George Allen & Unwin Ltd, Ruskin House Museum Street.
- Bostyn F., 2007, « La néolithisation de la France: une extension de plus en plus large du Danubien », *Archéopages: archéologie & société*, 18, p. 10-15.
- Bostyn F., 2019, « Quelques aspects de la néolithisation de la France », dans DEMOULE J.-P. (dir.), *La révolution néolithique dans le monde*, Paris, CNRS Éditions (CNRS Alpha), p. 103-118.
- Bostyn F., Durand J.C., 1999, « Témoins de deux implantations du groupe de Villeneuve-Saint-Germain à la confluence Oise-Esches : les sites de Champagne-sur-Oise "Le Grand Marais" (Val-d'Oise) et de Chambly "La Fosse aux Moines" (Oise) », *Revue archéologique de Picardie*, 1, 1, p. 29-61.
- Bouby L., 2000, « Restituer les pratiques agraires par la carpologie archéologique », *Études rurales*, 153/154, p. 177-194.
- Bouhier A., 1979, *La Galice: essai géographique d'analyse et d'interprétation d'un vieux complexe agraire*, Thèse, Université Rennes 2, (4 vol.) 1516 p.
- Bournerias M., Timbal J., 1980, « Le Hêtre (*Fagus silvalica* L.) et les climax en Champagne crayeuse », *Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques*, 127, 2, p. 169-177.
- Bourrigaud R., 2012, « In memoriam François Sigaut (1940-2012) », *Histoire & Sociétés Rurales*, 38, 2, p. 7-10.
- Bouteyre G., 1958, « L'écobuage en culture rizicole dans la région de Kim et Bouko (régions du Mayo-Kebbi et du Logone). », *Nos Sols, Publication trimestrielle du Bureau des Sols de l'Afrique Équatoriale Française*, 7 & 8, p. 31-40.
- Boutry L., 1920, « La forêt d'Ardenne », *Annales de géographie*, 29, 160, p. 261-279.
- Boyer D.E., Dell J.D., 1980, « Fire effects on Pacific Northwest forest soils », Portland, Oregon, Forest Service - USDA Pacific Northwest Region (R-6).
- Braadbaart F., Poole I., Brussel A.A. van, 2009, « Preservation potential of charcoal in alkaline environments: an experimental approach and implications for the archaeological record », *Journal of Archaeological Science*, 36, 8, p. 1672-1679.
- Bradstock R. a., Auld T. d., 1995, « Soil temperatures during experimental bushfires in relation to fire intensity: consequences for legume germination and fire management in south-eastern Australia », *Journal of Applied Ecology*, 32, 1, p. 76.

Bréhéret J.-G., Macaire J.-J., Fleury A., Fourmont A., Soulié-Märsche I., 2003, « Indices de confinement dans les dépôts lacustres holocènes de Sarliève (Limagne, France) », *Comptes Rendus Geoscience*, 335, 5, p. 479-485.

Bresson L.M., 1974, « A study of integrated microscopy : rubefaction under wet temperate climate in comparison with Mediterranean rubefaction », *Soil microscopy*, p. 526-541.

BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1994, « Marais de Saint-Gond (Marne). État des connaissances sur l'exploitation des tourbières et leur impact sur le milieu », Rapport R 38 279, DRIRE Champagne-Ardenne.

Brindley, G.W., Brown, G. (dirs.) 1980 *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, London, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Mineralogical society, 495 p.

Brinkman R., 1970, « Ferrollysis, a hydromorphic soil forming process », *Geoderma*, 3, 3, p. 199-206.

Brochier J.E., 1999, « Couche archéologique, sol archéologique et distributions spatiales : quelques réflexions (géo)archéologiques sur un vieux problème », *Geoarqueología quaternari litoral: memorial María Pilar Fumanal*, p. 91-96.

Brochier J.-É., 1991a, « Géoarchéologie du monde agropastoral », dans *Pour une archéologie agraire. A la croisée des sciences de l'homme et de la nature*, Paris, Armand Colin, p. 303-322.

Brochier J.-É., Thinin M., 2003, « Calcite crystals, starch grains aggregates or...POCC? Comment on 'calcite crystals inside archaeological plant tissues' », *Journal of Archaeological Science*, 30, 9, p. 1211-1214.

Brochier J.-L., 1991b, « Environnement et culture: état de la question dans le sud-est de la France et principes d'étude autour du Chasséen de la moyenne vallée du Rhône », *Mémoires du Musée de préhistoire d'Île-de-France*, 4, p. 315-326.

Brochier J.E., 1983, « Bergeries et feux de bois néolithiques dans le Midi de la France: Caractérisation et incidence sur le raisonnement sédimentologique », *Quartär-Internationales Jahrbuch zur Erforschung des Eiszeitalters und der Steinzeit*, p. 181-193.

Brodard A., 2013, *Caractérisation thermique de structures de combustion par les effets de la chauffe sur les minéraux : thermoluminescence et propriétés magnétiques de foyers de la grotte des Fraux (Dordogne)*, Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3, 484 p.

Brodard A., Lacanette-Puyo D., Guibert P., Lévêque F., Burens A., Carozza L., 2016, « A new process of reconstructing archaeological fires from their impact on sediment: a coupled experimental and numerical approach based on the case study of hearths from the cave of Les Fraux (Dordogne, France) », *Archaeological and Anthropological Sciences*, 8, 4, p. 673-687.

Bronk Ramsey C., 2009, « Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates », *Radiocarbon*, 51, 1, p. 337-360.

Brown T., 1997, « Clearances and Clearings: Deforestation in Mesolithic/Neolithic Britain », *Oxford Journal of Archaeology*, 16, 2, p. 133-146.

Bruckert S., Gaiffe M. 1985 *Les sols de Franche-Comté*, Besançon, Centre Universitaire d'Etudes Régionales, Université de Franche-Comté.

Brunhes Delamarre M.J. 1985 *La vie agricole et pastorale dans le monde: techniques et outils traditionnels*, Meudon, France, Editions Joël Cuénot, 216 p.

Bruzon V., 1990, *Les savanes du nord de la Côte d'Ivoire, mésologie et dynamique : l'herbe, le feu et le pâturage*, thesis, Paris 7.

Bruzon V., 1994, « Les pratiques du feu en Afrique subhumide. Exemples des milieux savaniques de la Centrafrique et de la Côte d'Ivoire » BLANC-PAMARD C., BOUTRAIS J. (dirs.), *Dynamique des systèmes agraires : à la croisée des parcours : pasteurs, éleveurs, cultivateurs*, p. 147-162.

Büntgen U., Tegel W., 2011, « European tree-ring data and the Medieval Climate Anomaly », *PAGES news*, 19, 1, p. 14-15.

Buoncrisiani J.-F., Campy M., 2011, « Chapter 10 - Quaternary Glaciations in the French Alps and Jura », dans EHLERS J., GIBBARD P.L., HUGHES P.D. (dirs.), *Developments in Quaternary Sciences*, Elsevier (Quaternary Glaciations - Extent and Chronology), p. 117-126.

Burri S., 2017, « Essartage, culture temporaire et habitat en Basse-Provence entre Moyen Âge et première modernité (xiii e-xvi e siècles), Abstracts, Resumen », *Histoire & Sociétés Rurales*, 46, 2, p. 31-68.

Busse M., Shestak C., Hubbert K., Knapp E., 2010, « Soil physical properties regulate lethal heating during burning of woody residues », *Soil Science Society of America Journal*, 74, 3, p. 947-955.

Byrne C.E., Nagle D.C., 1997, « Carbonization of wood for advanced materials applications », *Carbon*, 35, 2, p. 259-266.

Cabot J., 1965, *Le Bassin du Moyen Logone*, Thèse de Lettres, Paris, ORSTOM, 327 p.

Cagnato C., Hamon C., Salavert A., Elliott M., 2023, « The use of underground storage organs in the Early Neolithic (Linearbandkeramik and Blicquy/Villeneuve-Saint-Germain) in the Paris Basin: the contribution of starch grain analyses », *Revue d'ethnoécologie*, 23.

Caille R., 2018, « Etude hydrogéologique par traçages et jaugeage des sources du Moulin et Fontenu pour la détermination du bassin d'alimentation du lac de Chalain. », Conseil départemental du Jura.

Callier-Boisvert C., 2004, « D'un même corps : Le labour à bras collectif (cavadas) dans le nord du Portugal », *Ethnologie française*, 34, 2, p. 343-349.

Campy M., 1982, *Le Quaternaire franc-comtois. Essai chronologique et paléoclimatique.*, phdthesis, Université de Franche-Comté (UFC).

Campy M., 1985, « Dynamique d'une marge glaciaire au maximum würmien ; La Combe d'Ain (Jura) », *Quaternaire*, 22, 2, p. 65-74.

Campy M., Macaire J.-J., Grosbois C., 2013, « 7. Le Contexte Fluvial », dans *Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*, (Collection Sciences Sup), p. 238-294.

Cancelo-González J., Cachaldora C., Díaz-Fierros F., Prieto B., 2014, « Colourimetric variations in burnt granitic forest soils in relation to fire severity », *Ecological Indicators*, 46, p. 92-100.

Caner L., 2000, *Les sols humifères des Hautes Terres du massif des Nilgiri en Inde du Sud : formation d'andosols sur une ancienne couverture ferrallitique en relation avec les évolutions climatiques des derniers millénaires*, These de doctorat, Nancy 1.

Cannon S.H., Gartner J.E., 2005, « Wildfire-related debris flow from a hazards perspective », dans JAKOB M., HUNGR O. (dirs.), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Berlin, Heidelberg, Springer (Springer Praxis Books), p. 363-385.

Canti M.G., 2003, « Aspects of the chemical and microscopic characteristics of plant ashes found in archaeological soils », *CATENA*, 54, 3, p. 339-361.

Canti M.G., Linford N., 2000, « The Effects of Fire on Archaeological Soils and Sediments: Temperature and Colour Relationships », *Proceedings of the Prehistoric Society*, 66, p. 385-395.

Canti M.G., Brochier J.É., 2017, « Plant Ash », dans *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 147-154.

Canti M.G., Pearce T.G., 2003, « Morphology and dynamics of calcium carbonate granules produced by different earthworm species: The 7th international symposium on earthworm ecology · Cardiff · Wales · 2002 », *Pedobiologia*, 47, 5, p. 511-521.

Cappers R.T.J., Raemaekers D.C.M., 2008, « Cereal Cultivation at Swifterbant? Neolithic Wetland Farming on the North European Plain », *Current Anthropology*, 49, 3, p. 385-402.

Carcaillet C., Talon B., 1996, « Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes », *Géographie physique et Quaternaire*, 50, 2, p. 233.

Carlier M., 2010, « Vassel (Puy-de-Dôme) : Lotissement l'Egalité », Rapport de diagnostic, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Carlier M., 2013, « Clerlande (Puy-de-Dôme) : Chemin des Charreiras, Sous la Vialle », Rapport de diagnostic, D104097, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Carlier M., 2017, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : 44, 46, 48 av. Gustave Flauvert », Rapport de diagnostic, D115119, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Cassen S., Boujot C., Errera M., Menier D., Pailler Y., Pétrequin P., Marguerie D., Veyrat E., Vigier E., Poirier S., Dagneau C., Degez D., Lorho T., Neveu-Dérottrie H., Obeltz C., Scalliet F., Sparfel Y., 2010, « Un dépôt sous-marin de lames polies néolithiques en jadéite et sillimanite, et un ouvrage de stèles submergé sur la plage dite du Petit Rohu près Saint-Pierre-Quiberon (Morbihan) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 107, 1, p. 53-84.

Castanet C., 2022, *Les trajectoires des hydrosystèmes et des socio-écosystèmes, des prémices de l'Anthropocène à aujourd'hui : contributions de l'hydrogéomorphologie et de la géoarchéologie en zones tempérée, méditerranéenne et intertropicale*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis.

Catteddu I. 2009 *Archéologie médiévale en France. Le premier Moyen Âge (Ve-XIe siècle)*, Éditions La Découverte, 177 p.

Cauvin J. 2000 *The Birth of the Gods and the Origins of Agriculture*, Cambridge University Press.

Cauwe N. 2001 *L'héritage des chasseurs-cueilleurs dans le Nord-Ouest de l'Europe: 10000-3000 avant notre ère*, Editions Errance.

Certini G., 2005, « Effects of fire on properties of forest soils: a review », *Oecologia*, 143, 1, p. 1-10.

Chabal L., Fabre L., Terral J.-F., Théry-Parisot I., 1999, « L'anthracologie », dans *La botanique*, Editions Errance, Paris (Collection Archéologiques), p. 43-104.

Chabanne A., Husson O., Ha Dinh Tuan, Lienhard P., 2002, « L'écobuage. Pour une restauration de la fertilité chimique des sols à moindre coût », *Des approches innovantes au service du développement agricole. Comment favoriser un plus large impact des projets de recherche-développement sur l'agriculture, les services aux producteurs et les politiques agricoles ? Séminaire national, Hanoi, Vietnam*.

Chancerel A., Masson B., 1991, « II. Le site du Clos-Bâtard à Tourville-la-Rivière (Seine-Maritime) », *Gallia Préhistoire*, 33, 1, p. 172-184.

Charbonnier M.-C., Bergot E., Dandurand G., Giros R., Huard P., Laurelut C., Monnier A., Richard I., Zipper K., 2016, « Des indices d'occupations du Néolithique à l'époque contemporaine : Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine, Marne, Fère-Champenoise, Connantre, « canalisation de gaz et forage » », Rapport de fouille archéologique, Code Inrap BB0703770 \ F035299, Metz, Inrap Grand Est nord.

Charnot M., 2019, « La céramique néolithique de Broussy-le-Grand L'Ourlet (Marne) », *Revue archéologique de l'Est*, Tome 68, p. 5-38.

Chevassu V., 2021, *Peuplement, paysages et pouvoirs médiévaux en contexte de moyenne montagne : les cas du sud Morvan et du Jura central*, phdthesis, Université Bourgogne Franche-Comté.

Chianese D., D'Emilio M., Di Salvia S., Lapenna V., Ragosta M., Rizzo E., 2004, « Magnetic mapping, ground penetrating radar surveys and magnetic susceptibility measurements for the study of the archaeological site of Serra di Vaglio (southern Italy) », *Journal of Archaeological Science*, 31, 5, p. 633-643.

Childe V.G. 1929 *The Danube in Prehistory*, Oxford, Oxford University Press, 479 p.

Childe V.G. 1936 *Man Makes Himself*, The New American Library, 183 p.

Chouquer G., 2003, « Crise et recomposition des objets : les enjeux de l'archéogéographie. », *Études rurales*, 3, 167-168, p. 13-31.

Chouquer G., 2005, « L'émergence de la planimétrie agraire à l'âge du fer », *Études rurales*, 175-176, p. 29-52.

Chrzaszew J., Théry-Parisot I., Fiorucci G., Terral J.-F., Thibaut B., 2014, « Impact of post-depositional processes on charcoal fragmentation and archaeobotanical implications: experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics », *Journal of Archaeological Science*, 44, p. 30-42.

Chuniaud K., 2014, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : 34 rue Descartes : Indices de Préhistoire récente », Rapport de diagnostic, D106095, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Clariond A., Perret S., 1990, « Impact du feu sur les caractéristiques physico-chimiques d'un andosol », Note Technique, 02/90, Montpellier, CIRAD-CEEMAT.

Clark J.S., Merkt J., Muller H., 1989, « Post-Glacial Fire, Vegetation, and Human History on the Northern Alpine Forelands, South-Western Germany », *Journal of Ecology*, 77, 4, p. 897-925.

Clark J.S., 1988, « Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition, and sampling. », *Quaternary Research*, 30, 1, p. 67-80.

- Clark J.S., Lynch J., Stocks B. j., Goldammer J. g., 1998, « Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. », *Holocene*, 8, 1, p. 19-29.
- Cochet H., 2011a, « Chapitre 3. Le “système agraire”, concept intégrateur de l’agriculture comparée », dans *L’agriculture comparée*, Versailles, Éditions Quæ (Indisciplines), p. 29-63.
- Cochet H., 2011b, « Origine et actualité du « Système Agraire » : retour sur un concept », *Revue Tiers Monde*, 207, p. 97-114.
- Colombier M., Shea T., Burgisser A., Druitt T.H., Gurioli L., Müller D., Cáceres F., Hess K.-U., Boivin P., Miallier D., Dingwell D.B., 2020, « Rheological change and degassing during a trachytic Vulcanian eruption at Kilian Volcano, Chaîne des Puys, France », *Bulletin of Volcanology*, 82, 12, p. 78.
- Comet G. 1992 *Le Paysan et son outil. Essai d’histoire technique des céréales (France, VIIIe - XVe siècle)*, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS.
- Conesa A.P., Fardeau J.C., Simon-Sylvestre G., 1979, « Chapitre XXIV. Le Phosphore et le Soufre », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 395-407.
- Conesa M., 2014, « Les cultures temporaires en Cerdagne à l’Époque moderne. Sources, rythmes, dynamiques », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l’appropriation du sol dans l’Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 201-215.
- Confino M., 1969, « L’assolement triennal, le domaine seigneurial et la communauté rurale », *Cahiers du Monde Russe*, 10, 2, p. 161-218.
- Conklin H.C., 1961, « The Study of Shifting Cultivation », *Current Anthropology*, 2, 1, p. 27-61.
- Connor M.A., Cannon K.P., Carlevato D.C., 1990, « The Mountains Burnt: Forest Fires and Site Formation Processes », *North American Archaeologist*, 10, 4, p. 293-310.
- Constantin C., Allard P., Demarez L., Auxiette G., Bakels C., Firmin G., Krausz S., Lundstrom-Baudais K., Munaut A., Pernaud J.M., 2010, « Le site rubané d’Aubechies “Coron-Maton”(Hainaut). Fouilles de 1984 à 2002 », *Bulletin du Cercle archéologique Hesbaye-Condruz*, 30, p. 5-111.
- Constantin C., Demarez L., 1997, « Beloeil, Aubechies, Rubané, Céramique du Limbourg et Groupe de Blicquy à Coron Maton », dans *Le Patrimoine archéologique de Wallonie*, Éditions du Patrimoine de la Direction Générale de l’Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine, p. 169-173.
- Coppenet M., Juste C., 1979, « Chapitre XXIV. Oligoéléments indispensables à la vie des plantes. Phénomènes de toxicité », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 408-415.
- Cornell R.M., Schwertmann U. 2003 *The Iron Oxides : Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses.*, John Wiley & Sons, Second, Completely Revised and Extended Edition, 664 p.
- Cornu P., 2003, « Déprise agraire et reboisement », *Histoire & Sociétés Rurales*, 20, 2, p. 173-201.
- Cornu S., Deschatrettes V., Salvador-Blanes S., Clozel B., Hardy M., Branchut S., Le Forestier L., 2005, « Trace element accumulation in Mn—Fe—oxide nodules of a planosolic horizon », *Geoderma*, 125, 1, p. 11-24.
- Cornu S., Lucas Y., Lebon E., Ambrosi J.P., Luizão F., Rouiller J., Bonnay M., Neal C., 1999, « Evidence of titanium mobility in soil profiles, Manaus, central Amazonia », *Geoderma*, 91, 3, p. 281-295.

Cottiaux R., Brunet P., Bemilli C., Boulenger L., Brunet V., Charamond C., Duplessis M., Durand J., Durbet G., Hadjouis D., Lanchon Y., Monchablon C., 2020, « Les sites d'habitat du Néolithique récent dans la basse vallée de la Marne », dans SALANOVA L. (dir.), *La fin du IVe millénaire dans le bassin parisien : Le Néolithique récent entre Seine, Oise et Marne (3500-2900 avant notre ère)*, Dijon, ARTEHIS Éditions (Suppléments à la Revue archéologique de l'Est), p. 151-187.

Cottiaux R., Jallot L., Marchand G., 2007, « Les grands bouleversements du IIIe millénaire », dans *La révolution néolithique en France*, Paris, Éditions La Découverte (Collection Archéologies de la France), p. 140-159.

Cottiaux R., Salanova L., Brunet P., Hamon T., Langry-François F., Maingaud A., Martineau R., Mille B., Polloni A., Renard C., Sohn M., 2020, « Le Néolithique récent dans le Bassin parisien (3600-2900 avant notre ère) : périodisation et faciès régionaux », dans *La fin du IVe millénaire dans le bassin parisien : Le Néolithique récent entre Seine, Oise et Marne (3500-2900 avant notre ère)*, Dijon, ARTEHIS Éditions (Suppléments à la Revue archéologique de l'Est), p. 455-529.

Coulomb I., Caneill J., Manichon H., 1993, « Comportement du sol au labour : méthode d'analyse et évaluation des conséquences de l'état initial du sol sur l'état transformé par le labour », *Agronomie*, 13, 1, p. 45-56.

Courtney Mustaphi C.J., Pisaric M.F.J., 2014, « A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments », *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 38, 6, p. 734-754.

Courty M.-A., 2012, « Transformation pédologique des produits de combustion : approche expérimentale », *Etude et Gestion des Sols*, p. 10.

Courty M.-A., 2017, « Fuel origin and firing product preservation in archaeological occupation contexts », *Quaternary International*, 431, Part A, p. 116-130.

Courty M.-A., Allue E., Henry A., 2020, « Forming mechanisms of vitrified charcoals in archaeological firing-assemblages », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 30, p. 102215.

Courty M.-A., Martinez J.-M., 2015, « Terrestrial Carbonaceous Debris Tracing Atmospheric Hypervelocity-Shock Aeroplasma Processes », *Procedia Engineering*, 103, p. 81-88.

Courty M.-A., Miallier D., 2012, « Le cas du Puy de Dôme, un exemple d'anomalie de faciès de combustion à 2450 BP avec assemblage de débris singuliers : signature d'une explosion cosmique ? »,.

Coye N., Mahieu E., Perrin T., 1996, « Des occupations du Néolithique moyen à Saint-Antoine (Vitrolles, Hautes-Alpes). Résultats préliminaires. », *Des occupations du Néolithique moyen à Saint-Antoine (Vitrolles, Hautes-Alpes). Résultats préliminaires.*, p. 415-425.

Crawford A.J., Belcher C.M., 2014, « Charcoal morphometry for paleoecological analysis: The effects of fuel type and transportation on morphological parameters I », *Applications in Plant Sciences*, 2, 8.

Crevaschi M., Nicosia C., 2012, « Sub-Boreal aggradation along the Apennine margin of the Central Po Plain: geomorphological and geoarchaeological aspects », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 18, vol. 18-n° 2, p. 155-174.

Crombé P., 1993, « Tree-fall features on final Palaeolithic and Mesolithic sites situated on sandy soils: how to deal with it », *Helinium*, 33, 1, p. 50-66.

Crombé P., Langohr R., 2020, « On the origin of Mesolithic charcoal-rich pits: A comment on Huisman et al. », *Journal of Archaeological Science*, 119, p. 105058.

Crombé P., Robinson E., 2014, « 14C dates as demographic proxies in Neolithisation models of northwestern Europe: a critical assessment using Belgium and northeast France as a case-study », *Journal of Archaeological Science*, 52, p. 558-566.

Cubizolle H., Argant J., Fassion F., Latour-Argant C., Deng-Amiot Y., Dietre B., 2014, « L'histoire de la végétation depuis la fin du tardiglaciaire et l'évolution de l'emprise humaine à partir du milieu de l'holocène dans le Massif Central oriental (France) », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 25/3, p. 209-236.

Cultrone G., Carrillo Rosua F.J., 2020, « Growth of metastable phases during brick firing: Mineralogical and microtextural changes induced by the composition of the raw material and the presence of additives », *Applied Clay Science*, 185, p. 105419.

Cultrone G., Rodriguez-Navarro C., Sebastian E., Cazalla O., De La Torre M.J., 2001, « Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing », *European Journal of Mineralogy*, 13, 3, p. 621-634.

Curt T., Hély C., Barbero R., Dupuy J.-L., Mouillot F., Ruffault J. 2022 *Feux de végétation: Comprendre leur diversité et leur évolution*, Éditions Quae, 136 p.

Cushing J., Wenner A.M., Noble E., Daily M., 1986, « A groundwater hypothesis for the origin of "fire areas" on the Northern Channel Islands, California », *Quaternary Research*, 26, 2, p. 207-217.

Dahlgren R., Shoji S., Nanzyo M., 1993, « Chapter 5 Mineralogical Characteristics of Volcanic Ash Soils », dans SHOJI S., NANZYO M., DAHLGREN R. (dirs.), *Developments in Soil Science*, Elsevier (Volcanic Ash Soils), p. 101-143.

Dalal R.C., Mayer R.J., 1986, « Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland .V. Rate of loss of total nitrogen from the soil profile and changes in carbon : nitrogen ratios », *Soil Research*, 24, 4, p. 493-504.

Damien T., 2019, *Comportement hydrodynamique des Marais de Saint-Gond (Marne, France)*, These de doctorat, Reims.

Damien T., Briquet M., Bollot N., Devos A., Chalumeau L., Pierre G., Lejeune O., 2015, « Rôle des remplissages alluviaux sur le fonctionnement hydrodynamique d'un marais d'entonnoir de percée cataclinale : l'exemple des Marais de Saint-Gond (Marne, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 21, 4, p. 331-342.

D'Anna A., Desbat A., Garcia D., Schmitt A., Verhaeghe F. 2003 *La céramique : la poterie du Néolithique aux Temps modernes*, Paris, France, Éditions Errance, 334 p.

Daugas J.-P., Gilbert A., Raynal J.-P., 1983, « Premières sépultures du Néolithique ancien en Basse-Auvergne », *Bulletin de la Société d'Anthropologie du Sud-Ouest Bordeaux*, 18, 1.

Daugas J.-P., Malacher F., 1978, « Les sépultures du Creux-Rouge à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)(Néolithique et Gallo-romain) », *Bull. Soc. Anthropol. Sud-Ouest, Bordeaux*, 12, 1, p. 2-10.

Daunay J. 2003 *Rumilly-lès-Vaudes: histoire et patrimoine*, Daunay.

Davidson D.A., Wilson C.A., Meharg A.A., Deacon C., Edwards K.J., 2007, « The legacy of past manuring practices on soil contamination in remote rural areas », *Environment International*, 33, 1, p. 78-83.

Davies G.M., Gray A., Rein G., Legg C.J., 2013, « Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland », *Forest Ecology and Management*, 308, p. 169-177.

Davis K.P., 1959, « Forest fire, control and use. », *Forest fire, control and use*.

De Bonis A., Cultrone G., Grifa C., Langella A., Leone A.P., Mercurio M., Morra V., 2017, « Different shades of red: The complexity of mineralogical and physico-chemical factors influencing the colour of ceramics », *Ceramics International*, 43, 11, p. 8065-8074.

De Schlippé P. 1956 *Écocultures d'Afrique*, Belgique, l'Harmattan & Terres et vie.

Deák J., Gebhardt A., Lewis H., Usai M.R., Lee H., 2017, « Soils disturbed by vegetation clearance and tillage », dans NICOSIA C., STOOPS G. (dirs.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, p. 233-264.

Dean W.E., 1974, « Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods », *Journal of Sedimentary Research*, 44, 1, p. 242-248.

Deaton B.C., Balsam W.L., 1991, « Visible Spectroscopy--A Rapid Method for Determining Hematite and Goethite Concentration in Geological Materials: RESEARCH METHOD PAPER », *Journal of Sedimentary Research*, 61, 4.

DeBano L.F., Dunn P.H., Conrad C.E., 1977, « Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soils », *Proceedings of the Symposium on the Environmental Consequences of Fire and Fuel Management in Mediterranean Ecosystems, August 1-5, 1977*, 3, p. 65.

DeBano L.F., Neary D.G., Ffolliott P.F. 1998 *Fire's Effects on Ecosystems*, New York, USA, Jon Wiley and Sons Inc.

Deberge Y., Georjon C., Horry A., Pelletier D., 2013, « Vassel (Puy-de-Dôme) : RD 997 : Occupations du Moyen Âge classique (XIe-XIIIe s.) et du Néolithique Moyen II », Rapport de diagnostic, D102835, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Deberge Y., Georjon C., Pasty J.-F., Wittmann A., 2017, « Orcet (Puy-de-Dôme) : rue des Vergers, Lotissement du Breuil 3 », Rapport de diagnostic, D118623, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Debret M., Sebag D., Desmet M., Balsam W., Copard Y., Mourier B., Susperrigui A.-S., Arnaud F., Bentaleb I., Chapron E., Lallier-Vergès E., Winiarski T., 2011, « Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: The new "Q7/4 diagram" », *Earth-Science Reviews*, 109, 1, p. 1-19.

Delbey T., 2018, *Caractérisation, production et diffusion des imitations de sigillée d'Argonne dans le Diocèse des Gaules durant l'Antiquité tardive*, These de doctorat, Paris 10.

Deldicque D., Rouzaud J.-N., Vandeveld S., Medina-Alcaide M.Á., Ferrier C., Perrenoud C., Pozzi J.-P., Cabanis M., 2023, « Effects of oxidative weathering on Raman spectra of charcoal and bone chars: consequences in archaeology and paleothermometry », *Comptes Rendus. Géoscience*, 355, G1, p. 1-22.

Delleaux F., 2015, « La grande exploitation, la ville et les agronomes. Dynamiques et stratégies de production au domaine d'Avully-en-Genevois à la fin du xviii^e siècle », *Histoire, économie & société*, 34^e année, 4, p. 5-26.

Delrieu F., 2023, « Le secteur de Pontcharaud à Clermont-Ferrand. Anthropisation de la Grande Limagne d'Auvergne du vie à la fin du ier millénaire avant notre ère », *Archéopages. Archéologie et société*, Hors-série 6, p. 346-353.

Demoule J.-P. 2007 *La révolution néolithique en France*, Paris, Éditions La Découverte, 179 p.

Demoule J.-P., Garcia D., Schnapp A. 2018 *Une histoire des civilisations. Comment l'archéologie bouleverse nos connaissances*, La Découverte, INRAP.

Dendievel A.-M., Delrieu F., Duny A., 2020, « Entre Lacs et Tourbières : approche pluridisciplinaire de l'évolution des paysages et des zones humides de la Pénide à Espalem (Haute-Loire) », *BIOM - Revue scientifique pour la biodiversité du Massif central*, 1, 1, p. 1-11.

Denham T., 2020, « Agricultural Practices: A Case Study from Papua New Guinea », dans SMITH C. (dir.), *Encyclopedia of Global Archaeology*, Cham, Springer International Publishing, p. 135-140.

Depreux B., Quiquerez A., Bégeot C., Camerlynck C., Walter-Simonnet A.-V., Ruffaldi P., Martineau R., 2019, « Small headwater stream evolution in response to Lateglacial and Early Holocene climatic changes and geomorphological features in the Saint-Gond marshes (Paris Basin, France) », *Geomorphology*, 345, p. 106830.

Deschodt L., Teheux E., Lantoine J., Auguste P., Limondin-Lozouet N., 2005, « L'enregistrement tardiglaciaire de Dourges (Nord de la France, bassin de la Deûle) : évolution d'une zone lacustre et gisements archéologiques associés », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 16/3, p. 229-252.

Deschodt L., Teheux É., Lantoine J., Auguste P., Limondin-Lozouët N., 2015, « Chapter 1. Geoarchaeology during Late Glacial in northern France: The Dourges marsh example (Deûle catchment) », dans ARNAUD-FASSETTA G., CARCAUD N. (dirs.), *La géoarchéologie française au XXI^e siècle*, Paris, CNRS Éditions (CNRS Alpha), p. 15-27.

Devroey J.-P. 2003 *Économie rurale et société dans l'Europe franque (VI^e-IX^e siècles)*, Paris, France, Belin, 380 p.

Devroey J.-P., 2014, « Mise en valeur du sol et cycles de culture dans le système domanial (viii^e-x^e siècle) entre Seine et Rhin », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 33-57.

Diaz M., Huard E., Prost R., 2002, « Far infrared analysis of the structural environment of interlayer K⁺, NH₄⁺, Rb⁺ and Cs⁺ selectively retained by vermiculite », *Clays and Clay Minerals*, 50, 2, p. 284-293.

Didier P., Perret D., Tardy Y., Nahon D., 1985, « Equilibres entre kaolinites ferrifères, goethites alumineuses et hématites alumineuses dans les systèmes cuirassés. Rôle de l'activité de l'eau et de la taille des pores / Equilibria between Fe-kaolinites, Al-goethites and Al-hematites in ferricretes. Part of water activity and pore size », *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 38, 4, p. 383-397.

Dietre B., Walser C., Kofler W., Kothieringer K., Hajdas I., Lambers K., Reitmaier T., Haas J.N., 2016, « Neolithic to Bronze Age (4850–3450 cal. BP) fire management of the Alpine Lower Engadine landscape (Switzerland) to establish pastures and cereal fields », *The Holocene*, p. 0959683616658523.

Dodelin B., André J., Wlérick L., Lempérière G., 2004, « Le bois mort en forêt de montagne (Alpes françaises) », *Revue Forestière Française*, LVI, 6, p. 507-518.

Donadieu P., 1993, « La jachère: hypothèses pour un exorcisme », *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 19, 19, p. 19-22.

Dondi M., Ercolani G., Fabbri B., Marsigli M., 1998, « An approach to the chemistry of pyroxenes formed during the firing of Ca-rich silicate ceramics », *Clay Minerals*, 33, 3, p. 443-452.

- Dounias E., 1996, « Recrûs forestiers post-agricoles : perceptions et usages chez les Mvae du Sud-Cameroun », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 38, 1, p. 153-178.
- Dounias E., Tserikiantz F., Carrière S.M., McKey D., Grenand F., Kocher-Schmid C., Bahuchet S., 2000, « La diversité des agricultures itinérantes sur brûlis », dans BAHUCHET S. (dir.), *Les peuples des forêts tropicales aujourd'hui : 2. Une approche thématique*, Bruxelles, APFT, p. 65-105.
- Doutrelepont H., Fechner K., Vrielynck O., Vandromme P., 2012, « Taphonomie des matières organiques dans les tombes mérovingiennes de Moyenne Belgique et du nord de la France: phénomènes pédologiques et études botaniques associées: observations préliminaires » CARRE F., HENRION F. (dirs.), *Tome XXIII des Mémoires publiés par l'AFAM*, p. 75-89.
- Dove M.R., 2015, « Linnaeus' study of Swedish swidden cultivation: Pioneering ethnographic work on the 'economy of nature' », *Ambio*, 44, 3, p. 239-248.
- Drees L.R., Wilding L.P., Karathanasis A.D., Blevins R.L., 1994, « Micromorphological Characteristics of Long-Term No-Till and Conventionally Tilled Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 58, 2, p. 508-517.
- Dubois C., Métaillé J.-P., Izard V., 1996, « Archéologie de la forêt charbonnée: questions et méthodes, illustrées par l'exemple du site de Lercoul (Ariège) », *XVII^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, p. 525-540.
- Duchaufour P., 1954, « L'équilibre agro-sylvo-pastoral en Champagne crayeuse », *Revue forestière française*, 12, p. 791-798.
- Duchaufour P., Faivre P., Poulenard J., Gury M. 2018 *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement*, Paris, Dunod, 7^e édition, 450 p.
- Dufraisse A., Lemoine M., Zajac J.-C., 2018, « 2.6.4. étude anthracologique », dans *Les occupations néolithiques des marais de Saint-Gond. Volume 2. Vert-la-Gravelle (Vert-Toulon, Marne) « La Crayère ». Minière de silex et nécropole d'hypogées*, p. 389-400.
- Duigou N., Baize D., 2010, « Nouvelle collecte nationale d'analyses d'éléments en traces dans les sols (horizons de surface)-(Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) », *Rapport final. Contrat ADEME 0875C0036*.
- Duigou N., Baize D., Bispo A., 2011, « Utilisation de la base de données BDETM pour obtenir des valeurs de références locales en Éléments Traces Métalliques. Cas de la région Centre », *Etude et Gestion des Sols*, 18, 2, p. 91.
- Dumez R. 2010 *Le feu, savoirs et pratiques en Cévennes*, Éditions Quae & NSS-Dialogues, 248 p.
- Dunikowski C., 2014, « Aquitaine, Gironde (33), Villenave d'Ornon, Phase 3, zone nord, Geneste Courréjean », *Rapport de diagnostic archéologique*, 2009-02-0104d, Bègles, Inrap Grand Sud-Ouest.
- Dupin A., Sordoillet D., Fréville K., Girardclos O., Gauthier E., 2019, « The taphonomic characterization of a charcoal production platform. Contribution of an innovative pair of methods: Raman analysis and micromorphology », *Journal of Archaeological Science*, 107, p. 87-99.
- Duprat M., 1997, « Modèle tectono-sédimentaire des dépôts paléogènes dans le nord-est du bassin de Paris: conséquences sur la géométrie du toit de la craie », *Annales de la Société Géologique du Nord*, 5, 4, p. 269-287.

Durand A., 2003, « Chapitre V. La gestion du paysage ligneux (XIIe-XIIIe siècle) », dans *Les paysages médiévaux du Languedoc : Xe-XIIIe siècles*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Tempus), p. 335-403.

Durand A., Duval S., Vaschalde C., 2009, « Le charbonnage des Ericacées méditerranéennes : approches croisées archéologiques, anthracologiques et historiques. » DELHON CL. T.ST. THERY-PARISOT I. (dir.), *Des hommes et des plantes. Exploitation du milieu et gestion des ressources végétales de la Préhistoire à nos jours. XXXe Rencontres internationales d'histoire et d'archéologie d'Antibes*, p. 323-331.

Durand A., Vaschalde C., Daide H., Abbadi M.E., 2018, « Le charbonnage en fosse. Approche ethnoarchéologique d'une pratique méconnue dans le Rif marocain », dans *Charbonnage, charbonniers, charbonnières. Confluence de regards autour d'un artisanat méconnu [Actes du colloque à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, 12-13 septembre 2013, Limoges]*, Presses Universitaires de Provence, Aix-en-Provence, France (Confluent des Sciences, série Histoire des techniques), p. 13-22.

Durand R., 1979, « La pédogenèse en pays calcaire dans le Nord-Est de la France », *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 55, 1.

Dussol L., Vannière B., Purdue L., Orange F., Testé M., Castanet C., Garnier A., Lemonnier E., Théry-Parisot I., 2021, « How to highlight slash-and-burn agriculture in ancient soils? A modern baseline of agrarian fire imprint in the Guatemalan lowlands using charcoal particle analysis », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 35, p. 102725.

Dutoit T., Thinon M., Talon B., Buisson E., Alard D., 2009, « Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities. », *Journal of Vegetation Science*, 20, 2, p. 349-358.

Dzaba D., 1987, « Contribution à l'étude de la dynamique de la fertilité chimique du sol dans un système de culture traditionnel à base d'écobuage », *Les arbres fixateurs d'azote. L'amélioration biologique de la fertilité du sol*, p. 595-627.

Eckmeier E., Gerlach R., Tegtmeier U., Schmidt M.W.I., 2008, « Charred organic matter and phosphorus in black soils in the Lower Rhine Basin (Northwest Germany) indicate prehistoric agricultural burning » FIORENTINO G., MAGRI D. (dirs.), *British Archaeological Reports*, 1807, p. 93-103.

Eckmeier E., 2007, *Detecting prehistoric fire-based farming using biogeochemical markers*, PhD Thesis, University of Zurich.

Eckmeier E., Gerlach R., Skjemstad J.O., Ehrmann O., Schmidt M.W.I., 2007, « Minor changes in soil organic carbon and charcoal concentrations detected in a temperate deciduous forest a year after an experimental slash-and-burn », *Biogeosciences*, 4, 3, p. 377-383.

Eckmeier E., Gerlach R., Gehrt E., Schmidt M.W.I., 2007, « Pedogenesis of Chernozems in Central Europe — A review », *Geoderma*, 139, 3, p. 288-299.

Eckmeier E., Rösch M., Ehrmann O., Schmidt M.W.I., Schier W., Gerlach R., 2007, « Conversion of biomass to charcoal and the carbon mass balance from a slash-and-burn experiment in a temperate deciduous forest », *The Holocene*, 17, 4, p. 539-542.

Edinborough K., Martineau R., Dufraisse A., Shennan S., Imbeaux M., Dumontet A., Schauer P., Cook G., 2021, « A Neolithic population model based on new radiocarbon dates from mining, funerary and

population scaled activity in the Saint-Gond Marshes region of North East France », *Quaternary International*, 586, p. 121-132.

Edje O.T., Semoka J.M.R., Haule K.L., 1988, « Traditional forms of soil fertility maintenance », *Proceedings of a Workshop on Soil Fertility Research for Bean Cropping Systems in Africa* (Ed., C. Wortmann), Addis Ababa, Ethiopia, p. 7-29.

Edwards K.J., Whittington G., 2000, « Multiple charcoal profiles in a Scottish lake: taphonomy, fire ecology, human impact and inference », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 1–4, p. 67-86.

Egli M., Fitze P., Mirabella A., 2001, « Weathering and evolution of soils formed on granitic, glacial deposits: results from chronosequences of Swiss alpine environments », *CATENA*, 45, 1, p. 19-47.

Egli M., Zanelli R., Kahr G., Mirabella A., Fitze P., 2002, « Soil evolution and development of the clay mineral assemblages of a Podzol and a Cambisol in 'Meggerwald', Switzerland », *Clay Minerals*, 37, 2, p. 351-366.

Ehrmann O., Biester H., Bogenrieder A., Rösch M., 2014, « Fifteen years of the Forchtenberg experiment—results and implications for the understanding of Neolithic land use », *Vegetation History and Archaeobotany*, 23, 1, p. 5-18.

El Ouahabi M., Daoudi L., Hatert F., Fagel N., 2015, « Modified Mineral Phases During Clay Ceramic Firing », *Clays and Clay Minerals*, 63, 5, p. 404-413.

Ellery W., Ellery K., McCarthy T.S., Cairncross B., Oelofse R., 1989, « A peat fire in the Okavango Delta, Botswana, and its importance as an ecosystem process », *African Journal of Ecology*, 27, 1, p. 7-21.

Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R., Brunet D., 2010, « Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy », *European Journal of Soil Science*, 61, 2, p. 207-216.

Ertlen D., 2009, *Archivage pédologique et dynamiques environnementales : mise au point d'une méthode de reconnaissance des paléovégétations, fondée sur l'analyse spectroscopique dans le proche infrarouge (SPIR) des matières organiques de sols et paléosols*, These de doctorat, Strasbourg.

Ertlen D., 2022, *Les temporalités emboîtées des relations Homme-milieu. Approches géographiques des systèmes paysagers*, Habilitation à diriger des recherches en géographie, Université de Strasbourg, Faculté de Géographie et d'Aménagement.

Ertlen D., Schwartz D., Brunet D., Trendel J.-M., Adam P., Schaeffer P., 2015, « Qualitative near infrared spectroscopy, a new tool to recognize past vegetation signature in soil organic matter », *Soil Biology and Biochemistry*, 82, p. 127-134.

Eyzaguirre P.B., 1986, « The Ecology of Swidden Agriculture and Agrarian History in São Tomé. », *Cahiers d'études africaines*, 26, 101, p. 113-129.

Fabre L., Gervet X., 1992, « Première approche du charbonnage et de l'histoire de la forêt méditerranéenne: l'exemple du canton d'Aniane (Hérault) », *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 139, 2-4, p. 617-625.

Fairhead J., Fraser J.A., Amanor K., Solomon D., Lehmann J., Leach M., 2017, « Indigenous soil enrichment for food security and climate change in Africa and Asia: A review », *Indigenous*

Knowledge: Enhancing Its Contribution to Natural Resources Management. Wallingford: CAB International, p. 99-115.

Faměra M., Matys Grygar T., Elznicová J., Grison H., 2018, « Geochemical normalization of magnetic susceptibility for investigation of floodplain sediments », *Environmental Earth Sciences*, 77, 5, p. 189.

Farmer V.C., Russell J.D., McHardy W.J., Newman A.C.D., Ahlrichs J.L., Rimsaite J.Y.H., 1971, « Evidence for loss of protons and octahedral iron from oxidized biotites and vermiculites », *Mineralogical Magazine*, 38, 294, p. 121-137.

Fechner K., 2021, *Contribution de l'archéopédologie et de la stratigraphie à l'interprétation fonctionnelle et environnementale des structures du Néolithique et du Bronze ancien entre Rhin et Seine*, Thèse de doctorat en Archéologie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 1201 p.

Fechner K., Bécu B., Degryse H., Doutrelepon H., Vrydaghs L., 2002, « Indices sédimentaires liés aux structures de combustion en Moyenne Belgique », *Civilisations*, 49, 1/2, p. 311-362.

Fechner K., Broes F., 2019, « La ressource sol et les traits archéopédologiques utiles dans les structures archéologiques : vers un enregistrement systématique ? », dans DESSAINT M., GORIN C., DEL MEDICO C. (dirs.), *Méthodes d'enregistrement des données en archéologie*, Paris, Éditions de la Sorbonne (Archéo.doct).

Fedoroff N., Fiès J.C., 1968, « Les vertisols du sud est de la Beauce », *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol*, 1, p. 19.

Fedoroff N., Courty M.-A., Guo Z., 2018, « Chapter 28 - Palaeosoils and Relict Soils: A Conceptual Approach », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 821-862.

Feiken H., Tol G.W., Leusen P.M. van, Anastasia C., 2012, « Reconstructing a Bronze Age hidden landscape: geoarchaeological research at Tratturo Caniò (Italy, 2009) », *Palaeohistoria*, p. 109-159.

Feiken H. 2014 *Dealing with biases: Three geo-archaeological approaches to the hidden landscapes of Italy*, Barkhuis.

Feller C., Albrecht A., Tessier D., 1995, « Aggregation and Organic Matter Storage in Kaolinitic and Smectitic Tropical Soils », dans *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*, CRC Press.

Fendorf S., Nico P.S., Kocar B.D., Masue Y., Tufano K.J., 2010, « Chapter 12 - Arsenic Chemistry in Soils and Sediments », dans SINGH B., GRÄFE M. (dirs.), *Developments in Soil Science*, Elsevier (Synchrotron-Based Techniques in Soils and Sediments), p. 357-378.

Fénelon P., 1962, « Vocabulaire de Géographie agraire », *Norois*, 35, 1, p. 333-341.

Fey M.V., Le Roux J., 1977, « Properties and Quantitative Estimation of Poorly Crystalline Components in Sesquioxidic Soil Clays », *Clays and Clay Minerals*, 25, 4, p. 285-294.

Ffolliott P.F., Stropki C.L., Chen H., Neary D.G., 2011, « The 2002 Rodeo-Chediski Wildfire's Impacts on Southwestern Ponderosa Pine Ecosystems, Hydrology, and Fuels », Research Paper, RMRS-RP-85, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Fine P., Singer M.J., La Ven R., Verosub K., Southard R.J., 1989, « Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences », *Geoderma*, 44, 4, p. 287-306.

- Fischer H., Luster J., Gehring A.U., 2008, « Magnetite weathering in a Vertisol with seasonal redox-dynamics », *Geoderma*, 143, 1, p. 41-48.
- Flaux C., Scrinzi M., Djerbi H., 2022, « À quand remonte l'état de référence « naturel » du Vistre de la Fontaine (Nîmes) ? », *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*.
- Fontana L., 2003, « Le Renne, l'Aurochs et les volcans. Hommes, gibiers et reconquête forestière en Grande Limagne entre 12 300 BP et 7 500 BP », *PALEO. Revue d'archéologie préhistorique*, 15, p. 87-104.
- Forestier M. 2015 *Construire avec les ressources naturelles du massif du Jura*, Lausanne, Suisse, Favre, 223 p.
- Forget M.C.L., Regev L., Friesem D.E., Shahack-Gross R., 2015, « Physical and mineralogical properties of experimentally heated chaff-tempered mud bricks: Implications for reconstruction of environmental factors influencing the appearance of mud bricks in archaeological conflagration events », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, p. 80-93.
- Fouédjeu L., Saulnier M., Lejay M., Dušátko M., Labbas V., Jump A.S., Burri S., Buscaino S., Py-Saragaglia V., 2020, « High resolution reconstruction of modern charcoal production kilns: An integrated approach combining dendrochronology, micromorphology and anthracology in the French Pyrenees », *Quaternary International*.
- Fouéré P., Allenet-de-Ribemont G., Ballarin C., Bertran P., 2018, « Bergerac (24), Les Vaures Nord - Les Sénioriales. Bergerac avant Bergerac, première communauté villageoise au IV^e millénaire avant notre ère », Rapport de fouille, Bègles, INRAP Grand Sud-Ouest.
- Fourmont A., 2006, *Quantification de l'érosion et de la sédimentation dans le bassin de Sarliève (Massif Central, France) au tardiglaciaire et à l'holocène : Impact des facteurs naturels et anthropiques*, These de doctorat, Tours.
- Fourmont A., Macaire J.-J., Bréhéret J.-G., 2009, « Contrasted Late Glacial and Holocene hydrology of Sarliève paleolake (France) from sediment geometry and detrital versus biochemical composition », *Journal of Paleolimnology*, 41, 3, p. 471-490.
- Frahm E., Monnier G.F., Jelinski N.A., Fleming E.P., Barber B.L., Lambon J.B., 2016, « Chemical soil surveys at the Bremer Site (Dakota county, Minnesota, USA): Measuring phosphorous content of sediment by portable XRF and ICP-OES », *Journal of Archaeological Science*, 75, p. 115-138.
- Fraser R.A., Bogaard A., Heaton T., Charles M., Jones G., Christensen B.T., Halstead P., Merbach I., Poulton P.R., Sparkes D., Styring A.K., 2011, « Manuring and stable nitrogen isotope ratios in cereals and pulses: towards a new archaeobotanical approach to the inference of land use and dietary practices », *Journal of Archaeological Science*, 38, 10, p. 2790-2804.
- Freney J.R., 1986, « Forms and Reactions of Organic Sulfur Compounds in Soils », dans *Sulfur in Agriculture*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 207-232.
- Froeliger N., Pernot P., Wiethold J., 2018, « Une batterie de fours antiques du Haut Empire. Des structures pour une production occasionnelle de charbon de bois ? Le site archéologique de Sainte-Marie-aux-Chênes (Lorraine, France) », dans *Charbonnage, charbonniers, charbonnières. Confluence de regards autour d'un artisanat méconnu [Actes du colloque à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, 12-13 septembre 2013, Limoges]*, Presses universitaires de Provence (Confluent des Sciences, série Histoire des techniques), p. 81-98.

Froment A., 1968, « L'ancienne économie rurale de l'Ardenne et son incidence sur la végétation des Hautes Fagnes », *BSDLg*.

Fuhlendorf S.D., Engle D.M., Kerby J., Hamilton R., 2009, « Pyric Herbivory: Rewilding Landscapes through the Recoupling of Fire and Grazing », *Conservation Biology*, 23, 3, p. 588-598.

Fultz L.M., Moore-Kucera J., Dathe J., Davinic M., Perry G., Wester D., Schwilk D.W., Rideout-Hanzak S., 2016, « Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest », *Applied Soil Ecology*, 99, p. 118-128.

Gachon L., 1963, *Contribution à l'étude du quaternaire récent de la Grande Limagne marno-calcaire : morphogénèse et pédogénèse*, Thèse de Sciences Naturelles, Faculté des Sciences de l'Université de Clermont-Ferrand, Institut national de la recherche agronomique, 169 p.

Gachon L., 2014, « Fertilité des sols », *Encyclopædia Universalis*.

Gadoud M., 1917, « Les forêts du Haut-Dauphiné à la fin du XVIIe siècle et de nos jours », *Revue de Géographie Alpine*, 5, 1, p. 1-113.

Gaime S., 2007, « Ménérol – Les Charmes (extension zone artisanale) », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.

Galland S., Duchêne B., Braguier S., Frouin M., Mocci L., Naton H.-G., Wiethold J., 2014, « Vouzier «ZA de l'Argonne Tranches 1 et 2» Ardennes. Une occupation continue du Néolithique moyen I au Néolithique final II », *Internéo*, 10, p. 15-27.

Galop D., 2005, « Les transformations de l'environnement pyrénéen durant l'Antiquité : l'état de la question à la lumière des données polliniques », *Aquitania*, p. 317-327.

Galop D., Vannière B., Lopez-Saez J.A., 2003, « Des abattis-brûlis néolithiques au système agropastoral pyrénéen actuel. Mise en évidence pluridisciplinaire de l'évolution du système agraire dans une vallée du piémont nord-pyrénéen entre le Néolithique ancien et l'Antiquité tardive », *Les Pyrénées et ses marges au troisième millénaire avant J.-C., actes du XII^e Colloque international d'archéologie de Puigcerda*, p. 82-94.

Gascó J., 2002, « Structures de combustion et préparation des végétaux de la Préhistoire récente et de la Protohistoire en France méditerranéenne », *Civilisations. Revue internationale d'anthropologie et de sciences humaines*, 49, p. 285-309.

Gasparatos D., Massas I., Godelitsas A., 2019, « Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps », *CATENA*, 182, p. 104106.

Gaufrey S., 2011, « Les sites de La Tène moyenne à La Tène finale sur les tracés linéaires en Picardie : questions méthodologiques et résultats scientifiques », *Revue archéologique de Picardie*, 3, 1, p. 201-266.

Gautheyrou M., Gautheyrou J., Quantin P., International Congress of Soil Science = Congrès International de la Science du Sol = International Bodenkundlicher Kongress, 14., Kyoto (Japon), 1990/08/12-18, 1990, « Formes du phosphore d'un andosol soumis à l'écobuage : caractérisation par RMN », *14th International congress of soil science*, 2, p. 329-330.

Gauthier É., Richard H., 2008, « L'anthropisation du Massif jurassien : bilan des données palynologiques », *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 6, 1, p. 273-280.

Gaveriaux F., Bouby L., Marival P., Figueiral I., Binder D., Fouéré P., Gernigon K., Léa V., Hasler A., Vignaud A., Goude G., 2022, « L'alimentation des premières sociétés agropastorales du Sud de la France : premières données isotopiques sur des graines et fruits carbonisés néolithiques et essais de modélisation », *Comptes Rendus. Palevol*, 21, 19, p. 391.

Gazenbeek M., Bellavia V., Braquier S., Laffite J.-D., Thiériot F., Wiethold J., 2013, « Cutting, Moselle, Les Grandes Rayes. Un site rural carolingien de l'Est mosellan », Rapport d'opération archéologique, BB 13017001, Metz, Inrap Grand Est nord.

Gebhardt A., 1999, « Micromorphological analysis of soil structure modifications caused by different cultivation implements », dans ANDERSON P. (dir.), *Prehistory of agriculture, new experimental and ethnographic approaches*, Institute of archaeology, Univ. of California, Los Angeles (Monographie du CRA), p. 260-266.

Gebhardt A., 2007, « Impact of charcoal production activities on soil profiles: the micromorphological point of view », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 31, p. 127-136.

Gebhardt A., Langohr R., 2015, « Traces de roulage ou de labour? Le diagnostic micromorphologique », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 39, p. 31-38.

Gebhardt A., Occhietti S., Fechner K., 2014, « Grandes phases de pédogenèse, d'érosion et d'anthropisation des sols au cours de la seconde moitié de l'Holocène en Lorraine (France) », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 38, p. 7-29.

Gely A., 1984, « L'agriculture sur brûlis chez quelques communautés d'amérindiens et de noirs réfugiés de Guyane française », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 31, 1, p. 43-70.

Georgiadis A., Dietel J., Dohrmann R., Rennert T., 2020, « Review Article. What are the nature and formation conditions of hydroxy-interlayered minerals (HIMs) in soil? », *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183, 1, p. 12-26.

Georjon C., Hénon P., Pasty J.-F., 2012, « Vertaizon (Puy-de-Dôme): Grand Champ de Sainte-Marcelle, partie 2 », Rapport de diagnostic, D102545, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Gerber C., Portmann M., Kündig C. 2002 *Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois. Vestiges archéologiques médiévaux et modernes découverts entre Moutier et Roches sur le tracé de l'autoroute A16, 1995–1997*, Haupt Verlag AG.

Gerlach R., Fischer P., Eckmeier E., Hilgers A., 2012, « Buried dark soil horizons and archaeological features in the Neolithic settlement region of the Lower Rhine area, NW Germany: Formation, geochemistry and chronostratigraphy », *Quaternary International*, 265, Supplement C, p. 191-204.

Ghesquière E., Marchand G. 2010 *Le Mésolithique en France. Archéologie des derniers chasseurs-cueilleurs*, Paris, Éditions La Découverte.

Ghesquière E., Marcigny C., Lefèvre R., 2014, « Parcelles de l'âge du Bronze ancien à Saint-Aubin-d'Arquenay « Éco-quartier des Vignettes » (Calvados) », *Revue archéologique de l'Ouest*, 31, p. 57-82.

Gilck F., Poschod P., 2021, « The history of human land use activities in the Northern Alps since the Neolithic Age. A reconstruction of vegetation and fire history in the Mangfall Mountains (Bavaria, Germany) », *The Holocene*, 31, 4, p. 579-591.

Gillon D., 1990, « Les effets des feux sur la richesse en éléments minéraux et sur l'activité biologique du sol », *Revue Forestière Française*, XLII, spécial, p. 295-302.

- Giosa A., 2012, *Étude géoarchéologique d'un paysage agricole : caractérisation des sols d'un parcellaire conservé sous forêt (Roche Chambain, Rochefort, Côte-d'Or)*., Mémoire de Master 2 Archéologie & Environnement, Paris, France, Université de Paris 1, 158 p.
- Giosa A., 2020, *Les agrosystèmes antiques du Châtillonnais. Approche archéopédologique de la mémoire des forêts dans les parcellaires reconnus par télédétection LiDAR*., Thèse de doctorat : Archéologie, Paris, Université de Paris 1.
- Giosa A., Delbey T., Menbrivès C., Rasmussen K.L., Elliott M., Petit C., 2022, « Indurated soil nodules: A vestige of ancient agricultural practices? », *Geoarchaeology*, 37, 6, p. 870-886.
- Giovannini G., Lucchesi S., 1983, « Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates », *Soil Science*, 136, 4, p. 231.
- Giovannini G., Lucchesi S., Giachetti M., 1988, « Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility », *Soil Science*, 146, 4, p. 255-261.
- Giovannini G., Sequi P., 1976, « Iron and Aluminium as Cementing Substances of Soil Aggregates », *Journal of Soil Science*, 27, 2, p. 148-153.
- Gluza I., 1984, « Neolithic cereals and weeds from the locality of the Lengyel Culture at Nowa Huta-Mogiłła near Cracow », *Acta Palaeobotanica*, 23, 2.
- Gobat J.-M., Aragno M., Matthey W. 2003 *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, Deuxième édition revue et augmentée.
- Gobat, J.-M., Guenat, C. (dirs.) 2019 *Sols et paysages. Types de sols, fonctions et usages en Europe moyenne*, Lausanne, PPUR.
- Godłowska M., Kozłowski J.K., Starkel L., Wasylkowa K., 1987, « Neolithic settlement at Pleszów and changes in the natural environment in the Vistula Valley= Osadnictwo neolityczne w Pleszowie i zmiany środowiska przyrodniczego w dolinie Wisłuy », *Przegląd Archeologiczny*, 34, p. 133-159.
- Goforth B.R., Graham R.C., Hubbert K.R., Zanner C.W., Minnich R.A., 2005, « Spatial distribution and properties of ash and thermally altered soils after high-severity forest fire, southern California », *International Journal of Wildland Fire*, 14, 4, p. 343-354.
- Goldberg P., Aldeias V., 2018, « Why does (archaeological) micromorphology have such little traction in (geo)archaeology? », *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10, 2, p. 269-278.
- Goldberg P., Macphail R.I. 2006 *Practical and theoretical geoarchaeology*, Malden, MA ; Oxford, Blackwell Publishing, 454 p.
- Goldberg P., Miller C.E., Mentzer S.M., 2017, « Recognizing Fire in the Paleolithic Archaeological Record », *Current Anthropology*, 58, 16, p. 175-190.
- Golson J., 2017, « Artefacts of Wood », dans *Ten Thousand Years of Cultivation at Kuk Swamp in the Highlands of Papua New Guinea*, Canberra, Australia, ANU Press, The Australian National University, p. 359-372.
- González-Pérez J.A., González-Vila F.J., Almendros G., Knicker H., 2004, « The effect of fire on soil organic matter—a review », *Environment International*, 30, 6, p. 855-870.
- Gosselain O.P., 2011, « À quoi bon l'ethnoarchéologie ? », *Le Genre humain*, 50, 1, p. 87-111.

- Gottesfeld L.M.J., 1994, « Aboriginal burning for vegetation management in northwest British Columbia », *Human Ecology*, 22, 2, p. 171-188.
- Goude G., Schmitt A., Herrscher E., Loison G., Cabut S., André G., 2013, « Pratiques alimentaires au Néolithique moyen : nouvelles données sur le site de Pontcharaud 2 (Puy-de-Dôme, Auvergne, France) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 110, 2, p. 299-317.
- Gray D.M., Dighton J., 2006, « Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion », *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 6, p. 1469-1477.
- Grenand F., 1996, « L'abattis contre l'essart, again. », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 38, 1, p. 19-53.
- Grigg D., 1979, « Ester Boserup's theory of agrarian change: a critical review », *Progress in human geography*, 3, 1, p. 64-84.
- Grimley D.A., Vepraskas M.J., 2000, « Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 64, 6, p. 2174-2180.
- Grimley D.A., Arruda N.K., 2007, « Observations of magnetite dissolution in poorly drained soils », *Soil Science*, 172, 12, p. 968-982.
- Grimley D.A., Arruda N.K., Bramstedt M.W., 2004, « Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA », *CATENA*, 58, 2, p. 183-213.
- Grogan P., Bruns T.D., Chapin F.S., 2000, « Fire Effects on Ecosystem Nitrogen Cycling in a Californian Bishop Pine Forest », *Oecologia*, 122, 4, p. 537-544.
- Gualtieri A.F., Venturelli P., 1999, « In situ study of the goethite-hematite phase transformation by real time synchrotron powder diffraction », *American Mineralogist*, 84, 5-6, p. 895-904.
- Guenat, C. (dir.) 1987 *Les sols forestiers non hydromorphes sur moraines du Jura Vaudois: pédogénèse et relations sol-végétation*, Lausanne, EPFL, 222 p.
- Guiblais-Starck A., 2017, « Le rouge et le noir : vestiges d'agriculture par le feu sur les bords du Vieil Hozain (XIe-XIIe siècles). Grand Est, Aube, Vaudes, « Les Trappes », « Les Clos », « Les Lames » », Rapport de fouille, BB 07048801/ F035550, Metz, Inrap Grand Est.
- Guiblais-Starck A., Menbrivès C., Coubray S., Dandurand G., Giosa A., Martin S., Petit C., 2020, « Première identification archéologique d'un écobuage médiéval : le site de Vaudes « Les Trappes » (Aube) », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 44, p. 219-235.
- Guilaine J., 1991, « Vers une Préhistoire agraire », dans *Pour une archéologie agraire. A la croisée des sciences de l'homme et de la nature*, Paris, Armand Colin.
- Guilaine J., 2001, « La diffusion de l'agriculture en Europe: une hypothèse arithmétique. La difusión de L'agricultura en Europa: una hipótesis aritmética », *Zephyrus*, 53, p. 54.
- Guillaume S., Guillaume A., 1989, « Champagnole. XXXIII-26. Notice explicative. feuille 582 », dans *Carte Géologique de la France a 1/50 000.*, Editions B.R.G.M., Orléans, p. 12.
- Guillet B., Rouiller J., 1979, « Chapitre XI. La granulométrie », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 227-233.

Guillet B., Souchier B., 1979, « Chapitre II. Les oxyhydroxydes amorphes et cristallins dans les sols (fer, aluminium, manganèse, silicium) », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 16-37.

Guillon S., Berger J.-F., Richard H., Bouby L., Binder D., 2009, « Analyse pollinique du bassin versant de la Cagne (Alpes-Maritimes, France): dynamique de la végétation littorale au Néolithique », *Des hommes et des plantes: exploitation du milieu et gestion des ressources végétales de la Préhistoire à nos jours. Actes des XXXe rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, p. 22-24.

Guillot B. 1973 *La terre Enkou : recherches sur les structures agraires du plateau Koukouya (Congo)*, Paris, Mouton.

Haas J.N., Karg S., Rasmussen P., 1996, « Beech Leaves and Twigs used as Winter Fodder: Examples from Historic and Prehistoric Times », *Environmental Archaeology*, 1, 1, p. 81-86.

Haas T. de, 2017, « Managing the marshes: An integrated study of the centuriated landscape of the Pontine plain », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 15, p. 470-481.

Håkansson H., Hulthén B., 1986, « On the dissolution of pottery for diatom studies », *Norwegian Archaeological Review*, 19, 1, p. 34-38.

Halferdahl L.B., 1961, « Chloritoid: Its Composition, X-ray and Optical Properties, Stability, and Occurrence », *Journal of Petrology*, 2, 1, p. 49-135.

Halstead P., 1998, « Ask the Fellows who Lop the Hay: Leaf-Fodder in the Mountains of Northwest Greece », *Rural History*, 9, 2, p. 211-234.

Halstead P., 2018, « Forest clearance and land use by early farmers in Europe: Insights from north Greek oral history », *Quaternary International*, 496, p. 42-50.

Hamer J.M.M., Sheldon N.D., Nichols G.J., Collinson M.E., 2007, « Late Oligocene–Early Miocene paleosols of distal fluvial systems, Ebro Basin, Spain », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 3, p. 220-235.

Hamilton A., Hall C., 2012, « A Review of Rehydroxylation in Fired-Clay Ceramics », *Journal of the American Ceramic Society*, 95, 9, p. 2673-2678.

Hanesch M., Scholger R., 2005, « The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles », *Geophysical Journal International*, 161, 1, p. 50-56.

Hanesch M., Stanjek H., Petersen N., 2006, « Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: the role of organic carbon », *Geophysical Journal International*, 165, 1, p. 53-61.

Hardy B., Dufey J., 2015, « La forêt wallonne, composante vitale de la sidérurgie préindustrielle. », *FORET NATURE*, 135, p. 10-18.

Harfouche R., Poupet P., 2013, « Approche pédoarchéologique des espaces de production agricole à l'âge du Bronze dans les montagnes méditerranéennes (exemples des Pyrénées-Orientales et de la Haute-Corse, France) », *Préhistoires Méditerranéennes*, 4.

Harris W.G., Hollien K.A., Bates S.R., Acree W.A., 1992, « Dehydration of Hydroxy-Interlayered Vermiculite as a Function of Time and Temperature », *Clays and Clay Minerals*, 40, 3, p. 335-340.

Harris W., White G.N., 2008, « X-ray Diffraction Techniques for Soil Mineral Identification », dans *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 81-115.

- Harter R.D., 1979, « Adsorption of Copper and Lead by Ap and B2 Horizons of Several Northeastern United States Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 43, 4, p. 679-683.
- Hatrival J.N., 1988, « Montmort. Notice explicative. feuille 187 », dans *Carte Géologique de la France a 1/50 000.*, Editions du BRGM, Orléans, France, p. 38.
- Hatrival J.N., Morfaux P., 1974, « Bouilly. XXVIII-18. Notice explicative. feuille 333 », dans *Carte Géologique de la France a 1/50 000.*, Editions B.R.G.M., Orléans.
- Haudricourt A.-G., 1963, « Agriculture », *Dictionnaire archéologique des techniques*, 1, p. 207-209.
- Haudricourt A.-G., Brunhes Delamarre M.J. 1986 *L'Homme et la charrue à travers le monde*, Lyon, France, La Manufacture, 410 p.
- Hauert C., Rohr G. von, Margreth S., Schmidhauser A., Gasche T., 2017, « Böden im Kanton Solothurn. Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn », *Mitteilungen*, 43.
- Havlicek E., 1999, *Les sols des pâturages boisés du Jura suisse: origine et typologie, relations sol-végétation, pédogenèse des brunisols, évolution des humus*, Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Institut de Botanique, Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie.
- Havlicek E., Gobat J.M., 1996, « Les apports éoliens dans les sols du Jura », *Etat des connaissances et nouvelles données en pâturages boisés. Etude et Gestion des Sols*, 3, 3, p. 167-178.
- Haxthausen A. von (1792-1866) A. du texte 1847 *Études sur la situation intérieure, la vie nationale et les institutions rurales de la Russie. [Tome 1] / par le baron Auguste de Haxthausen.*
- Hébert J., 1979, « Chapitre XXII. L'azote », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 386-394.
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G., 2001, « Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results », *Journal of Paleolimnology*, 25, 1, p. 101-110.
- Heller L., Farmer V.C., Mackenzie R.C., Mitchell B.D., Taylor H.F.W., 1962, « The dehydroxylation and rehydroxylation of triphormic dioctahedral clay minerals », *Clay Minerals Bulletin*, 5, 28, p. 56-72.
- Henry F., Talon B., Dutoit T., 2010, « The age and history of the French Mediterranean steppe revisited by soil wood charcoal analysis. », *The Holocene*, 20, 1, p. 25-34.
- Herbauts J., Berthelon S., Gruber W., 1990, « Relation entre pratique de l'essartage et distribution des phytolithes dans deux sols forestiers de l'Ardenne belge », *Pédologie*, XL-3, p. 225-225.
- Herman D.J., Rundel P.W., 1989, « Nitrogen Isotope Fractionation in Burned and Unburned Chaparral Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 53, 4, p. 1229-1236.
- Herrmann L., Ehrmann O., Stein C., Wermbter N., Schulz E., Rösch M., Hall M., Bogenrieder A., Page H., Schier W., 2007, « The Forchtenberg project. An interdisciplinary experimental approach towards Neolithic agriculture. », *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie Serie A*, 112, p. 127-132.
- Hétier J.M., Yoshinaga N., Weber F., 1977, « Formation of clay minerals in andosols under temperate climate », *Clay Minerals*, 12, 4, p. 299-307.

Hirsch F., Schneider A., Bauriegel A., Raab A., Raab T., 2018, « Formation, Classification, and Properties of Soils at Two Relict Charcoal Hearth Sites in Brandenburg, Germany », *Frontiers in Environmental Science*, 6.

Hirsch F., Schneider A., Bonhage A., Raab A., Drohan P.J., Raab T., 2020, « An initiative for a morphologic-genetic catalog of relict charcoal hearths from Central Europe », *Geoarchaeology*, 35, 6, p. 974-983.

Holmqvist E., 2016, « Handheld portable energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry (pXRF) », dans HUNT A.M.W. (dir.), *The Oxford handbook of archaeological ceramic analysis*, Oxford University Press Oxford (Oxford University Press Oxford UK), p. 363-381.

Hong H., Gu Y., Li R., Zhang K., Li Z., 2010, « Clay mineralogy and geochemistry and their palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits in the Xuancheng section, southern China », *Journal of Quaternary Science*, 25, 5, p. 662-674.

Hoogsteen M.J.J., Lantinga E.A., Bakker E.J., Groot J.C.J., Tuttonell P.A., 2015, « Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss: Refining the loss on ignition method », *European Journal of Soil Science*, 66, 2, p. 320-328.

Horard-Herbin M.-P., Lefèvre C., Vigne J.-D., 2005, « Chapitre 3. L'alimentation carnée et les produits alimentaires », dans *Animaux, environnements et sociétés.*, Éditions Errance (Collection Archéologiques), p. 63-92.

Houdusse B., Vernet G., 2017, « Ceyrat (Puy-de-Dôme) : Route du Mont Dore, Lotissement de la Beaumière », Rapport de diagnostic, D116440, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Hu G., Dam-Johansen K., Wedel S., Hansen J.P., 2006, « Decomposition and oxidation of pyrite », *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 3, p. 295-314.

Hu Z.Y., Zhao F.J., McGrath S.P., 2005, « Sulphur fractionation in calcareous soils and bioavailability to plants », *Plant and Soil*, 268, 1, p. 103-109.

Huang P.M., Wang M.K., Kämpf N., Schulze D.G., 2002, « Aluminum Hydroxides », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 261-289.

Huang X., Restuccia F., Gramola M., Rein G., 2016, « Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires », *Combustion and Flame*, 168, p. 393-402.

Huber E., Bell T.L., Adams M.A., 2013, « Combustion influences on natural abundance nitrogen isotope ratio in soil and plants following a wildfire in a sub-alpine ecosystem », *Oecologia*, 173, 3, p. 1063-1074.

Hubert F., Caner L., Meunier A., Ferrage E., 2012, « Unraveling complex <2 µm clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity », *American Mineralogist*, 97, 2-3, p. 384-398.

Huisman D.J., Braadbaart F., Wijk I.M. van, Os B.J.H. van, 2012, « Ashes to ashes, charcoal to dust: micromorphological evidence for ash-induced disintegration of charcoal in Early Neolithic (LBK) soil features in Elsloo (The Netherlands) », *Journal of Archaeological Science*, 39, 4, p. 994-1004.

Huisman D.J., Raemaekers D.C.M., 2014, « Systematic cultivation of the Swifterbant wetlands (The Netherlands). Evidence from Neolithic tillage marks (c. 4300–4000 cal. BC) », *Journal of Archaeological Science*, 49, p. 572-584.

Hulin G., Broes F., Fechner K., 2012, « Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de paramètres magnétiques sur surface décapée : Premiers résultats sur le projet Canal Seine-Nord Europe », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 36, p. 61-70.

Hulin G., Prilaux G., Talon M., 2014, « Intégration de la géophysique à un projet archéologique d'envergure. L'exemple du projet canal Seine-Nord-Europe », *Revue archéologique de Picardie*, 1, 1, p. 245-260.

Hunt A.M.W., Speakman R.J., 2015, « Portable XRF analysis of archaeological sediments and ceramics », *Journal of Archaeological Science*, 53, p. 626-638.

Husson O., Charpentier H., Naudin K., Moussa N., Michellon R., Andrianasolo H., Razanamparany C., Rakotoarinivo C., Rakotondramanana, Enjalric F., Séguy L., 2009, « Chapitre 2. Le choix des itinéraires techniques SCV », dans *Manuel pratique du semis direct à Madagascar*, GSDM/CIRAD, Antananarivo.

ICPT (International Committee for Phytolith Taxonomy), 2019, « International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0 », *Annals of Botany*, 124, 2, p. 189-199.

Iglesias T., Cala V., Gonzalez J., 1997, « Mineralogical and chemical modifications in soils affected by a forest fire in the Mediterranean area », *Science of The Total Environment*, 204, 1, p. 89-96.

Illett M., 2010, « Le Néolithique ancien dans le nord de la France », dans *La France préhistorique. Un essai d'histoire*, Éditions Gallimard, (nrf essais), p. 281-307.

Irannezhad M., Liu J., Ahmadi B., Chen D., 2020, « The dangers of Arctic zombie wildfires », *Science*, 369, 6508, p. 1171-1171.

Ismail-Meyer K., 2017, « Plant Remains », dans *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 121-135.

IUSS Working Group WRB 2015 *Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde N° 106*, FAO, Rome, Italy.

Iversen J., 1941, « Land occupation in Denmark's Stone age », *Danmarks Geologiske Undersogelse II*, 66, 9, p. 68.

Iversen J., 1956, « Forest Clearance in the Stone Age », *Scientific American*, 194, 3, p. 36-41.

Izard V., 1992, « L'art du charbonnier: contributions ethno-botanique et géographico-historique à l'étude des paysages métallurgiques d'après l'anthracanalyse des charbonnières », *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 139, 2-4, p. 587-596.

Jacamon M. 1992 *Guide de dendrologie, arbres, arbustes et arbrisseaux des forêts françaises*, Éditions de l'ENGREF, 3ème édition, 349 p.

Jackson M.L., 1962, « Interlayering of Expansible Layer Silicates in Soils by Chemical Weathering », *Clays and Clay Minerals*, 11, 1, p. 29-46.

Jackson M.L., Whittig L.D., Heuvel R.C. vanden, Kaufman A., Brown B.E., 1953, « Some Analyses of Soil Montmorin, Vermiculite, Mica, Chlorite, and Interstratified Layer Silicates », *Clays and Clay Minerals*, 2, 1, p. 218-240.

Jacomet S., 2007, « PLANT MACROFOSSIL METHODS AND STUDIES | Use in Environmental Archaeology », dans ELIAS S.A. (dir.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, Oxford, Elsevier, p. 2384-2412.

Jacomet S., Ebersbach R., Akeret Ö., Antolín F., Baum T., Bogaard A., Brombacher C., Bleicher N.K., Heitz-Weniger A., Hüster-Plogmann H., Gross E., Kühn M., Rentzel P., Steiner B.L., Wick L., Schibler J.M., 2016, « On-site data cast doubts on the hypothesis of shifting cultivation in the late Neolithic (c. 4300–2400 cal. BC): Landscape management as an alternative paradigm. », *The Holocene*, 26, 11, p. 1858-1874.

Jain T.B., Pilliod D.S., Graham R.T., Lentile L.B., Sandquist J.E., 2012, « Index for Characterizing Post-Fire Soil Environments in Temperate Coniferous Forests », *Forests*, 3, 3, p. 445-466.

Jakobitsch T., Dworsky C., Heiss A.G., Kühn M., Rosner S., Leskovar J., 2023, « How animal dung can help to reconstruct past forest use: a late Neolithic case study from the Mooswinkel pile dwelling (Austria) », *Archaeological and Anthropological Sciences*, 15, 3, p. 20.

Jamagne M., 1967, « Bases et techniques d'une cartographie des sols »,.

Jamagne M. 2011 *Grands paysages pédologiques de France*, éditions Quae, 535 p.

Jensen K., Lynch E.A., Calcote R., Hotchkiss S.C., 2007, « Interpretation of charcoal morphotypes in sediments from Ferry Lake, Wisconsin, USA: do different plant fuel sources produce distinctive charcoal morphotypes? », *The Holocene*, 17, 7, p. 907-915.

Jeunesse C., 2003, « L'histoire sur le terrain : néolithique "initial", néolithique ancien et néolithisation dans l'espace centre-européen : une vision rénovée. »,.

Ji J., Shen J., Balsam W., Chen J., Liu L., Liu X., 2005, « Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments », *Earth and Planetary Science Letters*, 233, 1, p. 61-70.

Jobbé-Duval M., Cochet H., Bourliaud J.B., 2007, « L'écobuage andin. Questions sur les origines, l'extension, les modalités et le devenir d'une technique d'ouverture des champs de pomme de terre sur puna humide (Cochabamba, Bolivie). », *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 48-49, p. 149-188.

Johnston S.G., Karimian N., Burton E.D., 2019, « Fire Promotes Arsenic Mobilization and Rapid Arsenic(III) Formation in Soil via Thermal Alteration of Arsenic-Bearing Iron Oxides », *Frontiers in Earth Science*, 7, p. 139.

Jones R., 2012, « Fire-Stick Farming », *Fire Ecology*, 8, 3, p. 3-8.

Jongierius A., 1970, « Some morphological aspects of regrouping phenomena in Dutch soils », *Geoderma*, 4, 3, p. 311-331.

Jordanova D., Jordanova N., Barrón V., Petrov P., 2018, « The signs of past wildfires encoded in the magnetic properties of forest soils », *CATENA*, 171, p. 265-279.

Jordanova N., 2017, « Chapter 10 - Applications of soil magnetism », dans JORDANOVA N. (dir.), *Soil Magnetism*, Academic Press, p. 395-436.

Jouaffre D., 1989, *Pédognèse et rubéfaction post-wurmiennes en climat montagnard humide (Jura)*, These de doctorat, Besançon.

Jouaffre D., Bruckert S., Williams A.F., Herbillon A.J., Kubler B., 1991, « Rubéfaction post-wurmienne en climat montagnard humide jurassien. Rôle du pédoclimat et actualité du processus », *Geoderma*, 50, 3, p. 239-257.

Juste C., Dureau P., 1967, « Production d'azote ammoniacal par décomposition thermique d'acides aminés associés à un sol argilo-limoneux », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série D : Sciences Naturelles*, tome 265.

Kaal J., Martínez Cortizas A., Eckmeier E., Costa Casais M., Santos Estévez M., Criado Boado F., 2008, « Holocene fire history of black colluvial soils revealed by pyrolysis-GC/MS: a case study from Campo Lameiro (NW Spain) », *Journal of Archaeological Science*, 35, 8, p. 2133-2143.

Kabata-Pendias A. 2000 *Trace Elements in Soils and Plants*, Boca Raton, CRC Press, 3^e édition, 432 p.

Kalis A.J., Merkt J., Wunderlich J., 2003, « Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes », *Quaternary Science Reviews*, 22, 1, p. 33-79.

Kanstrup M., Thomsen I.K., Andersen A.J., Bogaard A., Christensen B.T., 2011, « Abundance of ¹³C and ¹⁵N in emmer, spelt and naked barley grown on differently manured soils: towards a method for identifying past manuring practice », *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25, 19, p. 2879-2887.

Karathanasis A.D., 1988, « Compositional and Solubility Relationships Between Aluminum-hydroxyinterlayered Soil-Smectites and Vermiculites », *Soil Science Society of America Journal*, 52, 5, p. 1500-1508.

Karathanasis A.D., 2008, « Thermal Analysis of Soil Minerals », dans *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 117-160.

Karathanasis A.D., Hajek B.F., 1982, « Revised Methods for Rapid Quantitative Determination of Minerals in Soil Clays », *Soil Science Society of America Journal*, 46, 2, p. 419-425.

Kasprzyk M., Roms C., 2023, « Recherches sur l'histoire de Troyes, des origines à la fin du Moyen Âge », *Archéopages. Archéologie et société*, Hors-série 6, p. 146-155.

Keeley J.E., 2009, « Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage », *International Journal of Wildland Fire*, 18, 1, p. 116-126.

Kelm R., 2014, « A Slash-and-Burn-Experiment in the Stone Age Park Albersdorf, Germany. Possibilities of the Demonstration of neolithic agricultural methods - Experiences and Results », OpenArch Conference: The Value and Scale of the Experimental Archaeology Approach, Kierikki Stone Age Centre, Finlande, 2014.

Kennett D.J., Kennett J.P., West G.J., Erlandson J.M., Johnson J.R., Hendy I.L., West A., Culleton B.J., Jones T.L., Stafford T.W., 2008, « Wildfire and abrupt ecosystem disruption on California's Northern Channel Islands at the Allerød-Younger Dryas boundary (13.0-12.9ka) », *Quaternary Science Reviews*, 27, 27, p. 2530-2545.

Ketterings Q.M., Bigham J.M., 2000, « Soil Color as an Indicator of Slash-and-Burn Fire Severity and Soil Fertility in Sumatra, Indonesia », *Soil Science Society of America Journal*, 64, 5, p. 1826-1833.

Ketterings Q.M., Bigham J.M., Laperche V., 2000, « Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia », *Soil Science Society of America Journal*, 64, 3, p. 1108-1117.

Ketterings Q.M., Noordwijk M. van, Bigham J.M., 2002, « Soil phosphorus availability after slash-and-burn fires of different intensities in rubber agroforests in Sumatra, Indonesia », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 92, 1, p. 37-48.

Kirby K.R., Gray R.D., Greenhill S.J., Jordan F.M., Gomes-Ng S., Bibiko H.-J., Blasi D.E., Botero C.A., Bowern C., Ember C.R., Leehr D., Low B.S., McCarter J., Divale W., Gavin M.C., 2016, « D-PLACE: A Global Database of Cultural, Linguistic and Environmental Diversity », *PLOS ONE*, 11, 7, p. e0158391.

Kiss L., 2002, *Impact des incendies sur les communautés de gastéropodes terrestres en basse Provence calcaire*, thesis, Aix-Marseille 3.

Kiss L., Magnin F., 2003, « The impact of fire on some Mediterranean land snail communities and patterns of post-fire recolonization », *Journal of Molluscan Studies*, 69, 1, p. 43-53.

Klag T., Blouet V., Lansival R., Michel K., Ollive V., Pernot P., Petitdidier M.-P., Vidal P., Wiethold J., 2016, « Metz, Moselle, Chemin de la Corvée, rue de la Folie, ZAC du Sansonnet. Un habitat du Bronze final et sa nécropole », Rapport de fouille archéologique, BB 13020701, Metz, Inrap Grand Est nord.

Kohut C.K., Warren C.J., 2002, « Chlorites », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 531-553.

Kovda I., Mermut A.R., 2018, « Chapter 21 - Vertic Features », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 605-632.

Kreuz A.A., 2007, « Archaeobotanical perspectives on the beginning of agriculture north of the Alps », dans *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*, Routledge.

Kreuz A., Marinova E., Schäfer E., Wiethold J., 2005, « A comparison of early Neolithic crop and weed assemblages from the Linearbandkeramik and the Bulgarian Neolithic cultures: differences and similarities », *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 4, p. 237-258.

Kreuz A., Märkle T., Marinova E., Rösch M., Schäfer E., Schamuhn S., Zerl T., 2014, « The Late Neolithic Michelsberg culture – just ramparts and ditches? A supraregional comparison of agricultural and environmental data », *Praehistorische Zeitschrift*, 89, 1, p. 72-115.

Kreuz A., Schäfer E., 2011, « Weed finds as indicators for the cultivation regime of the early Neolithic Bandkeramik culture? », *Vegetation History and Archaeobotany*, 20, 5, p. 333-348.

Kristiansen K., 1990, « Ard marks under barrows: a response to Peter Rowley-Conwy », *Antiquity*, 64, 243, p. 322-327.

Kruk J., 1973, « Studia osadnicze nad neolitem wyżyn lessowych »,.

Kruk J., Howell J.M., Starling N.J. 1980 *The Neolithic Settlement of Southern Poland*, BAR Publishing.

Kubiak-Martens L., Linden M. van der, Hardy K., Mackay H., Ngan-Tillard D.J.M., Shillito L.-M., Zeiler J.T., 2022, « Neolithic Human Diet Based on Studies of Coprolites from the Swifterbant Culture Sites, the Netherlands: Synthesis-Human versus community diet », dans *Neolithic Human Diet Based*

on *Studies of Coprolites from the Swifterbant Culture Sites, the Netherlands*, Cultural Heritage Agency of the Netherlands, p. 119-139.

Kubiak-Martens L., 2002, « New evidence for the use of root foods in pre-agrarian subsistence recovered from the late Mesolithic site at Halsskov, Denmark », *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1-2, p. 23-32.

Kühn M., Maier U., Herbig C., Ismail-Meyer K., Le Bailly M., Wick L., 2013, « Methods for the examination of cattle, sheep and goat dung in prehistoric wetland settlements with examples of the sites Alleshausen-Taschenwiesen and Alleshausen-Grundwiesen (around cal 2900 BC) at Lake Federsee, south-west Germany », *Environmental Archaeology*, 18, 1, p. 43-57.

Kühn P., Aguilar J., Miedema R., Bronnikova M., 2018, « Chapter 14 - Textural Pedofeatures and Related Horizons », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 377-423.

Kushla J.D., Ripple W.J., 1997, « The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest », *Forest Ecology and Management*, 95, 2, p. 97-107.

Lagroix F., Banerjee S.K., Jackson M.J., 2016, « Geological Occurrences and Relevance of Iron Oxides », dans *Iron Oxides*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 7-30.

Lamouroux M., 1972, « Etat et comportement du fer dans les sols formés sur roches carbonatées au Liban », *Science du Sol*, 1, p. 85.

Lamouroux M., Ségalen P., 1969, « Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens du Liban », *Science du Sol*, 1, p. 63-75.

Langohr R., 1993, « Types of tree windthrow, their impact on the environment and their importance for the understanding of archaeological excavation data », *Helinium*, XXXIII, 1, p. 36-49.

Langohr R., 2001, « L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien- Apports de l'archéopédologie. », *Étude et Gestion des Sols*, 8, 2, p. 103-118.

Langohr R., 2019, « Settlement of the first farmers in the Belgian loess belt, the edaphic factor » DEÁK J., AMPE C., MIKKELSEN J.H. (dirs.), *Soils as records of past and Present. From soil surveys to archaeological sites: research strategies for interpreting soil characteristics. Proceedings of the Geoarchaeological Meeting Bruges (Belgium), 6 & 7 November, 2019. Raakvlak, Bruges.* <http://doi.org/10.5281/zenodo.3420213>, p. 19-30.

Large J.-M., 2011, « Enclos et traces d'araire, d'importants indices archéologiques découverts sur le littoral vendéen », *Bulletin de l'A.M.A.R.A.I.*, 24.

Large J.-M., 2012, « Témoins d'une activité agricole: d'anciennes traces d'araire sur les côtes de Vendée. Quels arguments pour déterminer leur âge », *Bulletin du Groupe Vendéen d'études Préhistoriques*, 48, p. 25-38.

Laroche B., Olivier D., Moreira N. 2013 *Référentiel Régional Pédologique de l'Aube à 1/250 000*, Institut National de la Recherche Agronomique & Chambre Départementale d'Agriculture.

Lauer F., Pätzold S., Gerlach R., Protze J., Willbold S., Amelung W., 2013, « Phosphorus status in archaeological arable topsoil relicts—Is it possible to reconstruct conditions for prehistoric agriculture in Germany? », *Geoderma*, 207-208, p. 111-120.

Laurelut C., 2003, « Courjeonnet (Marne) Les Colinets, Exploitation de tourbe, Section ZD, parcelle 80pp », Rapport de diagnostic archéologique, Code INRAP 21 07 0324 01.

Laurelut C., 2011, « Mairy (Ardennes françaises) : un site d'habitat ... ou pas ? Premiers éléments de réflexion sur la fonction du site », *Revue archéologique de Picardie. Numéro spécial*, 28, 1, p. 139-165.

Laurelut C., 2012, « Mairy (Ardennes) « les Vingt-Deux Fauchées » et « Perche » à Bertan. Traces de déforestation et structures de combustion antiques (fin de La Tène - Haut Moyen Age) », Rapport final d'opération. Fouille d'évaluation archéologique, 07 389 14633, Metz, Inrap Grand Est nord.

Laurelut C., 2015, « Mairy (Ardennes), La Plate Pierre. Chenaux colmatés et traces d'anthropisation », Rapport de diagnostic archéologique, BA 07 0914 01, Metz, Inrap Grand Est nord.

Le Jeune Y., Pastre J.-F., Arcay D., Aubry L., Camerlynck C., Confalonieri J., Lanchon Y., Vergnaud D., Vissac C., 2005, « Variabilité de l'enregistrement alluvial holocène ; l'exemple du méandre de la Haute-Île (vallée de la Marne, bassin parisien), premiers résultats », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 16/4, p. 299-313.

Lechterbeck J., Rösch M., 2021, « Böhlinger See, western Lake Constance (Germany): an 8500 year record of vegetation change », *Grana*, 60, 2, p. 119-131.

Legrand P., Bartoli F., Curt T., 2007, « Spécificités des sols volcaniques du Massif central: bénéfiques et contraintes pour la gestion forestière », *Revue Forestière Française*.

Lelong F., Roose E., Darthout R., Trevisan D., 1993, « Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées », *Science du sol*, 31, 4, p. 251-279.

Lelong F., Souchier B., 1979, « Chapitre V. Signification écologique du complexe d'altération. Importance relative des facteurs généraux et stationnels », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 73-96.

Leone V., 1990, « Causes socio-économiques des incendies de forêts dans la région de Bari (Pouilles, Italie) », *Revue forestière française*, 42, S, p. 332-336.

Lerche G., Steensberg A. 1973 *Observations on spade-cultivation in the New Guinea Highlands*.

Leroyer C., 2006, « L'impact des groupes néolithiques du Bassin parisien sur le milieu végétal. Évolution et approche territoriale d'après les données polliniques », *Actes du 25e Colloque interrégional sur le Néolithique*, p. 133-149.

Leslie I.N., Heinse R., Smith A.M.S., McDaniel P.A., 2014, « Root Decay and Fire Affect Soil Pipe Formation and Morphology in Forested Hillslopes with Restrictive Horizons », *Soil Science Society of America Journal*, 78, 4, p. 1448-1457.

Leuschner C., Ellenberg H. 2017 *Ecology of Central European Non-Forest Vegetation: Coastal to Alpine, Natural to Man-Made Habitats: Vegetation Ecology of Central Europe, Volume II*, Cham, Springer International Publishing.

Lewis H. 2012 *Investigating Ancient Tillage: An experimental and soil micromorphological study*, BAR Publishing.

Leys B.A., Commerford J.L., McLauchlan K.K., 2017, « Reconstructing grassland fire history using sedimentary charcoal: Considering count, size and shape », *PloS One*, 12, 4, p. e0176445.

- Li J., Richter D., 2012, « Effects of two-century land use changes on soil iron crystallinity and accumulation in Southeastern Piedmont region, USA », *Geoderma*, 173-174, p. 184-191.
- Li Y., Yu S., Strong J., Wang H., 2012, « Are the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus driven by the “FeIII–FeII redox wheel” in dynamic redox environments? », *Journal of Soils and Sediments*, 12, 5, p. 683-693.
- Li Y., Zhang H., Tu C., Song F., Luo Y., 2017, « Occurrence of red clay horizon in soil profiles of the Yellow River Delta: Implications for accumulation of heavy metals », *Journal of Geochemical Exploration*, 176, p. 120-127.
- Liegard S., Fourvel A., 1997, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme): rue des Quatre Passeports », Rapport de fouilles, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.
- Lin S., Sun P., Huang X., Lin S., Sun P., Huang X., 2019, « Can peat soil support a flaming wildfire? », *International Journal of Wildland Fire*, 28, 8, p. 601-613.
- Linford N.T., Canti M.G., 2001, « Geophysical evidence for fires in antiquity: preliminary results from an experimental study. Paper given at the EGS XXIV General Assembly in The Hague, April 1999 », *Archaeological Prospection*, 8, 4, p. 211-225.
- Liou J.G., Chen P.-Y., 1978, « Chemistry and origin of chloritoid rocks from eastern Taiwan », *Lithos*, 11, 3, p. 175-187.
- Liu Z., Chen D., Zhang J., Lü X., Wang Z., Liao W., Shi X., Tang J., Xie G., 2019, « Pyrite Morphology as an Indicator of Paleoredox Conditions and Shale Gas Content of the Longmaxi and Wufeng Shales in the Middle Yangtze Area, South China », *Minerals*, 9, 7, p. 428.
- Loison G., 1994, « Beaumont [Puy-de-Dôme] : RN 89, sortie Ouest de Clermont-Ferrand : rapport de fouilles », Rapport de fouille, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.
- Loison G., Collis J., Guichard V., Marchianti D., Pelissier E., Bensihamed L., 1991, « Les pratiques funéraires en Auvergne à la fin du second Age du Fer : nouvelles données / Funerary practices in the Auvergne at the late la Tene period : some new evidence », *Revue archéologique du Centre de la France*, 30, 1, p. 97-111.
- Long J.W., Lake F.K., Goode R.W., 2021, « The importance of Indigenous cultural burning in forested regions of the Pacific West, USA », *Forest Ecology and Management*, 500, p. 119597.
- Louwe Kooijmans L.P., 2006, « Les débuts de la traction animale aux Pays-Bas et ses conséquences », *Premier chariots, premiers araires. La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IVe et IIIe millénaires avant notre ère*, 29, p. 191-206.
- Lubos C., Dreibrodt S., Bahr A., 2016, « Analysing spatio-temporal patterns of archaeological soils and sediments by comparing pXRF and different ICP-OES extraction methods », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, p. 44-53.
- Ludemann T., 2010, « Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291, 1, p. 154-165.
- Lüning J., 1982, « Research into the Bandkeramik settlement of the Aldenhovener, Platte in the Rhineland », *Analecta Praehistorica Leidensia XV: Prehistoric settlement patterns around the southern north sea: papers presented at a colloquium, held in honour of Professor Dr. PJR Modderman, Leiden, 3-7 may 1982*, 15, p. 1-30.

- Lynch J.A., Clark J.S., Stocks B.J., 2004, « Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forests », *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 8, p. 1642-1656.
- Ma L., Su X., Xi Y., Wei J., Liang X., Zhu J., He H., 2019, « The structural change of vermiculite during dehydration processes: A real-time in-situ XRD method », *Applied Clay Science*, 183, p. 105332.
- Macías Vazquez F., 1981, « Formation of gibbsite in soils and saprolites of temperate-humid zones », *Clay Minerals*, 16, 1, p. 43-52.
- Mackenzie R.C., 1975, « The Classification of Soil Silicates and Oxides », dans GIESEKING J.E. (dir.), *Soil Components: Vol. 2: Inorganic Components*, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 1-25.
- Macphail R.I., Goldberg P., 1990, « The Micromorphology of Tree Subsoil Hollows: Their Significance to Soil Science and Archaeology », dans DOUGLAS L.A. (dir.), *Developments in Soil Science*, Elsevier (Soil Micro-Morphology: A Basic and Applied Science), p. 425-429.
- Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N., 1997, « Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil », *International Journal of Remote Sensing*, 18, 13, p. 2835-2852.
- Madeline P., Moriceau J.-M. 2012 *Les paysans. Récits, témoignages et archives de la France agricole (1870-1970)*, Paris, Les Arènes, 111 p.
- Magny M., 1991, « Une approche paléoclimatique de l'Holocène : les fluctuations des lacs du Jura et des Alpes du Nord françaises », *Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté*, p. 634.
- Magny M., 2007, « LAKE LEVEL STUDIES | West-Central-Europe », dans ELIAS S.A. (dir.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, Oxford, Elsevier, p. 1389-1399.
- Magny M., 2014, « L'histoire du niveau du lac et du climat à Chalain (Jura, France) de 3300 à 2000 BC à partir des séquences stratigraphiques des stations 4 et 19. », dans *Entre archéologie et écologie, une préhistoire de tous les milieux. Mélanges offerts à Pierre Pétrequin*, p. 117-125.
- Magny M., 1992, « Sédimentation et dynamique de comblement dans les lacs du Jura au cours des 15 derniers millénaires », *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*, 16, 1, p. 27-49.
- Magny M., 1993, « Les fluctuations des lacs jurassiens et subalpins et l'histoire du climat au Moyen Age », *Histoire & Mesure*, 8, 1/2, p. 5-17.
- Magny M. 1995 *Une histoire du climat. Des derniers mammoths au siècle de l'automobile*, éditions Errance.
- Magny M., 1997, « 6. Chalain de 6000 à 4500 BP. L'histoire du lac, du climat et du soleil », dans *Les Sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs et de Chalain (Jura). Tome III. Chalain station 3. 3200-2900 av. J.-C.*, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme Paris, p. 65-86.
- Magny M., 2013, « Orbital, ice-sheet, and possible solar forcing of Holocene lake-level fluctuations in west-central Europe: A comment on Bleicher », *The Holocene*, 23, 8, p. 1202-1212.
- Magny M., Bossuet G., Ruffaldi P., Leroux A., Mouthon J., 2011, « Orbital imprint on Holocene palaeohydrological variations in west-central Europe as reflected by lake-level changes at Cerin (Jura Mountains, eastern France) », *Journal of Quaternary Science*, 26, 2, p. 171-177.

- Maher B.A., 1986, « Characterisation of soils by mineral magnetic measurements », *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 1, p. 76-92.
- Maher B.A., Thompson R., Zhou L.P., 1994, « Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: A new mineral magnetic approach », *Earth and Planetary Science Letters*, 125, 1, p. 461-471.
- Maher B.A., 1998, « Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137, 1, p. 25-54.
- Maher B.A., Taylor R.M., 1988, « Formation of ultrafine-grained magnetite in soils », *Nature*, 336, 6197, p. 368-370.
- Mahias M.-C., 2013, « François Sigaut (1940-2012). Promenades à travers champs », *L'Homme. Revue française d'anthropologie*, 206, p. 7-17.
- Maier U., 1999, « Agricultural activities and land use in a Neolithic village around 3900 B.C.: Hornstaad Hörnle I A, Lake Constance, Germany », *Vegetation History and Archaeobotany*, 8, 1, p. 87-94.
- Maki D., Homburg J.A., Brosowske S.D., 2006, « Thermally activated mineralogical transformations in archaeological hearths: inversion from maghemite $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_4$ phase to haematite $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_4$ form », *Archaeological Prospection*, 13, 3, p. 207-227.
- Malla P.B., 2002, « Vermiculites », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 501-529.
- Mallol C., Marlowe F.W., Wood B.M., Porter C.C., 2007, « Earth, wind, and fire: ethnoarchaeological signals of Hadza fires », *Journal of Archaeological Science*, 34, 12, p. 2035-2052.
- Mallol C., Mentzer S.M., Miller C.E., 2017, « Combustion Features », dans NICOSIA C., STOOPS G. (dirs.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, p. 299-330.
- Manen C., 2018, « Économies agropastorales et paysages culturels du Néolithique européen », dans *Une histoire des civilisations. Comment l'archéologie bouleverse nos connaissances*, La Découverte, INRAP, Editions La Découverte ; Dominique carré éditeur ; INRAP, p. 225-230.
- Manen C., Guilaine J., 2021, « La Ceramica impressa en France méditerranéenne »,.
- Maniatis Y., Simopoulos A., Kostikas A., Perdikatsis V., 1983, « Effect of Reducing Atmosphere on Minerals and Iron Oxides Developed in Fired Clays: The Role of Ca », *Journal of the American Ceramic Society*, 66, 11, p. 773-781.
- Manichon H., 1988, « Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture », *Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 74, 1, p. 43-54.
- Marchand G., 2010, « Chasseurs-cueilleurs et agriculteurs en Europe occidentale : les échanges comme condition de la néolithisation ? », dans DEMOULE J.-P. (dir.), *La révolution néolithique dans le monde*, Paris, CNRS Éditions (CNRS Alpha), p. 283-299.
- Marchand L., 1974, « Framboïdes de pyrite in situ », *Annales de la Société géologique de Belgique*, Tome 97, p. 561-564.

Marcigny C., Ghesquière E., Gallouin d'Erik, Gaumé É., Giazzon D., 2003, « Parcellaire et nécropoles de l'Âge du Bronze ancien à Bernières-sur-Mer (Calvados) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 100, 1, p. 117-134.

Marecek T.M., 1976, « Shifting cultivation among the Duna of Papua New Guinea Shifting cultivation among the Duna of Papua New Guinea »,.

Marguerie D., Bernard V., Bégin Y., Terral J.-F., 2010, « Chapitre 12. Dendroanthracologie », dans *La dendroécologie. Principes, méthodes et applications*, p. 311-347.

Marlon J.R., Bartlein P.J., Danialu A.-L., Harrison S.P., Maezumi S.Y., Power M.J., Tinner W., Vannièr B., 2013, « Global biomass burning: a synthesis and review of Holocene paleofire records and their controls », *Quaternary Science Reviews*, 65, p. 5-25.

Marmet E., Aubry L., Best C., 2002, « Mise en évidence de brûlis sur le tracé autoroutier de PA89 (section Ussel-Tulle, Corrèze) en cartographie magnétique et par mesures magnétiques en laboratoire. », *Revue d'Archéométrie*, 26, 1, p. 5-10.

Maroelli D., 2014, « Orny – Sous-Mormont Des sépultures du début du Second âge du Fer au pied de la colline du Mormont », *Archéologie vaudoise*, 2014, p. 44-57.

Martignier L., 2013, *Influence des formations superficielles sur l'évolution des sols du Jura suisse. Origine, composition et transformation du matériel minéral parental*, Thèse de doctorat, CH-1015 Lausanne, Suisse, Université de Lausanne, Faculté des géosciences et de l'environnement.

Martignier L., Nussbaumer M., Adatte T., Gobat J.-M., Verrecchia E.P., 2015, « Assessment of a locally-sourced loess system in Europe: The Swiss Jura Mountains », *Aeolian Research*, 18, p. 11-21.

Martín A., Edo M., Tarrús J., Clop X., 2010, « Le Néolithique ancien de Catalogne (VIe- première moitié du Ve millénaire av. J.-C.) - Les séquences chronoculturelles », dans *Premières sociétés paysannes de Méditerranée occidentale. Structures des productions céramiques*, Paris (FR) (Mémoire LI de la Société Préhistorique française), p. 197-214.

Martin S., 2004, *Caractérisation de l'anthropisation à l'Holocène en Provence et en Languedoc oriental, par les mollusques terrestres*, thesis, Paris 1.

Martineau R., Affolter J., Bodu P., Brenot J., Charpy J.-J., Collin P.-Y., Desmeulles J., Dumontet A., Elliott M., Fronteau G., Imbeaux M., Langry-François F., Lépine G., Maingaud-Traon A., Menbrivès C., Petit C., 2022, « Les complexes miniers néolithiques de la région des Marais de Saint-Gond (Marne). Évaluation des indices d'habitats par sondages », Rapport de projet collectif de recherche 2022.

Martineau R., Affolter J., Bostyn F., Charnot M., Charpy J.-J., Damien T., Depierre G., Devos A., Dufraisse A., Dumontet A., Edinborough K., Fronteau G., Granjon L., Huard P., Imbeaux M., Landreau C., Langry-François F., Lejeune O., Lemoine M., Lenfant P.-E., Lépine G., Pierre G., Polloni A., Walter A.-V., Wattez J., Saligny L., Zajac J.-C., 2018, « Les occupations néolithiques des marais de Saint-Gond. Volume 2. Vert-la-Gravelle (Vert-Toulon, Marne) « La Crayère ». Minière de silex et nécropole d'hypogées », Rapport de fouilles et prospections programmées.

Martineau R., Charpy J.-J., Affolter J., Lambot B., 2014, « Les minières de silex néolithiques des marais de Saint-Gond (Marne) », *Revue archéologique de l'Est*, tome 63, p. 25-45.

Martineau R., Dumontet A., Denaire A., 2020, « L'habitat Villeneuve-Saint-Germain de Villevenard "Les Hauts de Congy" (Marne) », *Bulletin de la Société archéologique champenoise*, 113, 1, p. 61.

Martineau R., Imbeaux M., Affolter J., Charpy J.-J., Bostyn F., Dumontet A., 2019, « The Neolithic Flint Mines of Les Marais de Saint-Gond and La Côte des Blancs (Marne, France) », p. 101.

Martineau R., Langry-François F., Charpy J.-J., Renard C., Maingaud A., Villes A., Polloni A., Magne P., 2020, « L'habitat Néolithique récent du Pré-à-Vaches à Morains-le-Petit (Val-des-Marais, Marne) », dans COTTIAUX R., SALANOVA L. (dirs.), *La fin du IVe millénaire dans le bassin parisien : Le Néolithique récent entre Seine, Oise et Marne (3500-2900 avant notre ère)*, Dijon, ARTEHIS Éditions (Suppléments à la Revue archéologique de l'Est), p. 189-309.

Martínez-Torres H.L., Castillo A., Ramírez M.I., Pérez-Salicrup D.R., 2016, « The importance of the traditional fire knowledge system in a subtropical montane socio-ecosystem in a protected natural area », *International Journal of Wildland Fire*, 25, 9, p. 911-921.

Mataix-Solera J., Cerdà A., Arcenegui V., Jordán A., Zavala L.M., 2011, « Fire effects on soil aggregation: A review. », *Earth-Science Reviews*, 109, 1–2, p. 44-60.

Mathieu C., Lozet J. 2011 *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*, Lavoisier.

Maurel C., 1964, « Types de réactions d'oxydation observés au cours de l'analyse thermique différentielle, dans l'air, de minéraux sulfurés et arséniés de Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag et Pb », *Bulletin de Minéralogie*, 87, 3, p. 377-385.

Mauss M. 1950 *Sociologie et anthropologie*, Éditions PUF, [2013], 540 p.

Mauvilly M., Denaire A., 2015, « La couche 5 de Lutter. Le second Mésolithique et la transition avec le Néolithique dans la zone Jura – Plateau suisse (6300 – 4300 av. J.-C.) », 3, p. 55.

Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karlén W., Maasch K.A., Meeker L.D., Meyerson E.A., Gasse F., Kreveld S. van, Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R., Steig E.J., 2004, « Holocene climate variability », *Quaternary Research*, 62, 3, p. 243-255.

Maynard J.B., 1992, « Chemistry of Modern Soils as a Guide to Interpreting Precambrian Paleosols », *The Journal of Geology*.

Mayoral A., Granai S., Develle A.-L., Peiry J.-L., Miras Y., Couderc F., Vernet G., Berger J.-F., 2020, « Early human impact on soils and hydro-sedimentary systems: Multi-proxy geoarchaeological analyses from La Narse de la Sauvetat (France) », *The Holocene*, 30, 12, p. 1780-1800.

Mayoral A., Vernet G., Voldoire O., Berger J.-F., Miras Y., Defive E., 2021, « Times are changing: A new chronology for Holocene volcanic events and hydro-sedimentary history recorded in the Sarliève marsh (central France) », *Quaternary Science Reviews*, 272, p. 107237.

Maza G., 2022, « Clermont-Ferrand, Aulnat, Lempdes, Pont-Du-Château (63), Projet d'élargissement des pistes de l'Aéroport d'Aulnat-Gandallat (Clermont-Ferrand) », Rapport final d'opération archéologique. Fouille préventive, Éveha.

Mazoyer M., Roudart L. 1997 *Histoire des agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine*, Paris, France, Éd. du Seuil, DL 1997, 533 p.

Mboukou-Kimbatsa I., 1997, *Les macroinvertébrés du sol dans différents systèmes d'agriculture au Congo : cas particulier de deux systèmes traditionnels (écobuage et brûlis) dans la vallée du Niari*, Thèse de doctorat, Bondy, ORSTOM.

McConville C.J., Lee W.E., 2005, « Microstructural Development on Firing Illite and Smectite Clays Compared with that in Kaolinite », *Journal of the American Ceramic Society*, 88, 8, p. 2267-2276.

- McKey D., 2021, « Making the most of grasslands and heathlands », *Revue d'ethnoécologie*, 20.
- Mees F., Stoops G., 2018, « Chapter 13 - Sulphidic and Sulphuric Materials », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 347-376.
- Mégny F., 1977, « Vertus. XXVIII-14. Notice explicative. feuille 188 », dans *Carte Géologique de la France à 1/50 000.*, Editions du BRGM, Orléans, France, p. 24.
- Menbrivès C., Petit C., Elliott M., Eddargach W., Fechner K., 2019, « Feux agricoles, des techniques méconnues des archéologues. L'apport de l'étude archéopédologique des résidus de combustion de Transinne (Belgique) », dans DEAK J., AMPE C., MIKKELSEN J.H. (dirs.), *Soils as records of Past and Present: the geoarchaeological approach. Focus on: is there time for fieldwork today?*, Raakvlak Archaeology, Monuments and Landscapes of Bruges and Hinterland, Belgium, p. 121-139.
- Mendras H., 1976, « Introduction. Qu'est-ce qu'un paysan ? », dans *Sociétés paysannes. Éléments pour une théorie de la paysannerie*, Paris, Armand Colin, p. 9-15.
- Mentzer S.M., 2014, « Microarchaeological Approaches to the Identification and Interpretation of Combustion Features in Prehistoric Archaeological Sites », *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21, 3, p. 616-668.
- Mentzer S.M., 2017, « Hearths and Combustion Features », dans GILBERT A.S. (dir.), *Encyclopedia of Geoarchaeology*, Dordrecht, Springer Netherlands, p. 411-424.
- Mertens K., Tolossa A.R., Verdoodt A., Dumon M., Deckers J., Ranst E.V., 2015, « Impact of traditional soil burning (guie) on Planosol properties and land-use intensification in south-western Ethiopia », *Soil Use and Management*, 31, 2, p. 330-336.
- Mertens K., 2013, « Land use dynamics in the planosol belt of the gilgel gibe catchment, South-West Ethiopia »,.
- Métaillé J.-P., 1978, « Les incendies pastoraux dans les Pyrénées centrales », *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 49, 4, p. 517-526.
- Métaillé J.-P., 1999, « Le feu : un « entre-deux » scientifique et social. », *Montagnes Méditerranéennes*, Écobaue et gestion de l'espace, 10, p. 81-86.
- Métaillé J.-P., Faerber J., 2003, « Quinze années de gestion des feux pastoraux dans les Pyrénées : du blocage à la concertation. », *Sud-Ouest Européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, Pastoralisme et environnement, 16, p. 37-52.
- Meunier A., 2007, « Soil Hydroxy-interlayered minerals: A re-interpretation of their crystallochemical properties », *Clays and Clay Minerals*, 55, 4, p. 380-388.
- Meyer G.A., Wells S.G., 1997, « Fire-related sedimentation events on alluvial fans, Yellowstone National Park, U.S.A. », *Journal of Sedimentary Research*, 67, 5, p. 776-791.
- Meyer G.A., Wells S.G., Timothy Jull A.J., 1995, « Fire and alluvial chronology in Yellowstone National Park: Climatic and intrinsic controls on Holocene geomorphic processes », *GSA Bulletin*, 107, 10, p. 1211-1230.
- Miall A.D., 2022, « The Stratigraphic-Sedimentologic Data Base », dans MIALL A.D. (dir.), *Stratigraphy: A Modern Synthesis*, Cham, Springer International Publishing (Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment), p. 43-89.

Miallier D., Boivin P., Deniel C., Gourgaud A., Lanos P., Sforza M., Pilleyre T., 2010, « The ultimate summit eruption of Puy de Dôme volcano (Chaîne des Puys, French Massif Central) about 10,700 years ago », *Comptes Rendus Geoscience*, 342, 11, p. 847-854.

Miallier D., Michon L., Évin J., Pilleyre T., Sanzelle S., Vernet G., 2004, « Volcans de la chaîne des Puys (Massif central, France) : point sur la chronologie Vasset–Kilian–Pariou–Chopine », *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 15, p. 1345-1353.

Miallier D., Pilleyre T., Sanzelle S., Boivin P., Lanos P., 2012, « Revised chronology of the youngest volcanoes of the chaîne des puys (french Massif central) », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 23/4, p. 283-290.

Michalet R., Bruckert S., 1986, « La podzolisation sur calcaire du subalpin du Jura », *La podzolisation sur calcaire du subalpin du Jura*, 24, 4, p. 363-375.

Michalet R., Guillet B., Souchier B., 1993, « Hematite Identification in Pseudo-Particles of Moroccan Rubified Soils », *Clay Minerals*, 28, 2, p. 233-242.

Michellon R., Moussa N., Rakotoniaina F., Andrianasolo H.M., Fara Hanitriniaina J.C., Ravelomanarivo A., Ravonison L.N., Razakamiamanana, 2002, « Amélioration de la fertilité par écobuage : influence de la fréquence et de l'intensité de la combustion selon le type de sols de tanety. », Fiche d'essai, 1, CIRAD/TAFA/FOFIFA.

Michellon R., Razakamiamanana, Randriamanantsoa R., Séguy L., 2001, « Developing sustainable cropping systems with minimal inputs in Madagascar: direct seeding on plant cover with “soil smouldering” (écobuage) techniques. »,.

Michon G., 2000, « Ni ager, ni hortus : la forêt dans tous ses états. Quelques réflexions sur les relations sociétés/forêts inspirées par Jacques Barrau », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 42, 1, p. 187-206.

Mikkelsen J., Langohr R., 1996, « A pedological characterisation of the Aubechies soil, a well preserved soil sequence dated to the earliest Neolithic agriculture in Belgium », *13th International congress on Prehistoric and Protohistoric Sciences*, 3, p. 143-149.

Milisauskas S., 2001, « Linear Pottery », dans PEREGRINE P.N., EMBER M. (dirs.), *Encyclopedia of Prehistory: Volume 4: Europe*, Boston, MA, Springer US, p. 191-197.

Milisauskas S., 2011, « Early Neolithic, the First Farmers in Europe, 7000–5500/5000 BC », dans MILISAUSKAS S. (dir.), *European Prehistory: A Survey*, New York, NY, Springer (Interdisciplinary Contributions to Archaeology), p. 153-221.

Miras Y., Vergne V., Guenet P., Surmely F., 2004, « Le Massif central : premières traces d'anthropisation révélées par l'analyse pollinique des zones humides corrélées aux données archéologiques », *Néolithisation précoce: premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques*, p. 89-106.

Mirti P., 1998, « On the Use of Colour Coordinates to Evaluate Firing Temperatures of Ancient Pottery* », *Archaeometry*, 40, 1, p. 45-57.

Mirti P., Davit P., 2004, « New developments in the study of ancient pottery by colour measurement », *Journal of Archaeological Science*, 31, 6, p. 741-751.

Mitchell F.J.G., 2005, « How open were European primeval forests? Hypothesis testing using palaeoecological data », *Journal of Ecology*, 93, 1, p. 168-177.

- Mitsuchi M., 1974, « Chloritization in lowland paddy soils », *Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 2, p. 107-116.
- Mizota C., Toh N., Matsuhisa Y., 1987, « Origin of cristobalite in soils derived from volcanic ash in temperate and tropical regions », *Geoderma*, 39, 4, p. 323-330.
- Molinari C., Lehsten V., Bradshaw R.H.W., Power M.J., Harmand P., Arneith A., Kaplan J.O., Vannièrè B., Sykes M.T., 2013, « Exploring potential drivers of European biomass burning over the Holocene: a data-model analysis », *Global Ecology and Biogeography*, 22, 12, p. 1248-1260.
- Molinari C., Montanari C., 2016, « Interdisciplinary approach for reconstructing an alder-based historical agricultural practice of the Eastern Ligurian Apennines (NW Italy) », *Environmental Archaeology*, 21, 1, p. 31-44.
- Mollison J.W. 1901 *A Text-book on Indian Agriculture. Volume I: soils, Manures, Implements*, Bombay, Published at the expense of the Bombay government. Printed at the « Advocate of India » steam press, 173 p.
- Monger H.C., Kelly E.F., 2002, « Silica Minerals », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 611-636.
- Montagne D., Cousin I., Cornu S., 2013, « Dégénération morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques », *Etude et Gestion des Sols*, 20, 2, p. 137-149.
- Montagne D., Cousin I., Josière O., Cornu S., 2013, « Agricultural drainage-induced Albeluvisol evolution: A source of deterministic chaos », *Geoderma*, 193-194, p. 109-116.
- Montelius S., 1953, « The Burning of Forest Land for the Cultivation of Crops. "Svedjebruk" in Central Sweden », *Geografiska Annaler*, 35, 1, p. 41-54.
- Moody J.A., Shakesby R.A., Robichaud P.R., Cannon S.H., Martin D.A., 2013, « Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes », *Earth-Science Reviews*, 122, p. 10-37.
- Moreau R., Nzila J. de D., Nyete B., 1998, « La pratique de l'écobuage maala et ses conséquences sur l'état du sol au Congo », *Actes du 16ème Congrès Mondial de la Science du Sol*, p. 11.
- Moreno D., Cevasco R., Bertolotto S., Poggi G., 1998, « Historical ecology and post-medieval management practices in alderwoods (*Alnus incana* (L.) Moench) in the Northern Apennines, Italy. », *Historical ecology and post-medieval management practices in alderwoods (Alnus incana (L.) Moench) in the Northern Apennines, Italy.*, p. 185-202.
- Moreno D., Poggi G., 1998, « Identification des pratiques agro-sylvo-pastorales et des savoirs naturalistes locaux : mise à contribution de l'écologie historique des sites » ROUSSELLE A. (dir.), *Monde rural et histoire des sciences en Méditerranée : Du bon sens à la logique*, p. 151-163.
- Morlon P., 2012a, « Repos et fatigue des terres », *Les mots de l'agronomie. Histoire et critique*.
- Morlon P., 2012b, « Friche, défricher », *Les mots de l'agronomie. Histoire et critique*.
- Morlon P., Sigaut F., 2022, « Travail du sol », *Les mots de l'agronomie. Histoire et critique*.
- Morrison K.D., Feinman G.M., Nicholas L.M., Ladefoged T.N., Myrdal-Runebjer E., Stone G.D., Wilk R., 1996, « Typological Schemes and Agricultural Change: Beyond Boserup in Precolonial South India [and Comments and Reply] », *Current Anthropology*, 37, 4, p. 583-608.

Mouchet P., 1995, *Le Kimmeridgien du Jura central: microfaciès, minéralogie et interprétation séquentielle*, PhD Thesis, Université de Neuchâtel.

Mouthon F., 2007, « L'essartage dans les Alpes occidentales au prisme des sources écrites du bas Moyen Âge », dans DURAND A. (dir.), *Plantes exploitées, plantes cultivées. Cultures techniques et discours. Études offertes à Georges COMET, Cahier d'histoire des techniques*, Aix-En Provence, Université de Provence, p. 109-126.

Mücher H., Steijn H. van, Kwaad F., 2018, « Chapter 2 - Colluvial and Mass Wasting Deposits », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 21-36.

Muhs D.R., 2014, « The Contributions of Donald Lee Johnson to Understanding the Quaternary Geologic and Biogeographic History of the California Channel Islands », *Monographs of the Western North American Naturalist*, 7, 1, p. 1-20.

Müller-Pelletier C., 2007, « Les Martres-de-Veyre – Rue du Lot (parcelle ZD148p) », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.

Muller-Pelletier C., Georjon C., Alix P., Pasty J.-F., Pelletier D., 2013, « Un vaste établissement chasséen aux Queyriaux (Courmon-d'Auvergne, Puy-de-Dôme) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 110, 2, p. 360-363.

Mullins C.E., 1977, « Magnetic Susceptibility of the Soil and Its Significance in Soil Science – a Review », *Journal of Soil Science*, 28, 2, p. 223-246.

Murat R., Alix P., Cabanis M., Combes P., Jallet F., Pasty J.-F., Vernet G., 2003, « Combronde (Puy-de-Dôme): Sous-le-Coudert 1 », Rapport de fouilles, 71 03 0501 01, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Murdock G.P., Textor R., Barry III H., White D.R., Gray J.P., Divale W.T. 1999 *Ethnographic Atlas. World Cultures*.

Musy A., Soutter M. 1991 *Physique du sol*, PPUR presses polytechniques.

Myllyntaus T., Hares M., Kunnas J., 2002, « Sustainability in Danger?: Slash-and-Burn Cultivation in Nineteenth-Century Finland and Twentieth-Century Southeast Asia », *Environmental History*, 7, 2, p. 267-302.

Nanzyo M., Shoji S., Dahlgren R., 1993, « Physical characteristics of volcanic ash soils », dans *Developments in soil science*, Elsevier, p. 189-207.

Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F., 1999, « Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis », *Forest Ecology and Management*, 122, 1–2, p. 51-71.

Neary D.G., Ryan K.C., DeBano L.F., 2005, « Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water », *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p.*, 42.

Nesbitt H.W., Markovics G., price R.C., 1980, « Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 11, p. 1659-1666.

Nicolaï H. 1961 *Luozi : Géographie régionale d'un pays du Bas-Congo*, Gembloux, Bruxelles, Belgique, J. Duculot, Académie royale des Sciences d'Outre-Mer, Classe des sciences naturelles et médicales, 95 et annexes p.

- Nicosia C., 2008, « Micromorphology of some Phosphatic Inclusions and Neoformations of Occurring in Archeological Deposits », *Frankfurter geowiss. Arbeiten*, 30, p. 85-94.
- Nicosia C., Canti M.G., 2017, « Chaff », dans NICOSIA C., STOOPS G. (dirs.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 137-139.
- Nicosia C., Stoops G. 2017 *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley&Sons Ltd.
- Nielsen B.O., 1989, « House fly puparia (*Musca domestica* L.) from a Neolithic field in Thayngen-Weier, Switzerland », *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft*, 62, 1, p. 5-8.
- Nillesse O., Buchsenschutz O., 2007, « Les faux et la datation de l'outillage agricole des dépôts de l'âge du Fer », *Les faux et la datation de l'outillage agricole des dépôts de l'âge du Fer*, 43, p. 157-165.
- Nishita H., Haug R.M., 1972, « Some physical and chemical characteristics of heated soils », *Soil Science*, 113, 6, p. 422-430.
- Noirfalise A., Thill A., 1960, « Les taillis sartés de l'Ardenne », *Comptes-rendus de la Réunion technique de l'U.I.C.N.*, 2, p. 364-370.
- Norrish K., Taylor R.M., 1961, « The Isomorphous Replacement of Iron by Aluminium in Soil Goethites », *Journal of Soil Science*, 12, 2, p. 294-306.
- Nzila J. de D. 1992 *La pratique de l'écobuage dans la vallée du Niari (Congo) : ses conséquences sur l'évolution d'un sol ferrallitique acide*, Montpellier, ORSTOM.
- Nzila J. de D., 2017, « Chapitre 10. Influences de l'écobuage sur la restauration de la productivité des sols argileux acides de la vallée du Niari (Congo RDC) », dans ROOSE É. (dir.), *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : Contribution à l'agroécologie*, Marseille, IRD Éditions (Synthèses), p. 141-149.
- Ohlson M., Tryterud E., 2000, « Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. », *The Holocene*, 10, 4, p. 519-525.
- Olarieta J.R., Padrò R., Masip G., Rodríguez-Ochoa R., Tello E., 2011, « 'Formiguers', a historical system of soil fertilization (and biochar production?) », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140, 1, p. 27-33.
- Oris F., Ali A.A., Asselin H., Paradis L., Bergeron Y., Finsinger W., 2014, « Charcoal dispersion and deposition in boreal lakes from 3 years of monitoring: Differences between local and regional fires », *Geophysical Research Letters*, 41, 19, p. 2014GL060984.
- Orr P.C., Berger R., 1966, « The fire areas on santa rosa island, california* », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 56, 5, p. 1409-1416.
- Out W.A., 2008, « Gathered food plants at Dutch Mesolithic and Neolithic wetland sites », *Food and drink in archaeology*, 1, p. 84-95.
- Out W.A., 2009, « Reaction to "Cereal Cultivation at Swifterbant? Neolithic Wetland Farming on the North European Plain" », *Current Anthropology*, 50, 2, p. 253-254.
- Ouzoulias P., 2006, *L'économie agraire de la Gaule: aperçus historiographiques et perspectives archéologiques*, Thèse de doctorat en Archéologie, France, Université de Franche-Comté. École doctorale Langages, espaces, temps, sociétés, 250+87 p.

- Owen G., 2003, « Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface », *Geological Society, London, Special Publications*, 216, 1, p. 21-34.
- Owen G., Moretti M., Alfaro P., 2011, « Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions », *Sedimentary Geology*, 235, 3, p. 133-140.
- Pailhé N., Wattiaux A., Gaudon M., Demourgues A., 2008, « Impact of structural features on pigment properties of α -Fe₂O₃ haematite », *Journal of Solid State Chemistry*, 181, 10, p. 2697-2704.
- Pansu M., Gautheyrou J. 2006 *Handbook of soil analysis; mineralogical, organic and inorganic methods.*, Federal Republic of Germany, Springer-Verlag : Berlin, Federal Republic of Germany, 993 p.
- Pape J.C., 1970, « Plaggen soils in the Netherlands », *Geoderma*, 4, 3, p. 229-255.
- Papy F., 1987, « Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural », *Agronomie*, 7, 2, p. 111-121.
- Papy F., 2013, « Système de culture », *Les mots de l'agronomie. Histoire et critique.*
- Paradis-Grenouillet S., 2012, *Etudier les « forêts métallurgiques » : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. Exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin*, Thèse de doctorat : géographie, Limoges, Université de Limoges, 452 p.
- Parent D., 2016, « Pont-du-Château (Puy-de-Dôme) : Avenue de Cournon », Rapport de diagnostic, D113849, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Parr J.F., 2006, « Effect of fire on phytolith coloration », *Geoarchaeology*, 21, 2, p. 171-185.
- Parra J.G., Rivero V.C., Lopez T.I., 1996, « Forms of Mn in soils affected by a forest fire », *Science of The Total Environment*, 181, 3, p. 231-236.
- Parsons A., Robichaud P.R., Lewis S.A., Napper C., Clark J.T., 2010, « Field guide for mapping post-fire soil burn severity », General Technical Report RMRS-GTR-243, Fort Collins, CO 80526, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Party J.-P., Rigou L., Vauthier Q., Muller N., 2017, « Base de données du Référentiel Régional Pédologique du département de la Marne à 1/250 000 », Sol Conseil et ASUP (Atelier Sols, Urbanisme et Paysages).
- Pasquier D., 2023, « Clermont-Ferrand – 161 avenue du Brézet », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia.*
- Pastor E., Pérez Y., Agueda A., Miralles M., Planas E., 2010, « Pile burning of cutting debris in stands of hazel (*Corylus avellana*): An experimental study of smouldering combustion towards the validation of a burning protocol », *Fire Safety Journal*, 45, 1, p. 69-81.
- Pasty J.-F., 2009, « Gerzat (Puy-de-Dôme) : Le Marterol », Rapport de diagnostic, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Pasty J.-F., Alix P., Ballut C., Murat R., Parent D., 2001, « Les Martres-d'Artière (Puy-de-Dôme) : Le gisement de Champ Chalatras : Etude des occupations épipaléolithiques », Document final de synthèse d'opération d'archéologie préventive, 700333801, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.

Pasty J.-F., Alix P., Pelletier D., Combes P., 2011, « Approche économique et spatiale du campement azilien des Varennes à Pérignat-sur-Allier (Puy-de-Dôme) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 108, 1, p. 53-72.

Pasty J.-F., Bémilli C., Cabanis M., Laroulandie V., Linton J., Mallye J.-B., Vernet G., 2015, « Lempdes (Puy-de-Dôme) : Les Gargailles. Une occupation azilienne en bordure de Limagne d’Auvergne », Rapport de fouilles, F103058, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Pasty J.-F., Jallet F., Griggo C., Cabanis M., Alix P., Ballut C., Murat R., 2008, « Découverte d’un site chasséen à Champ-Chalattras (les Martres d’Artière, Puy-de-Dôme, France) », *L’Anthropologie*, 112, 4, p. 598-640.

Pédro G., 1979a, « Chapitre III. Les minéraux argileux », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 38-57.

Pédro G., 1979b, « Chapitre IV. Les conditions de formation des constituants secondaires », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 58-72.

Pelletier D., 2007, « Pont-du-Château – Champ Lamet-Chambussières, site néolithique », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.

Pelletier D., Muller-Pelletier C., Alix P., Combes P., Cabanis M., 2006, « Cournon-d’Auvergne (Puy-de-Dôme) : ZAC des Acilloux : Le site 1 : une concentration de structures de combustion à pierres chauffées du Néolithique moyen I », Rapport de fouilles, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Penman T.D., Lemckert F.L., Mahony M.J., 2006, « A preliminary investigation into the potential impacts of fire on a forest dependent burrowing frog species », *Pacific Conservation Biology*, 12, 1, p. 78-83.

Penman T.D., Towerton A.L., 2008, « Soil temperatures during autumn prescribed burning: implications for the germination of fire responsive species? », *International Journal of Wildland Fire*, 17, 5, p. 572-578.

Pereira P., Úbeda X., Martin D.A., 2012, « Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements », *Geoderma*, 191, p. 105-114.

Perlès C. 1977 *Préhistoire du feu*, Masson, 180 p.

Pernot M., Frerebeau N., 2018, « Dans la chaleur des fours : que restituer des pratiques des céramistes des sociétés anciennes ? », *ArcheoSciences*, n° 42-2, 2, p. 95-105.

Perrin T., 2018, « Nomades ou sédentaires: les multiples voies des chasseurs-cueilleurs », dans *Une histoire des civilisations. Comment l’archéologie bouleverse nos connaissances*, La Découverte, INRAP, p. 237-242.

Pesenti C., 2016, « Le site des Terres Soudées à Thillois (Marne) : habitats et structures souterraines du village du Mont-Saint-Pierre entre le XIIe et le XVIIe siècle », *Revue archéologique de l’Est*, tome 65.

Peterson K.M., Heaney P.J., Post J.E., Eng P.J., 2015, « A refined monoclinic structure for a variety of “hydrohematite” », *American Mineralogist*, 100, 2-3, p. 570-579.

Petit C., 2006, *Géoarchéologie et anthropisation de l’environnement*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bourgogne, 147 p.

Petit S., Watkins C., 2004, « Pratiques paysannes oubliées », *Études rurales*, 169-170, p. 197-214.

Pétrequin A.-M., Croutsch C., Pétrequin P., 1996, « Marigny – Les Vernois II », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.

Pétrequin A.-M., Pétrequin P., 1997, « 13. L'architecture comme marqueur de l'environnement social, des modes de faire-valoir et des milieux naturels transformés », dans *Les Sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs et de Chalain (Jura). Tome III. Chalain station 3. 3200-2900 av. J.-C.*, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme Paris, p. 137-142.

Pétrequin P., 1992, « Le lac de Chalain (Jura) et la structuration d'un terroir du Néolithique à l'âge du Fer » MORDANT C., RICHARD A. (dirs.), *Actes du colloque international de Lons-le-Saunier, 16-19 mai 1990*, p. 227-257.

Pétrequin P. 1997 *Les Sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs et de Chalain (Jura). Tome III. Chalain station 3. 3200-2900 av. J.-C.*, Les Editions de la MSH.

Pétrequin P., Arbogast R., Bourquin-Mignot C., Lavier C., Viellet A., 1998, « Demographic growth, environmental changes and technical adaptations: Responses of an agricultural community from the 32nd to the 30th centuries BC », *World Archaeology*, 30, 2, p. 181-192.

Pétrequin P., Croutsch C., Lopinet P., Pétrequin A.-M., Visseyrias A., 2000, « Chalain 2000. Quatre millénaires d'habitat lacustre mis en question », Besançon et Doucier, Laboratoire de Chrono-Ecologie, Unité de Formation de la Recherche (UFR) des Sciences et le Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain.

Pétrequin P., Lobert G., Maitre A., Monnier J.-L., 2006, « Les outils à moissonner et la question de l'introduction de l'araire dans le Jura (France) », *Premier chariots, premiers araires. La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IVe et IIIe millénaires avant notre ère*, p. 107-120.

Pétrequin P., Magny M., Bailly M., 2005, « Habitat lacustre, densité de population et climat. L'exemple du Jura français », *Wes*, 4, p. 143-168.

Pétrequin P., Martineau R., Nowicki P., Gauthier E., Schaal C., 2009, « La poterie Hoguelette de Choisey (Jura), les Champins. Observations techniques et insertion régionale », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 106, 3, p. 491-515.

Pétrequin P., Pétrequin A.-M. 1993 *Écologie d'un outil : la hache de pierre en Irian Jaya (Indonésie)*, CNRS Éditions, [2000], 461 p.

Pétrequin P., Pétrequin A.-M. 2021 *La Préhistoire du Jura et l'Europe néolithique en 100 mots-clés*, Presses universitaires de Franche-Comté, CRAVA, 1938 p.

Pétrequin P., Pétrequin A.-M., Schaal C., 2016, « Introduction : rythme d'occupation des villages et agriculture céréalière », dans PETREQUIN P., PETREQUIN A.-M. (dirs.), *Clairvaux et le « Néolithique Moyen Bourguignon »*, p. 1129-1150.

Pias J. 1962 *Les sols du Moyen et Bas Logone, du Bas Chari, des régions riveraines du lac Tchad et du Bahr el Ghazal*, ORSTOM.

Picon M., 2002, « Les modes de cuisson, les pâtes et les vernis de la Graufesenque: une mise au point », *Céramiques de la Graufesenque et autres productions d'époque romaine. Nouvelles recherches. Hommages à Bettina Hoffman*. Montagnac: Éditions Monique Mergoil, p. 139-164.

Pierce J., Meyer G., Pierce J., Meyer G., 2008, « Long-term fire history from alluvial fan sediments: the role of drought and climate variability, and implications for management of Rocky Mountain forests », *International Journal of Wildland Fire*, 17, 1, p. 84-95.

Pigati J.SIÈCLE, McGeehin J.P., Skipp G.L., Muhs D.R., 2014, « Evidence of repeated wildfires prior to human occupation on San Nicolas Island, California », *Monographs of the Western North American Naturalist*, 7, 1, p. 35-47.

Piperno D.R. 2006 *Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*, Rowman Altamira.

Plaisance G., 1962, « La toponymie des défrichements et des déboisements », *Revue Géographique de l'Est*, 2, 3, p. 221-232.

Pochon M., 1975, « Évolution de la phase alumino-silicatée des sols sous climat tempéré humide du Haut-Jura suisse (domaine calcaire) », *Bulletin du Groupe français des Argiles*, 27, 1, p. 69-85.

Pochon M. 1978 *Origine et evolution des sols du Haute-Jura Suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide*, Zürich, Komm. Gebrüder Fretz.

Poirier N., Nuninger L., 2012, « Techniques d'amendement agraire et témoins matériels. », *Histoire & Sociétés Rurales*, Vol. 38, 2, p. 11-50.

Ponomarenko E., Tomson P., Ershova E., Bakumenko V., 2019, « A multi-proxy analysis of sandy soils in historical slash-and-burn sites: A case study from southern Estonia », *Quaternary International*, 516, p. 190-206.

Portères R., 1972, « De l'écobuage comme un système mixte de culture et de production. », *Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée*, 19, 6, p. 151-207.

Pouenat P., 2006, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : Le Clos Brûlé : ZAC du Parc industriel des Gravanches (secteur Ouest) », Rapport de diagnostic, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

Poulenard J., 2011, *Des empreintes pédologiques dans les bassins versants et les archives naturelles.*, thesis, Université de Savoie.

Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.-L., Collinet J., 2001, « Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning », *CATENA*, 45, 3, p. 185-207.

Pousaz N., Guélat M., Frei Paroz L., Piuze Loubier V. 2009 *Delémont -En La Pran (Jura, Suisse) 1. Environnement alluvial et premières installations humaines entre Mésoolithique récent et âge du Bronze*, Porrentruy, Office de la culture et Société jurassienne d'Emulation, 256 p.

Power M.J., Marlon J., Ortiz N., Bartlein P.J., Harrison S.P., Mayle F.E., Ballouche A., Bradshaw R.H.W., Carcaillet C., Cordova C., Mooney S., Moreno P.I., Prentice I.C., Thonicke K., Tinner W., Whitlock C., Zhang Y., Zhao Y., Ali A.A., Anderson R.S., Beer R., Behling H., Briles C., Brown K.J., Brunelle A., Bush M., Camill P., Chu G.Q., Clark J., Colombaroli D., Connor S., Daniau A.-L., Daniels M., Dodson J., Doughty E., Edwards M.E., Finsinger W., Foster D., Frechette J., Gaillard M.-J., Gavin D.G., Gobet E., Haberle S., Hallett D.J., Higuera P., Hope G., Horn S., Inoue J., Kaltenrieder P., Kennedy L., Kong Z.C., Larsen C., Long C.J., Lynch J., Lynch E.A., McGlone M., Meeks S., Mensing S., Meyer G., Minckley T., Mohr J., Nelson D.M., New J., Newnham R., Noti R., Oswald W., Pierce J., Richard P.J.H., Rowe C., Goñi M.F.S., Shuman B.N., Takahara H., Toney J., Turney C., Urrego-Sanchez D.H., Umbanhowar C., Vandergoes M., Vannièrre B., Vescovi E., Walsh M., Wang X., Williams N., Wilmshurst J., Zhang J.H., 2008, « Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data », *Climate Dynamics*, 30, 7-8, p. 887-907.

- Prache S., Peyraud J.-L.J.-L., 1997, « Préhensibilité de l'herbe pâturée chez les bovins et les ovins », *Productions Animales*, 10, 5, p. 377.
- Prat B., Mennessier-Jouannet C., 2003, « Palynologie et archéologie en Limagne des marais, difficultés et méthodes : l'exemple de Saint-Beauzire. » MENNESSIER-JOUANNET C. D.Y. (dir.), *Palynologie et archéologie en Limagne des marais, difficultés et méthodes : l'exemple de Saint-Beauzire.*, p. 417-424.
- Praud I., Martial E., 2015, « Chapitre 6. Synthèse générale », dans *Le Néolithique final dans la vallée de la Deûle. Le site d'Houplin-Ancoisne le Marais de Santes*, CNRS Éditions (Recherches archéologiques), p. 305-315.
- Prodéo F., Ballarin C., Marembert F., Massan P., 2007, « Pineuilh (33) «La Mothe» », RFO de fouille archéologique, 41 02 0036 01, Pessac, INRAP Grand Sud-Ouest.
- Prodéo F., Saintot S., Pétrequin P., 1995, « Marigny – Les Vernois », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.
- Prokop P., Kruczkowska B., Syiemlied H.J., Bucala-Hrabia A., 2018, « Impact of topography and sedentary swidden cultivation on soils in the hilly uplands of North-East India », *Land Degradation & Development*, 29, 8, p. 2760-2770.
- Prost D., 2013, « Le locus mésolithique de Muids «Le Gorgeon-des-Rues» (Eure) », *Revue archéologique de l'Ouest*, 30, p. 37-55.
- Püschln L., Koch W., 1990, « The Significance of Soil Burning (“Guie”) in Ethiopia with Special Regard to its Effects on the Agrestal Weed Flora », *Journal of Agronomy and Crop Science*, 164, 4, p. 254-261.
- Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D. 1996 *Introduction to Wildland Fire*, John Wiley & Sons, Second edition.
- Quantin P., 1972, « Les andosols : revue bibliographique des connaissances actuelles », *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 10, 3, p. 273-301.
- Quantin P., 2004, « Volcanic soils of France », *CATENA*, 56, 1, p. 95-109.
- Raab T., Hirsch F., Ouimet W., Johnson K.M., Dethier D., Raab A., 2017, « Architecture of relict charcoal hearths in northwestern Connecticut, USA », *Geoarchaeology*, 32, 4, p. 502-510.
- Rab M.A., 1996, « Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia », *Forest Ecology and Management*, 84, 1–3, p. 159-176.
- Rackham O., Stefano P. di, 1982, « Boschi E Storia Dei Sistemi Silvo-Pastorali in Inghilterra », *Quaderni storici*, 17, 49 (1), p. 16-48.
- Raison R.J., 1979, « Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: A review. », *Plant and Soil*, 51, 1, p. 73-108.
- Raison R.J., Khanna P.K., Woods P.V., 1985, « Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires », *Canadian Journal of Forest Research*, 15, 1, p. 132-140.
- Raison R.J., Woods P.V., Jakobsen B.F., Bary G. a. V., 1986, « Soil temperatures during and following low-intensity prescribed burning in a Eucalyptus pauciflora forest », *Soil Research*, 24, 1, p. 33-47.

- Rameau J.-C., 1999, « Accrus, successions végétales et modèles de dynamique linéaire forestière », *Ingénieries - Eau, Agriculture, Territoires*, Boisements naturels des espaces agricoles, n°spécial, p. 33-48.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G., Timbal J., Lecoïnte A., Dupont P., Keller R. 1989 *Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 1. Plaines et collines*, Paris, Institut pour le Développement forestier, 1785 p.
- Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G., Gauberville C., Bardat J., Bruno É., Keller R. 2008 *Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 3. Région méditerranéenne*, Paris, France, Institut pour le Développement forestier, 2426 p.
- Rasmussen P., 1989, « Leaf-foddering of Livestock in the Neolithic: Archaeobotanical Evidence from Weier, Switzerland », *Journal of Danish Archaeology*, 8, 1, p. 51-71.
- Rasmussen P., 1990, « Pollarding of trees in the Neolithic: often presumed—difficult to prove », *Experimentation and reconstruction in environmental archaeology*, p. 77-99.
- Raynal J.-P., Vernet G., Daugas J.-P., 2003, « Évolution récente de la Limagne d’Auvergne (France) : impacts du volcanisme et aspects des peuplements humains au Tardiglaciaire et à l’Holocène. », *Variazioni climatico-ambientali e impatto sull’uomo nell’area circum-mediterranea durante l’Olocene, Territorio storico et ambiente 3*, C. Albore-Livadie e F. Ortolani ed, p. 461-475.
- Raynal J.-P., Vernet G., Fain J., Miallier D., Montret-Brugerolle M., Pilleyre T., Sanzelle S., Daugas J.-P., 1994, « Téphrostratigraphie et Préhistoire des 160 derniers millénaires en Limagne d’Auvergne (Massif Central, France) », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 91, 2, p. 149-160.
- Raynal J.-P., Vernet G., Vivent D., 1998, « Des volcans et des hommes depuis le dernier interglaciaire en Basse Auvergne (Massif Central, France) », *Territorio storico ed ambiente I. Il sistema uomo-ambiente tra passato e presente. A cura di Claude Albore-Livadie e Franco ortolani*, p. 197.
- Reid-Soukup D.A., Ulery A.L., 2002, « Smectites », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 467-499.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey C.B., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., Plicht J. van der, Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S., 2020, « The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) », *Radiocarbon*, 62, 4, p. 725-757.
- Rein G., 2009, « Smouldering Combustion Phenomena in Science and Technology »,.
- Rein G., 2013, « Smouldering Fires and Natural Fuels », dans *Fire Phenomena and the Earth System*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 15-33.
- Renard J., 2016, *Caractérisation d’un niveau KTH (Kultureller Trocken Horizont) dans la tourbière d’Andelot-en-Montagne (39)*, Mémoire de stage d’Étude et de Recherche, Besançon, Université de Franche-Comté (UFC).
- Restuccia F., Huang X., Rein G., 2017, « Self-ignition of natural fuels: Can wildfires of carbon-rich soil start by self-heating? », *Fire Safety Journal*, 91, p. 828-834.

- Retallack G.J., 2001, « Soil-Forming Processes », dans *Soils of the Past*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 37-62.
- Revel J.-C., 1991, « Pédologie et archéologie », dans *Pour une archéologie agraire. A la croisée des sciences de l'homme et de la nature*, Paris, Armand Colin, p. 323-343.
- Reynard-Callanan J.R., Pope G.A., Goring M.L., Feng H., 2010, « Effects of High-Intensity Forest Fires on Soil Clay Mineralogy », *Physical Geography*, 31, 5, p. 407-422.
- Reynolds P.J., 1977, « Slash and Burn Experiment », *Archaeological Journal*, 134, 1, p. 307-318.
- Ribet N., 2005, « La maîtrise du feu: un travail en creux qui façonne les paysages », *Le Travail et les hommes: actes du 127e congrès du CTHS, Paris, CTHS*.
- Ribet N., 2009, *Les parcours du feu. Techniques de brûlage à feu courant et socialisation de la nature dans les Monts d'Auvergne et les Pyrénées centrales.*, Thèse de doctorat : anthropologie sociale et ethnologie, Paris, École des Hautes Études en Sciences Sociales, 649 p.
- Ribet N., 2011a, « Enjeux de connaissance et de reconnaissance des compétences techniques du brûlage à feu courant », *Forêt Méditerranéenne*, Tome XXXII, 3, p. 277-290.
- Ribet N., 2011b, « Des plantes pour donner le biais au feu », *Actes du neuvième séminaire de Salagon*, p. 87-110.
- Rich C.I., 1968, « Hydroxy Interlayers in Expansible Layer Silicates », *Clays and Clay Minerals*, 16, 1, p. 15-30.
- Richard H., 1997, « 9. Analyse pollinique d'un sondage de 7 ,50 m », dans *Les Sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs et de Chalain (Jura). Tome III. Chalain station 3. 3200-2900 av. J.-C.*, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme Paris, p. 101-112.
- Richard H., 1999, « La palynologie », dans *La botanique*, Éditions Errance, Paris (Collection Archéologiques), p. 9-42.
- Richard H. 2004 *Néolithisation précoce: premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques*, Presses Universitaires Franc-Comtoises.
- Richard H., 2017, « Approche palynologique du site de Pagny-sur-Moselle, 54 », Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249).
- Richard H., Ruffaldi P., 2004, « Premières traces polliniques d'influence de l'homme sur le couvert végétal de l'Est de la France » RICHARD H. (dir.), *Néolithisation précoce: premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques*, 777.
- Rick T.C., Erlandson J.M., Vellanoweth R.L., 2006, « Taphonomy and site formation on California's Channel Islands », *Geoarchaeology*, 21, 6, p. 567-589.
- Rick T.C., Wah J.S., Erlandson J.M., 2012, « Re-evaluating the origins of late Pleistocene fire areas on Santa Rosa Island, California, USA », *Quaternary Research*, 78, 2, p. 353-362.
- Rickard D., 2019, « Sedimentary pyrite framboid size-frequency distributions: A meta-analysis », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 522, p. 62-75.
- Ringelmann M. (1861-1931) A. du texte 1930 *Génie rural appliqué aux colonies : cours professé à l'Institut national d'agronomie coloniale (2e édition, revue et augmentée) / par Max Ringelmann...*

- Rios R., Gade D.W., 1972, « Chaquitacla, the Native Footplough and its Persistence in Central Andean Agriculture », *Tools Tillage*, 2, 1, p. 3-15.
- Rius D., Vannière B., Galop D., 2009, « Fire frequency and landscape management in the northwestern Pyrenean piedmont, France, since the early Neolithic (8000 cal. BP) », *The Holocene*, 19, 6, p. 847-859.
- Robert M., Trocmé S., 1979, « Chapitre XXII. Le Potassium », dans *Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Masson, p. 379-385.
- Robin V., Knapp H., Bork H.-R., Nelle O., 2013, « Complementary use of pedoanthracology and peat macro-charcoal analysis for fire history assessment: Illustration from Central Germany », *Pedoanthracology and Environmental Studies*, 289, 0, p. 78-87.
- Robin V., Nelle O., Talon B., Poschlod P., Schwartz D., Bal M.-C., Allée P., Vernet J.-L., Dutoit T., 2018, « A comparative review of soil charcoal data: Spatiotemporal patterns of origin and long-term dynamics of Western European nutrient-poor grasslands », *The Holocene*, p. 0959683618771496.
- Robin V., Talon B., Nelle O., 2015, « Charcoal: Resource and ubiquitous proxy », *Quaternary International*, 366, p. 1-2.
- Robinson D., 1983, « Possible Mesolithic activity in the west of Arran: evidence from peat deposits », *Glasgow Archaeological Journal*, 10, 10, p. 1-6.
- Rodrigues L., Sprafke T., Bokotola Moyikola C., Barthès B.G., Bertrand I., Comptour M., Rostain S., Yoka J., McKey D., 2020, « A Congo Basin ethnographic analogue of pre-Columbian Amazonian raised fields shows the ephemeral legacy of organic matter management », *Scientific Reports*, 10, 1, p. 10851.
- Roebroeks W., MacDonald K., Scherjon F., Bakels C., Kindler L., Nikulina A., Pop E., Gaudzinski-Windheuser S., 2021, « Landscape modification by Last Interglacial Neanderthals », *Science Advances*, 7, 51, p. eabj5567.
- Roebroeks W., Villa P., 2011, « On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 13, p. 5209-5214.
- Roorda T.M.M., 1988, « Soil burning in Ethiopia: some effects on soil fertility and physics (Abstract) », *Proceedings of a conference held at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, 31 august to 4 september 1987*, p. 124.
- Roperch P., Gattacceca J., Valenzuela M., Devouard B., Lorand J.-P., Arriagada C., Rochette P., Latorre C., Beck P., 2017, « Surface vitrification caused by natural fires in Late Pleistocene wetlands of the Atacama Desert », *Earth and Planetary Science Letters*, 469, p. 15-26.
- Roperch P., Gattacceca J., Valenzuela M., Devouard B., Lorand J.-P., Rochette P., Latorre C., Beck P., 2022, « Widespread glasses generated by cometary fireballs during the late Pleistocene in the Atacama Desert, Chile: COMMENT », *Geology*, 50, 5, p. e550.
- Röpke A., Dietl C., 2017, « Burnt Soils and Sediments », dans NICOSIA C., STOOPS G. (dirs.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, p. 173-180.
- Rösch M., Ehrmann O., Goldammer J.G., Herrmann L., Page H., Schulz E., Hall M., Bogenrieder A., Schier W., 2004, « Slash-and-burn experiments to reconstruct Late Neolithic shifting cultivation », *International Forest Fire News*, 30, p. 70-74.

- Rösch M., Biester H., Bogenrieder A., Eckmeier E., Ehrmann O., Gerlach R., Hall M., Hartkopf-Fröder C., Herrmann L., Kury B., Lechterbeck J., Schier W., Schulz E., 2017, « Late Neolithic Agriculture in Temperate Europe—A Long-Term Experimental Approach », *Land*, 6, 1, p. 11.
- Rösch M., Ehrmann O., Herrmann L., Schulz E., Bogenrieder A., Goldammer J.P., Hall M., Page H., Schier W., 2002, « An experimental approach to Neolithic shifting cultivation », *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1, p. 143-154.
- Rösch M., Kleinmann A., Lechterbeck J., Wick L., 2014, « Botanical off-site and on-site data as indicators of different land use systems: a discussion with examples from Southwest Germany », *Vegetation History and Archaeobotany*, 23, 1, p. 121-133.
- Ross G.J., Kodama H., 1976, « Experimental Alteration of a Chlorite into a Regularly Interstratified Chlorite-Vermiculite by Chemical Oxidation », *Clays and Clay Minerals*, 24, 4, p. 183-190.
- Rossi G., 1999, « Forêts tropicales entre mythes et réalités », *Nature Sciences Sociétés*, 7, 3, p. 22-37.
- Rostain S., 2018, « Agricultural and Social Earthworks in the Guianas », dans *Encyclopedia of Global Archaeology*, Cham, Springer International Publishing, p. 1-21.
- Rouaud R., 2013, *Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques d'une ancienne forêt charbonnée (Auvergne, Limousin, France)*, Thèse de doctorat, géographie, Limoges, Université de Limoges.
- Roulière-Lambert M.-J., 1985, « Des fouilles anciennes à Clairvaux et Chalain à la constitution des collections du Musée Municipal de Lons-le-Saunier », *Présentation des collections du Musée de Lons-le-Saunier*, 1, Néolithique Chalain-Clairvaux fouilles anciennes, p. 9-22.
- Roux V., 2007, « Ethnoarchaeology: A Non Historical Science of Reference Necessary for Interpreting the Past », *Journal of Archaeological Method and Theory*, 14, 2, p. 153-178.
- Rowley-Conwy P., 1981, « Slash and burn in the temperate European Neolithic » MERCER R.J. (dir.), *Farming practice in British prehistory*, p. 85-96.
- Rowley-Conwy P., 1987, « The interpretation of ard marks », *Antiquity*, 61, 232, p. 263-266.
- Roy P.D., Rivero-Navarrete A., Sánchez-Zavala J.L., López-Balbiaux N., 2014, « Subsurface fire and subsidence at Valle del Potosí (Nuevo León, Mexico): Preliminary observations », *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 3, p. 553-557.
- Ruan H.D., Frost R.L., Klopogge J.T., 2001, « The behavior of hydroxyl units of synthetic goethite and its dehydroxylated product hematite », *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 57, 13, p. 2575-2586.
- Ruddiman W., 2017, « Geographic evidence of the early anthropogenic hypothesis », *Anthropocene*, 20, p. 4-14.
- Rué M., 2021, *Approche géoarchéologique de la formation des sites préhistoriques : retour d'expérience et réflexions méthodologiques*, phdthesis, Université Paul Valéry - Montpellier III.
- Rundel P.W., 1983, « Impact of Fire on Nutrient Cycles in Mediterranean-Type Ecosystems with Reference to Chaparral », dans KRUGER F.J., MITCHELL P.D.T., JARVIS P.J.U.M. (dirs.), *Mediterranean-Type Ecosystems*, Springer Berlin Heidelberg (Ecological Studies), p. 192-207.

Rutkiewicz P., Malik I., Wistuba M., Osika A., 2019, « High concentration of charcoal hearth remains as legacy of historical ferrous metallurgy in southern Poland », *Quaternary International*, 512, p. 133-143.

Ruxton B.P., 1968, « Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks », *The Journal of Geology*, 76, 5, p. 518-527.

Ryan K.C., Jones A.T., Koerner C.L., Lee K.M., 2012, « Wildland fire in ecosystems: effects of fire on cultural resources and archaeology », General Technical Report, RMRS-GTR-42-vol. 3, Fort Collins, Colorado, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Ryan K.C., Koerner C., 2012, « Fire Behavior and Effects: Principles for Archaeologists », General Technical Report, RMRS-GTR-42-vol. 3, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Ryan K.C., Noste N.V., 1985, « Evaluating prescribed fires » LOTAN J.E., KILGORE B.M., FISCHER W.C., MUTCH R.W. (dirs.), *Proceedings - Symposium and Workshop on Wilderness Fire*, General Technical Report INT-182, p. 230-238.

Saavedra P., 2014, « Le pan de monte : La culture des montagnes communales en Galice (xvii^e-xix^e siècle) », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 169-200.

Saintot S., 2012, « De l'habitat groupé à l'habitat dispersé au cours du i^{er} millénaire en Auvergne? », *Archéopages. Archéologie et société*, Hors-série 3, p. 117-125.

Saintot S., Ballut C., Bouby L., Brisotto V., Cabanis M., Caillat P., Colas C., Convertini F., Georjon C., Barrier C.L., Bourdonnec F.-X.L., Poupeau G., Rouquet J., Sénépart I., Surmely F., Wattez J., Alix P., Lalai D., Macabéo G., Dunkley J., Pouenat P. 2016 *Un habitat chasséen en Auvergne*, CNRS Éditions ; Inrap.

Saintot S., Cabanis M., Pouenat P., Vallat P., 2015, « Évolution des formes d'habitations, territoires et contextes environnementaux du Ve au III^e millénaire av. J.-C. en Auvergne », *Habitations et habitat du Néolithique à l'âge du Bronze en France et ses marges.*, p. 171-185.

Saintot S., Gandelin M., Cabanis M., Dunkley J., Lalai D., Martin S.G., Sénépart I., Wattez J., 2012, « L'apport du site de Trémonteix à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) à la connaissance du Néolithique final en Auvergne : Première analyse à partir des mobiliers » SENEPART I., LEANDRI F., CAULIEZ J., THIRAULT T.P. ET É. (dirs.), *Chronologie de la Préhistoire récente dans le Sud de la France. Acquis 1992-2012. Actualité de la recherche.*, p. 603-624.

Saintot S., Pasty J.-F., 2004, « Taphonomie et fonctionnalité des occupations pré- et protohistoriques du site des Patureaux à Clermont-Ferrand Puy-de-Dôme » DARTEVELLE H. (dir.), *Auvergne et midi : 5^{èmes} rencontres méridionales de préhistoire récente*, p. 43-84.

Saintot S., Pasty J.-F., Ballut C., Georjon C., Fontana L., 2001, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme), Les Patureaux », Rapport de fouilles, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.

Saintot S., Thomson I., Bonnardin S., Cabanis M., Caillat P., Garnier N., Combes P., 2016, « La nécropole de La Roussille à Vertaizon dans le Puy-de-Dôme. Première présentation d'un site du Néolithique moyen I en Auvergne », dans *De la tombe au territoire, 11^{èmes} Rencontres méridionales de Préhistoire Récente*, AEP, p. 407-421.

Salanova L., Brunet P., Cottiaux R., Hamon T., Langry-François F., Martineau R., Polloni A., Renard C., Sohn M., 2011, « Du Néolithique récent à l'âge du Bronze dans le centre nord de la France : les étapes de l'évolution chrono-culturelle », *Revue archéologique de Picardie*, 28, 1, p. 77-102.

Salaün F., Marre A., 2005, « L'anthropisation des marais de Saint Gond : conséquences sur leur physionomie et sur leur fonctionnement actuel (Marne - France) », *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 31, 123, p. 79-95.

Salavert A., 2008, « Analyse anthracologique du site rubané de Remicourt "En Bia Flo II" (Hesbaye, Belgique): premiers résultats », *Mémoires de la Société préhistorique française*, 44, p. 318-326.

Samojlik T., Kuijper D., 2013, « Grazed wood-pasture versus browsed high forests: Impact of ungulates on forest landscapes from the perspective of the Białowieża Primeval Forest », dans *Trees, Forested Landscapes and Grazing Animals*, Routledge, p. 159-178.

Sanborn P.T., Ballard T.M., 1991, « Combustion Losses of Sulphur from Conifer Foliage: Implications of Chemical Form and Soil Nitrogen Status », *Biogeochemistry*, 12, 2, p. 129-134.

Sánchez-Marañón M., Soriano M., Melgosa M., Delgado G., Delgado R., 2004, « Quantifying the effects of aggregation, particle size and components on the colour of Mediterranean soils », *European Journal of Soil Science*, 55, 3, p. 551-565.

Santesteban J.I., Mediavilla R., López-Pamo E., Dabrio C.J., Zapata M.B.R., García M.J.G., Castaño S., Martínez-Alfaro P.E., 2004, « Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments? », *Journal of Paleolimnology*, 32, 3, p. 287-299.

Saulnier M., Talon B., Edouard J.-L., 2015, « New pedomorphological data for the long-term history of forest species at mid-high altitudes in the Queyras Valley (Inner Alps) », *Quaternary International*, 366, p. 15-24.

Sautter G., 1955, « Notes sur l'agriculture des Bakamba de la Vallée du Niari », *Bulletin de l'Institut d'études centrafricaines*, 9, p. 67-105.

Sazawa K., Wakimoto T., Hata N., Taguchi S., Tanaka S., Tafu M., Kuramitz H., 2013, « The evaluation of forest fire severity and effect on soil organic matter based on the L*, a*, b* color reading system », *Analytical Methods*, 5, 11, p. 2660-2665.

Schaetzl R.J., 1986, « Complete Soil Profile Inversion by Tree Uprooting », *Physical Geography*, 7, 2, p. 181-189.

Schaetzl R.J., Burns S.F., Small T.W., Johnson D.L., 1990, « Tree Uprooting: Review of Types and Patterns of Soil Disturbance », *Physical Geography*, 11, 3, p. 277-291.

Schaetzl R.J., Follmer L.R., 1990, « Longevity of treethrow microtopography: implications for mass wasting », *Geomorphology*, 3, 2, p. 113-123.

Schaller J., Tischer A., Struyf E., Bremer M., Belmonte D.U., Potthast K., 2015, « Fire enhances phosphorus availability in topsoils depending on binding properties », *Ecology*, 96, 6, p. 1598-1606.

Scheinost A.C., Chavernas A., Barrón V., Torrent J., 1998, « Use and Limitations of Second-Derivative Diffuse Reflectance Spectroscopy in the Visible to Near-Infrared Range to Identify and Quantify Fe Oxide Minerals in Soils », *Clays and Clay Minerals*, 46, 5, p. 528-536.

Scherer H.W., 2009, « Sulfur in soils », *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 3, p. 326-335.

Scherjon F., Bakels C., MacDonald K., Roebroeks W., 2015, « Burning the Land: An Ethnographic Study of Off-Site Fire Use by Current and Historically Documented Foragers and Implications for the Interpretation of Past Fire Practices in the Landscape », *Current Anthropology*, 56, 3, p. 299-326.

Schier W., Ehrmann O., Rösch M., Bogenrieder A., Hall M., Herrmann L., Schulz E. 2013 *The economics of Neolithic swidden cultivation: results of an experimental long-term project in Forchtenberg (Baden-Württemberg, Germany)*, Dr. Rudolf Habelt GmbH Bonn, 97–108 p.

Schiffer M.B., 1986, « Radiocarbon dating and the “old wood” problem: The case of the Hohokam chronology », *Journal of Archaeological Science*, 13, 1, p. 13-30.

Schoch W., Schweingruber F.H., Kienast F., 2004, « Microscopic Wood Anatomy of Central European species », *Wood anatomy of central European Species. WSL*.

Schroeder N., 2014, « Les cultures temporaires en Ardenne belge du Moyen Âge au xixe siècle », dans RENDU C., VIADER R. (dirs.), *Cultures temporaires et féodalité: Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 101-115.

Schultz P.H., Harris R.S., Perroud S., Blanco N., Tomlinson A.J., 2021, « Widespread glasses generated by cometary fireballs during the late Pleistocene in the Atacama Desert, Chile », *Geology*, 50, 2, p. 205-209.

Schultz P.H., Harris R.S., Perroud S., Blanco N., Tomlinson A.J., 2022, « Widespread glasses generated by cometary fireballs during the late Pleistocene in the Atacama Desert, Chile: REPLY », *Geology*, 50, 5, p. e551.

Schulz E., Almohamad H., Bencsik A., Cacovean H., Hall M., 2020, « Fire on the Mountain. Disturbance and Regeneration in Deciduous and Conifer Forests. 20 Years of Experience », *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geographia*, 64, 2, p. 17-60.

Schulz E., Vannina U., Hall M., 2014, « The double mosaic-regeneration of vegetation and soil after clearing, burning, and cultivation: lessons from the Forchtenberg experiment », *Vegetation History and Archaeobotany*, 23, 1, p. 19-36.

Schulze D.G., Schwertmann U., 1984, « The influence of aluminium on iron oxides: X. properties of Al-substituted goethites », *Clay Minerals*, 19, 4, p. 521-539.

Schwartz D., Gebhardt A., 2011, « L'enfouissement de vestiges archéologiques par la bioturbation : La colline du Hexenberg (Leutenheim, 67) - Un cas d'école », *Étude et Gestion des Sols*, 18, 4, p. 287-300.

Schweingruber F.H. 1990 *Anatomy of European woods. An atlas for identification of European trees, shrubs and dwarf shrubs.*, Germany, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Verlag Kessel.

Schweingruber F.H., Börner A., Schulze E.-D. 2011 *Atlas of Stem Anatomy in Herbs, Shrubs and Trees*, Berlin, Heidelberg, Springer.

Schweingruber F.H. 2007 *Wood Structure and Environment*, Berlin, Heidelberg, Springer, 279 p.

Schwertmann U., 1993, « Relations Between Iron Oxides, Soil Color, and Soil Formation », dans *Soil Color*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 51-69.

Schwertmann U., Murad E., Schulze D.G., 1982, « Is there holocene reddening (hematite formation) in soils of axeric temperate areas? », *Geoderma*, 27, 3, p. 209-223.

- Sclafert T. 1926 *Le Haut-Dauphiné au moyen âge*, Paris, Société anonyme du Recueil Sirey, 765 p.
- Scott A.C., 2000, « The Pre-Quaternary history of fire », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 1–4, p. 281-329.
- Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S.J., Alexander M.E. 2014a *Fire on earth. An introduction*, Chichester, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Wiley Blackwell, 2014, 448 p.
- Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S.J., Alexander M.E., 2014b, « Chapter 14. Fundamentals of wildland fire as a physical process », dans *Fire on earth. An introduction*, Chichester, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Wiley Blackwell, 2014, p. 297-340.
- Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S.J., Alexander M.E., 2014c, « Chapter 7. Plants and fire », dans *Fire on earth. An introduction*, Chichester, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Wiley Blackwell, 2014, p. 131-146.
- Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S.J., Alexander M.E., 2014d, « Chapter 6. Pyrogeography – temporal and spatial patterns of fire », dans *Fire on earth. An introduction*, Chichester, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Wiley Blackwell, 2014, p. 113-129.
- Scott A.C., Cripps J.A., Collinson M.E., Nichols G.J., 2000, « The taphonomy of charcoal following a recent heathland fire and some implications for the interpretation of fossil charcoal deposits », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 1–4, p. 1-31.
- Scotter D., 1970, « Soil temperatures under grass fires », *Soil Research*, 8, 3, p. 273-279.
- Sébillotte M. 1976 *Jachère, système de culture, système de production*, Institut national agronomique Paris Grignon.
- Sébillotte M., 1977, « Jachère, système de culture, système de production, méthodologie d'étude », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 24, 2, p. 241-264.
- Sébillotte M., 1992, « Pratiques agricoles et fertilité du milieu », *Économie rurale*, 208, 1, p. 117-124.
- Séguin R.-L., 1974, « L'outillage agraire en Nouvelle-France : du défrichement au labourage », *Ethnologie française*, 4, 3, p. 291-308.
- Seignobos C., 2017, « Chapitre 3. Autour de l'agriculture », dans *Des mondes oubliés : Carnets d'Afrique*, Marseille, IRD Éditions (Hors collection), p. 85-125.
- Sénépart I., 2010, « Marins et paysans ? Le néolithique ancien dans le sud de la France », dans *La France préhistorique. Un essai d'histoire*, Éditions Gallimard, (nrf essais), p. 256-280.
- Sergant J., Crombé P., Perdaen Y., 2006, « The 'invisible' hearths: a contribution to the discernment of Mesolithic non-structured surface hearths », *Journal of Archaeological Science*, 33, 7, p. 999-1007.
- Serre-Duhem C., 1995, *Essai d'interprétation d'une famine. Les transformations d'un système agraire au Congo: le plateau Kukuya*, PhD Thesis, thèse de doctorat, INAPG, Agriculture comparée et développement agricole, Paris.
- Sertsu S.M., Sánchez P.A., 1978, « Effects of Heating on Some Changes in Soil Properties in Relation to an Ethiopian Land Management Practice », *Soil Science Society of America Journal*, 42, 6, p. 940-944.

Sevink J., 2020, « Burnt clay or terra bruciata in coastal basins of Southern Lazio, Italy: Evidence for prehistoric ignicoltura or resulting from drainage of Holocene pyritic sediments? », *Journal of Archaeological Science: Reports*, 32, p. 102432.

Shang C., Zelazny L.W., 2008, « Selective Dissolution Techniques for Mineral Analysis of Soils and Sediments », dans *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 33-80.

Sheldon N.D., Tabor N.J., 2009, « Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols », *Earth-Science Reviews*, 95, 1, p. 1-52.

Sherratt A., 1980, « Water, soil and seasonality in early cereal cultivation », *World Archaeology*, 11, 3, p. 313-330.

Shuman L.M., 1979, « Zinc, manganese, and copper in soil fractions », *Soil Science*, 127, 1, p. 10.

Sigaut F., 1987, « L'arbre fourrager en Europe : rôle et évolution des techniques » ALLEZARD V., HUBERT B. (dirs.), *Fourrages*, La forêt et l'élevage en région méditerranéenne française, hors-série, p. 45-54.

Sigaut F. 1975 *L'agriculture et le feu. Rôle et place du feu dans les techniques de préparation du champ de l'ancienne agriculture européenne*, Paris, La Haye, École des Hautes Études en Sciences Sociales et Mouton&Co., 320 p.

Sigaut F., 1976, « Pour une cartographie des assolements en France au début du XIXe siècle », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 31, 3, p. 631-643.

Sigaut F., 1977, « Quelques notions de base en matière de travail du sol dans les anciennes agricultures européennes », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 24, 2, p. 139-169.

Sigaut F., 1979, « Swidden cultivation in Europe. A question for tropical anthropologists », *Social Science Information*, 18, 4-5, p. 679-694.

Sigaut F., 1981, « Pourquoi les géographes s'intéressent-ils à peu près à tout, sauf aux techniques ? », *Espace géographique*, 10, 4, p. 291-293.

Sigaut F., 1982a, « Techniques et société chez les cultivateurs de tubercules : quelques réflexions critiques », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 29, 3, p. 355-364.

Sigaut F., 1982b, « Brûlis et écobuage », *Le Monde.fr*, 24 mars 1982.

Sigaut F., 1984, « Essai d'identification des instruments à bras de travail du sol in Les instruments aratoires en Afrique tropicale. La fonction et le signe », *Essai d'identification des instruments à bras de travail du sol in Les instruments aratoires en Afrique tropicale. La fonction et le signe*, 20, 3-4, p. 359-374.

Sigaut F., 1992, « Rendements, semis et fertilité: signification analytique des rendements », dans *Préhistoire de l'agriculture : nouvelles approches expérimentales et ethnographiques*, Paris, Éditions du CNRS (Monographie du CRA), p. 395-403.

Sigaut F., 1993, « La jachère dans les agricultures pré-contemporaines de l'Europe » FLORET C., SERPANTIE G. (dirs.), *La jachère en Afrique de l'Ouest*, p. 113-123.

Sigaut F., 2003a, « La faux, un outil emblématique de l'agriculture européenne » COMET G. (dir.), *Actes des XXIIIe Journées Internationales d'Histoire de l'Abbaye de Flaran*, p. 281-295.

Sigaut F., 2003b, « La formule de Mauss », *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 40.

Sigaut F., 2007, « Le labour, qu'est-ce que c'est ? », *Nous labourons*, p. 21-27.

Sigaut F., 2010, « Propos contre-révolutionnaires sur le Néolithique, l'agriculture, etc. », dans DEMOULE J.-P. (dir.), *La révolution néolithique dans le monde*, Paris, CNRS Éditions (CNRS Alpha), p. 181-196.

Sigaut F., 1975b, « La technologie de l'agriculture: Terrain de rencontre entre agronomes et ethnologues », *Études rurales*, 59, p. 103-111.

Sigaut F., Morlon P. 2008a *La troublante histoire de la jachère. Pratiques des cultivateurs, concepts de lettrés et enjeux sociaux*, Éditions Quae & Educagri éditions, 328 p.

Sigaut F., Morlon P., 2008b, « La jachère, d'une signification à l'autre », *Pour la Science*, 2008, p. 94-99.

Simoneit B.R.T., 2002, « Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion », *Applied Geochemistry*, 17, 3, p. 129-162.

Singer M.J., Fine P., 1989, « Pedogenic Factors Affecting Magnetic Susceptibility of Northern California Soils », *Soil Science Society of America Journal*, 53, 4, p. 1119-1127.

Singh B., O'Connor S., Veth P., Gilkes R., 1991, « Detection of amorphous alumino-silicate by X-ray diffraction and chemical analysis to detect firing in archaeological sediments », *Archaeology in Oceania*, 26, 1, p. 17-20.

Smet S.D.-D., 1966, « Note Sur Un Accumulateur De Manganèse: *Vaccinium Martillus L.* », *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique / Bulletin van de Koninklijke Belgische Botanische Vereniging*, 99, 2, p. 331-343.

Smith B.D., 2001, « Low-Level Food Production », *Journal of Archaeological Research*, 9, 1, p. 1-43.

Smith J.E., Cowan A.D., Fitzgerald S.A., 2016, « Soil heating during the complete combustion of megalogos and broadcast burning in central Oregon USA pumice soils », *International Journal of Wildland Fire*, 25, 11, p. 1202-1207.

Smykatz-Kloss W., Heide K., Klinke W., 2003, « Chapter 11 - Applications of Thermal Methods in The Geosciences », dans BROWN M.E., GALLAGHER P.K. (dirs.), *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, Elsevier Science B.V. (Applications to Inorganic and Miscellaneous Materials), p. 451-593.

Soininen A.M., 1959, « Burn-beating as the technical basis of colonisation in Finland in the 16th and 17th centuries », *Scandinavian Economic History Review*, 7, 2, p. 150-166.

Soltner D. 1994 *Les bases de la production végétale. Tome I. Le sol*, 20e édition, 467 p.

Sopher D.E., 1972, « Essartage: système et symbole. Réflexions sur les Marma et les peuples montagnards de l'Asie du Sud-Est. », *Études rurales*, 45, 1, p. 81-98.

Soto B., Basanta R., Perez R., Diaz-Fierros F., 1995, « An experimental study of the influence of traditional slash-and-burn practices on soil erosion », *CATENA*, 24, 1, p. 13-23.

Souchier B., 1971, « Évolution des sols sur roches cristallines à l'étage Montagnard (Vosges) », *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 33, 1, p. 0-0.

Souffi B., Marti F., Chaussé C., Griselin S., Bridault A., Chesnaux L., David E., Gosselin R., Granai S., Hamon C., Leduc C., 2013, « Occupations mésolithiques en bord de Seine : le site de Paris 15ème arrondissement «62 rue Henry Farman». Organisation et fonctionnement », dans VALENTIN B., SOUFFI B., DUCROCQ T., FAGNART J.-P., SEARA F., VERJUX C. (dirs.), *Paethnographie du Mésolithique : recherches sur les habitats de plein air dans la moitié septentrionale de la France et ses marges, actes de la table ronde internationale de Paris, 26-27 novembre 2010*, Société préhistorique française, p. 13-36.

Souffi B., Coussot C., Brunet P., Brunet V., Irribarria R., Le Goff C., Manceau L., 2022, « Île-de-France, Seine-et-Marne, Citry, Les rues de Marne, Tranche 5 », Rapport de diagnostic archéologique, D124141, Pantin, Inrap Centre Île-de-France.

Souffi B., Marti F., Griselin S., Chaussé C., Bridault A., Brunet P., Chesnaux L., David E., Drucker D., Durand J., Granai S., Gosselin R., Hachem L., Hamon C., Irribarria R., Le Maux N., Leduc C., Valentin F., Vanhaeren M., Verdin P., Wattez J., 2011, « Paris, 15ème arrondissement, 62 rue Henry-Farman. Évolution culturelle et environnementale d'un site stratifié en bord de Seine, du Mésolithique au premier Âge du Fer », Rapport de fouille, AB 10118501, Pantin, Inrap Centre Île-de-France.

Stanjek H., Schwertmann U., 1992, « The Influence of Aluminum on Iron Oxides. Part XVI: Hydroxyl and Aluminum Substitution in Synthetic Hematites », *Clays and Clay Minerals*, 40, 3, p. 347-354.

Steensberg A., 1955, « Med bragende flammer. Brændingskulturens metoder i fortid og nutid. », *Kuml*, 5, 5, p. 65-130.

Steensberg A., 1957, « Some Recent Danish Experiments in Neolithic Agriculture », *The Agricultural History Review*, 5, 2, p. 66-73.

Stépanoff, C., Vigne, J.-D. (dirs.), 2018, « Introduction », dans *Hybrid Communities. Biosocial Approaches to Domestication and Other Trans-species Relationships*, London, Routledge, p. 1-20.

Streckeman T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., Schvartz C., Carignan J., 2006, « Trace element distributions in soils developed in loess deposits from northern France », *European Journal of Soil Science*, 57, 3, p. 392-410.

Stokes P., Rowley-Conwy P., 2002, « Iron Age Cultigen? Experimental Return Rates for Fat Hen (*Chenopodium album* L.) », *Environmental Archaeology*, 7, 1, p. 95-99.

Stoops G., 2020, « Mineral and Organic Constituents », dans *Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 87-126.

Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (dirs.) 2018 *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, Elsevier, 1000 p.

Strangway D.W., McMahon B.E., Honea R.M., Larson E.E., 1967, « Superparamagnetism in hematite », *Earth and Planetary Science Letters*, 2, 4, p. 367-371.

Stuiver M., Reimer P.J., Bard E., Beck J.W., Burr G.S., Hughen K.A., Kromer B., McCormac G., Plicht J.V.D., Spurk M., 1998, « INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000–0 cal BP », *Radiocarbon*, 40, 3, p. 1041-1083.

Styring A., Maier U., Stephan E., Schlichtherle H., Bogaard A., 2016, « Cultivation of choice: new insights into farming practices at Neolithic lakeshore sites », *Antiquity*, 90, 349, p. 95-110.

Sun H., Nelson M., Chen F., Husch J., 2009, « Soil mineral structural water loss during loss on ignition analyses », *Canadian Journal of Soil Science*, 89, 5, p. 603-610.

Szpak P., 2014, « Complexities of nitrogen isotope biogeochemistry in plant-soil systems: implications for the study of ancient agricultural and animal management practices », *Frontiers in Plant Science*, 5.

Taillardat J., 2014, « Film commenté : exploitation par déracinage ou à culée noire », *Actes du colloque Histoire et traditions forestières, 2ème Colloque*, 26, p. 163-168.

Talon B., Carcaillet C., Thion M., 1998, « Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les alpes françaises. », *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 2, p. 195-208.

Talon B., Payette S., Filion L., Delwaide A., 2005, « Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils », *Quaternary Research*, 64, 1, p. 36-43.

Tarrega R., Calvo L., Trabaud L., 1992, « Effect of high temperatures on seed germination of two woody Leguminosae », *Vegetatio*, 102, 2, p. 139-147.

Taylor S.W., Wotton B.M., Alexander M.E., Dalrymple G.N., 2004, « Variation in wind and crown fire behaviour in a northern jack pine black spruce forest », *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 8, p. 1561-1576.

Teheux É., Lantoin J., Deschodt L., 2001, « Delta 3, Le Marais de Dourges, sites paléolithiques », Rapport de fouille, 62 427 030 AH / 62 427 027 AH, Amiens, INRAP.

Terefe T., Mariscal-Sancho I., Gómez M., Espejo R., 2005, « Relationship between soil color and temperature in the surface horizon of Mediterranean soils: A laboratory study », *Soil Science*, 170, 7, p. 495-503.

Terefe T., Mariscal-Sancho I., Peregrina F., Espejo R., 2008, « Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study », *Geoderma*, 143, 3, p. 273-280.

Terzano R., Rascio I., Allegretta I., Porfido C., Spagnuolo M., Khanghahi M.Y., Crecchio C., Sakellariadou F., Gattullo C.E., 2021, « Fire effects on the distribution and bioavailability of potentially toxic elements (PTEs) in agricultural soils », *Chemosphere*, 281, p. 130752.

Testart A., 1982, « Les tubercules sont-ils aux céréales comme la sauvagerie est à la civilisation ? », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 29, 3, p. 349-354.

Testart A., 2003, « Pour une typologie des chasseurs-cueilleurs », *Anthropologie et Sociétés*, 5, 2, p. 177-221.

Testart A. 2012 *Avant l'histoire: l'évolution des sociétés, de Lascaux à Carnac*, Paris, France, nrf, Gallimard, 560 p.

Thévenin E., Mortagne-de-Sury B., Bet Ph., Blaizot F., Vernet G., 1999, « Clermont-Ferrand (63), Station d'épuration, Voie des Petites Gravanches », Rapport d'opération d'évaluation archéologique AFAN, SRA Auvergne.

Thevenin S. 1996 *Typologie forestière en vue du réaménagement paysager multifonctionnel de la Champagne crayeuse. Deuxième version.*, Chalons en Champagne, : Direction régionale de l'agriculture et de la forêt DRAAF. Champagne-Ardenne : Centre régional dfe la propriété forestière, 233 p.

Thion M., 1978, « La pédoanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le néolithique. », *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 287, Série D, p. 1203-1206.

Thinon M., 1992, *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications*, Thèse d'état : Écologie, Université Aix-Marseille 3, 297 p.

Thomaz E.L., 2021, « Effects of fire on the aggregate stability of clayey soils: A meta-analysis », *Earth-Science Reviews*, 221, p. 103802.

Thomaz E.L., Antoneli V., Doerr S.H., 2014, « Effects of fire on the physicochemical properties of soil in a slash-and-burn agriculture », *CATENA*, 122, p. 209-215.

Thompson M.L., Ukrainczyk L., 2002, « Micas », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 431-466.

Thompson R., Oldfield F. 1986 *Environmental Magnetism*, Dordrecht, Springer Netherlands.

Thonat A., 2014, « Massiac. Notice explicative. Feuille 765 », dans *Carte Géologique de la France à 1/50 000.*, Orléans, France, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, p. 136.

Thouvenot S., Allard P., Cottiaux R., Martineau R., Monchablon C., 2020, « Le site d'habitat du Néolithique récent de Presles-et-Boves, les Bois-Plantés (Aisne) », dans SALANOVA L. (dir.), *La fin du IV^e millénaire dans le bassin parisien : Le Néolithique récent entre Seine, Oise et Marne (3500-2900 avant notre ère)*, Dijon, ARTEHIS Éditions (Suppléments à la Revue archéologique de l'Est), p. 27-92.

Thrane H., 1989, « Danish Plough-Marks from the Neolithic and Bronze Age », *Journal of Danish Archaeology*, 8, 1, p. 111-125.

Tiedemann A.R., 1987, « Combustion Losses of Sulfur from Forest Foliage and Litter », *Forest Science*, 33, 1, p. 216-223.

Tinner W., Hofstetter S., Zeugin F., Conedera M., Wohlgemuth T., Zimmermann L., Zweifel R., 2006, « Long-distance transport of macroscopic charcoal by an intensive crown fire in the Swiss Alps - implications for fire history reconstruction », *The Holocene*, 16, 2, p. 287-292.

Tinner W., Lotter A.F., 2006, « Holocene expansions of *Fagus silvatica* and *Abies alba* in Central Europe: where are we after eight decades of debate? », *Quaternary Science Reviews*, 25, 5, p. 526-549.

Tinner W., Nielsen E.H., Lotter A.F., 2007, « Mesolithic agriculture in Switzerland? A critical review of the evidence », *Quaternary Science Reviews*, 26, 9, p. 1416-1431.

Tintner J., Fierlinger R., Gerzabek H., Pfeifer C., Smidt E., 2020, « Pyrolysis profiles of a traditional circular kiln in Austria and a drum kiln in Namibia », *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 150, p. 104865.

Tite M.S., Mullins C., 1971, « Enhancement of the Magnetic Susceptibility of Soils on Archaeological Sites », *Archaeometry*, 13, 2, p. 209-219.

Tooke W. 1801 *Histoire de l'empire de Russie: sous le règne de Catherine II, et à la fin du dix-huitième siècle*, Maradan, 436 p.

Topoliantz S., Ponge J.-F., 2005, « Charcoal consumption and casting activity by *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae) », *Applied Soil Ecology*, 28, 3, p. 217-224.

Torrent J., Schwertmann U., Fechter H., Alferez F., 1983, « Quantitative relationships between soil color and hematite content », *Soil Science*, 136, 6, p. 354.

Torrent J., Schwertmann U., Schulze D.G., 1980, « Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain », *Geoderma*, 23, 3, p. 191-208.

Torrent J., Barrón V., Liu Q., 2006, « Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil », *Geophysical Research Letters*, 33, 2.

Toussaint P., Harmey L., Millena F., Mathelart P., Zipper K., Vauquelin E., Le Goff I., Giros R., 2014, « Canalisation de transport de gaz dite « Arc de Dierrey » tronçon 7 : Laines-aux-Bois, Saint Pouange, Saint Thibault, Vaudes, Rumilly-les-Vaudes, Chappes », Rapport de diagnostic archéologique, BA 07189511, Metz, Inrap Grand Est-Nord.

Trément F., 2011, « Chapitre 5 : La Limagne des Marais : un système socio-environnemental », dans *Les Arvernes et leurs voisins du Massif Central à l'époque romaine. Une archéologie du développement des territoires, Tome 1*, Revue d'Auvergne, Nouvelles Archeologiques, Clermont-Ferrand, Société des amis de l'Université de Clermont. Alliance Universitaire d'Auvergne, p. 512.

Trément F., Argant J., Bréhéret J.-G., Cabanis M., Dousteysier B., Fourmont A., Fournier G., Liabeuf R., Loison G., Sáez J.A.L., Macaire J.-J., Marinval P., Mennessier-Jouannet C., Milcent P.-Y., Prat B., Rialland Y., Vernet G., Fauduet I., Odenhardt-Donvez I., 2007, « Un ancien lac au pied de l'oppidum de Gergovie (Puy-de-Dôme) : interactions sociétés-milieus dans le bassin de Sarliève à l'Holocène », *Gallia*, 64, 1, p. 289-351.

Trément F., Loison G., Argant J., Bréhéret J.G., Cabanis M., Dousteysier B., Fourmont A., Fournier G., Liabeuf R., Lopez-Saez J.A., Macaire J.-J., Milcent P.-Y., Prat B., Rialland Y., Vernet G., 2006, « Interactions sociétés-milieus en Grande Limagne du Néolithique à l'époque romaine. Apport des recherches interdisciplinaires conduites dans le bassin de Sarliève (Puy-de-Dôme) », *Paysages et peuplements: aspects culturels et chronologie en France méridionale, Actes des 6èmes Rencontres méridionales de Préhistoire récente*, p. 11-32.

Tresset A., Bollongino R., Edwards C., Hughes S., Vigne J.-D., 2009, « An indicator for human contacts, exchanges and migrations?: Early diffusion of domestic bovids in Europe », dans ERRICO F. D', HOMBERT J.-M. (dirs.), *Becoming Eloquent: Advances in the emergence of language, human cognition, and modern cultures*, John Benjamins Publishing Company, p. 69-90.

Tricart J. 1952 *La partie orientale du bassin de Paris: étude morphologique. 2. L'évolution morphologique au quaternaire*, Société d'étude d'enseignement supérieur.

Troels-Smith J., 1984, « Stall-feeding and field-manuring in Switzerland about 6000 years ago », *Tools & tillage*, 5, 1, p. 13-25.

Trolard F., 1988, « Physico-chimie des cuirasses latéritiques. Domaines de stabilité des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium », *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 81, 1, p. 0-0.

Trolard F., Bourrie G., Jeanroy E., Herbillon A.J., Martin H., 1995, « Trace metals in natural iron oxides from laterites: A study using selective kinetic extraction », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 7, p. 1285-1297.

Ulery A.L., Graham R.C., 1993, « Forest Fire Effects on Soil Color and Texture », *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1, p. 135-140.

Ulery A.L., Graham R.C., Bowen L.H., 1996, « Forest Fire Effects on Soil Phyllosilicates in California », *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1, p. 309-315.

Ulery A.L., Graham R.C., Goforth B.R., Hubbert K.R., 2017, « Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils », *Geoderma*, 286, p. 125-130.

Umbanhowar C.E., Mcgrath M.J., 1998, « Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses », *The Holocene*, 8, 3, p. 341-346.

- Valette J.C., Gomendy V., Marechal J., Houssard C., Gillon D., Valette J.C., Gomendy V., Marechal J., Houssard C., Gillon D., 1994, « Heat-Transfer in the Soil During Very Low-Intensity Experimental Fires - the Role of Duff and Soil-Moisture Content », *International Journal of Wildland Fire*, *International Journal of Wildland Fire*, 4, 4, 4, 4, p. 225, 225-237, 237.
- Vallauri D., André J., Blondel J., 2003, « Le bois mort, une lacune des forêts gérées », *Revue forestière française*, LV, 2, p. 99-112.
- Van Der Veen M., 2005, « Gardens and fields: the intensity and scale of food production », *World Archaeology*, 37, 2, p. 157-163.
- Van Oort F., Paradelo R., Proix N., Breuil S., Delarue G., Trouve A., Baize D., Monna F., Richard A., 2017, « Arsenic et vieilles parcelles : États et bilans géochimiques dans l'horizon de surface d'un NÉOLUVISOL de lœess nu, avec ou sans apports de matières fertilisantes depuis 1928 », *Étude et Gestion des Sols*, 24, p. 99-126.
- Van Ranst E., De Coninck F., 2002, « Evaluation of ferrollysis in soil formation », *European Journal of Soil Science*, 53, 4, p. 513-520.
- Van Ranst E., Dumon M., Tolossa A.R., Cornelis J.-T., Stoops G., Vandenberghe R.E., Deckers J., 2011, « Revisiting ferrollysis processes in the formation of Planosols for rationalizing the soils with stagnic properties in WRB », *Geoderma*, 163, 3, p. 265-274.
- Vannièr B., Blarquez O., Rius D., Doyen E., Brücher T., Colombaroli D., Connor S., Feurdean A., Hickler T., Kaltenrieder P., Lemmen C., Leys B., Massa C., Olofsson J., 2016, « 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes », *Quaternary Science Reviews*, 132, p. 206-212.
- Vannièr B., 2001, *Feu, agro-pastoralisme et dynamiques environnementales en France durant l'Holocène. Analyse du signal incendie, approches sédimentologiques et études de cas en Berry, Pyrénées et Franche-Comté*, Thèse, France, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, 329 p.
- Vaté V., Beyries S., 2007, « Une ethnographie du feu chez les éleveurs de rennes du Nord-Est sibérien. », *actes des rencontres*, p. 393-419.
- Velde B., Druc I.C. 1999 *Archaeological Ceramic Materials: Origin and Utilization*, Berlin, Heidelberg, Springer, 299 p.
- Vepraskas M.J., Lindbo D.L., Stolt M.H., 2018, « Chapter 15 - Redoximorphic Features », dans STOOPS G., MARCELINO V., MEES F. (dirs.), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (Second Edition)*, Elsevier, p. 425-445.
- Verleyen E., Sabbe K., Vyverman W., Nicosia C., 2017, « Siliceous Microfossils from Single-Celled Organisms », dans *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 165-170.
- Vermeire L.T., Mitchell R.B., Fuhlendorf S.D., Gillen R.L., 2004, « Patch burning effects on grazing distribution », 57.
- Vermeulen C., 2001, « Gerzat (Puy-de-Dôme) : Chantemerle », Rapport de fouilles, Bron, AFAN Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2005, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : Le Brézet : Rue Georges Besse », Rapport de fouilles, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.

- Vernet G., 2010, « Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme) : Les Gravanches, zone coliposte », Rapport de diagnostic, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2011, « Ménétrol, Puy-de-Dôme, Auvergne. Champ Saint-Lazard, Champ Charie. Sépultures de l'âge du Bronze dans la vallée du ruisseau de Mirabel », Rapport final d'opération. Diagnostic archéologique, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2012a, « Cébazat (Puy-de-Dôme) : ZAC des Trois Fées - 2ème tranche - phase 2 », Rapport d'opération : diagnostic archéologique, HA 03 0592 02, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2012b, « Cournon-d'Auvergne (Puy-de-Dôme) : Les Fourmariaux, Structures néolithiques », Rapport de diagnostic, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2012c, « Vertaizon (Puy-de-Dôme) : La Roussille », Rapport de diagnostic, D101478, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2013a, « Riom (Puy-de-Dôme) : Parc Européen Economique - rue Ludwig von Beethoven », Rapport de diagnostic, D104753, Bron, Inrap Rhône-Alpes Auvergne.
- Vernet G., 2013b, « La séquence sédimentaire des Gravanches/ Gerzat : enregistrement d'événements « catastrophiques » à valeur chronologique en Limagne d'Auvergne (Massif Central, France) », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 24/2, p. 109-127.
- Vernet G., Gauthier F., Pasty J.-F., Caillat P., Georjon C., Deberge Y., Wittmann A., Thomson I., Horry A., 2013, « Clermont-Ferrand et Gerzat, Puy-de-Dôme, Auvergne. A 71, Section Gerzat/A 75 », Rapport de diagnostic archéologique, D102325, Inrap Rhône-Alpes-Auvergne.
- Vernet G., Raynal J.-P., 2008, « La Formation de Marsat et le Téphra CF7, marqueurs distaux d'éruptions trachytiques violentes de la chaîne des Puys au Boréal », *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, vol. 19/2, p. 97-106.
- Vernhet Y., 2007, « Carte géologique harmonisée du département de la Marne »,.
- Viader R., 2014, « Cultures temporaires et féodalité : Pour une redéfinition des problématiques », dans RENDU C. (dir.), *Cultures temporaires et féodalité : Les rotations culturales et l'appropriation du sol dans l'Europe médiévale et moderne*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (Flaran), p. 7-31.
- Vicente M.A., Razzaghe M., Robert M., 1977, « Formation of aluminium hydroxy vermiculite (intergrade) and smectite from mica under acidic conditions », *Clay Minerals*, 12, 2, p. 101-112.
- Vidal de La Blache P. 1922 *Principes de géographie humaine : Publiés d'après les manuscrits de l'auteur par Emmanuel de Martonne*, Lyon, ENS Éditions.
- Viennet J.-C., 2015, *Minéraux argileux aluminisés des sols : caractérisation structurale par modélisation des diffractogrammes de rayons X et détermination des mécanismes de formation par approche expérimentale*, These de doctorat, Poitiers.
- Vigne J.-D., 2011, « The origins of animal domestication and husbandry: A major change in the history of humanity and the biosphere », *Comptes Rendus Biologies*, 334, 3, p. 171-181.
- Vigne J.-D., 2015, « Early domestication and farming: what should we know or do for a better understanding? », *Anthropozoologica*, 50, 2, p. 123-150.

Vigne J.-D., Arbogast R.-M., Horard-Herbin M.-P., Méniel P., Lepetz S., 2005, « Chapitre 6. Animaux, sociétés et cultures », dans *Animaux, environnements et sociétés.*, Éditions Errance (Collection Archéologiques), p. 151-182.

Vigneau T., 2016, « Brétignolles-sur-Mer : Le Marais Girard (Vendée) », *Archéologie, Littoral et Réchauffement Terrestre - ALeRT*.

Villagran X.S., Strauss A., Miller C., Ligouis B., Oliveira R., 2017, « Buried in ashes: Site formation processes at Lapa do Santo rockshelter, east-central Brazil », *Journal of Archaeological Science*, 77, p. 10-34.

Viller S., Franck J., Leduc C., Wiethold J., 2016, « Mouzay, Lion-devant-Dun, Meuse, L'Aiguillon, zone 4 », Rapport de diagnostic archéologique, D033905-1, Metz, Inrap Grand Est nord.

Vinther B.M., Buchardt S.L., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fisher D.A., Koerner R.M., Raynaud D., Lipenkov V., Andersen K.K., Blunier T., Rasmussen S.O., Steffensen J.P., Svensson A.M., 2009, « Holocene thinning of the Greenland ice sheet », *Nature*, 461, 7262, p. 385-388.

Vinton M.A., Hartnett D.C., Finck E.J., Briggs J.M., 1993, « Interactive Effects of Fire, Bison (Bison bison) Grazing and Plant Community Composition in Tallgrass Prairie », *The American Midland Naturalist*, 129, 1, p. 10-18.

Viscarra Rossel R.A., Minasny B., Roudier P., McBratney A.B., 2006, « Colour space models for soil science », *Geoderma*, 133, 3-4, p. 320-337.

Vivent D., Vernet G., 2001, « Apport de la palynologie à l'étude des retombées volcaniques tardiglaciaires et holocènes de la Chaîne des Puys enregistrées en Limagne (France) » JUVIGNE E., RAYNAL J.-P. (dirs.), *Tephros, Chronology, Archaeology*, 1, p. 255-262.

Vizier J.-F., 1971, « Etude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes », *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 9, 4, p. 25.

Von Verschuer C., 1995, « L'autre agriculture : les cultures sur brûlis dans le Japon ancien », *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 37, 2, p. 129-164.

Vrydaghs L., Devos Y., Pető Á., 2017, « Opal Phytoliths », dans *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 155-163.

Vysloužilová B., 2014, *Steppes ou forêts ? : les conditions environnementales de la formation et de l'évolution des chernozems en Europe Centrale*, phdthesis, Université de Strasbourg.

Wainwright M., 1984, « Sulfur Oxidation in Soils », dans BRADY N.C. (dir.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, p. 349-396.

Watteaux M., 2011, « L'archéogéographie. un projet d'archéologie du savoir géohistorique », *Les nouvelles de l'archéologie*, 125, p. 3-7.

Wattez J., 1988, « Contribution à la connaissance des foyers préhistoriques par l'étude des cendres. », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 85, 10, p. 352-366.

Wattez J., 1992, *Dynamique de formation des structures de combustion de la fin du paléolithique au néolithique moyen. Approche méthodologique et implications culturelles*, Thèse de doctorat, Université de Paris 1, 405 p.

- Welch J.R., 2014, « Xavante Ritual Hunting: Anthropogenic Fire, Reciprocity, and Collective Landscape Management in the Brazilian Cerrado », *Human Ecology*, 42, 1, p. 47-59.
- Weller O., 2006, « L'exploitation des sources salées en Auvergne entre le Néolithique et l'âge du Fer », *ADLFI. Archéologie de la France - Informations. une revue Gallia*.
- Wells W.G. II, 1987, « The effects of fire on the generation of debris flows in southern California », dans COSTA J.E., WIECZOREK G.F. (dirs.), *Debris Flows/Avalanches*, Geological Society of America, p. 0.
- Wendorf M., 1982, « The Fire Areas of Santa Rosa Island: An Interpretation », *North American Archaeologist*, 3, 2, p. 173-180.
- Wheeler E.A., Baas P., Rodgers S., 2007, « Variations in dicot wood anatomy: a global analysis based on the InsideWood database », *IAWA Journal*, 28, 3, p. 229-258.
- White G.N., Dixon J.B., 2002, « Kaolin–Serpentine Minerals », dans *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 389-414.
- Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B., Briles C.E., 2010, « Paleocological Perspectives on Fire Ecology: Revisiting the Fire-Regime Concept », *The Open Ecology Journal*, 3, 1.
- Whitlock C., Larsen C., 2001, « Charcoal as a Fire Proxy », dans SMOL J.P., BIRKS H.J.B., LAST W.M., BRADLEY R.S., ALVERSON K. (dirs.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*, Dordrecht, Springer Netherlands (Developments in Paleoenvironmental Research), p. 75-97.
- Whittle A.W. 1996 *Europe in the Neolithic: the creation of new worlds*, Cambridge University Press.
- Willcox G., Stordeur D., 2012, « Large-scale cereal processing before domestication during the tenth millennium cal BC in northern Syria », *Antiquity*, 86, 331, p. 99-114.
- Williams M., 1992, « Evidence for the dissolution of magnetite in recent Scottish peats », *Quaternary Research*, 37, 2, p. 171-182.
- Wilson C.A., Davidson D.A., Cresser M.S., 2009, « An evaluation of the site specificity of soil elemental signatures for identifying and interpreting former functional areas », *Journal of Archaeological Science*, 36, 10, p. 2327-2334.
- Wilson M.J., 1970, « A Study of Weathering in a Soil Derived from a Biotite-Hornblende Rock: I. Weathering of Biotite », *Clay Minerals*, 8, 3, p. 291-303.
- Wilson M.J., 1999, « The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives », *Clay Minerals*, 34, 1, p. 7-25.
- Wolde-Yohannes L., Wehrmann J., 1975, « Das Bodenbrennen GUIE in Äthiopien und seine Wirkung auf Boden und Pflanze », *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 94, 1, p. 288-300.
- Wolska E., Schwertmann U., 1989, « Nonstoichiometric structures during dehydroxylation of goethite », *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 189, 1-4, p. 223-238.
- Xu H., Guo X., Seaman L.A., Harrison A.J., Obrey S.J., Page K., 2019, « Thermal desulfurization of pyrite: An in situ high-T neutron diffraction and DTA–TGA study », *Journal of Materials Research*, 34, 19, p. 3243-3253.

Yuan H., Restuccia F., Rein G., 2021, « Spontaneous ignition of soils: a multi-step reaction scheme to simulate self-heating ignition of smouldering peat fires », *International Journal of Wildland Fire*, 30, 6, p. 440-453.

Yun T.S., Santamarina J.C., 2008, « Fundamental study of thermal conduction in dry soils », *Granular Matter*, 10, 3, p. 197-207.

Zaccone C., Rein G., D'Orazio V., Hadden R.M., Belcher C.M., Miano T.M., 2014, « Smouldering fire signatures in peat and their implications for palaeoenvironmental reconstructions », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 137, p. 134-146.

Zeist W. van, Spoel-Walvius M.R. van der, 1980, « A palynological study of the Late-glacial and the Postglacial in the Paris Basin », *Palaeohistoria*, p. 67-109.

Zennaro P., Kehrwald N., Marlon J., Ruddiman W.F., Brücher T., Agostinelli C., Dahl-Jensen D., Zangrando R., Gambaro A., Barbante C., 2015, « Europe on fire three thousand years ago: Arson or climate? », *Geophysical Research Letters*, 42, 12, p. 2015GL064259.

Zhan W., Guggenheim S., 1995, « The Dehydroxylation of Chlorite and the Formation of Topotactic Product Phases », *Clays and Clay Minerals*, 43, 5, p. 622-629.

Zhou L.P., Oldfield F., Wintle A.G., Robinson S.G., Wang J.T., 1990, « Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess », *Nature*, 346, 6286, p. 737-739.

Zhou W., Chen L., Zhou M., Balsam W.L., Ji J., 2010, « Thermal identification of goethite in soils and sediments by diffuse reflectance spectroscopy », *Geoderma*, 155, 3, p. 419-425.

Zohary D., Hopf M., Weiss E. 2018 *La domestication des plantes. Origine et diffusion des plantes domestiquées en Asie du Sud-Ouest, en Europe et dans le bassin méditerranéen*, traduit par Chauvet M., Arles, France, Actes Sud : Errance, 330 p.

Zvelebil M., Rowley-Conwy P., 1984, « Transition to farming in Northern Europe: A hunter-gatherer perspective », *Norwegian Archaeological review*.

TLFi, « Le Trésor de la Langue Française informatisé », *ATILF - CNRS & Université de Lorraine*.

Table des illustrations et des tableaux

Figure 1 : Cartographie synthétique de la colonisation néolithique en Europe (modifié d'après Bostyn, 2007). ...	7
Figure 2 : Chronologie de la néolithisation en Europe centrale d'après C. Jeunesse (2003).	8
Figure 3 : Analyse multivariée sur les proportions relatives des sources de subsistance alimentaire de sociétés sédentaires et nomades/semi-nomades (données de l'Ethnographic Atlas ; Murdock et al., 1999 ; Kirby et al., 2016).	12
Figure 4 : Photographie d'un champ en polyculture « ouvert » par brûlis (crédit : Bahuchet et Betsch, 2012). ...	15
Figure 5 : Diagramme pollinique « modèle » du déboisement par le feu selon Johannes Iversen (1956).	17
Figure 6 : Prise de vue du paléosol labouré (couche sombre) du Néolithique ancien d'Aubechies (crédits : C. Constantin dans K. Fechner, 2021, inédit)	21
Figure 7 : Photographie en plan d'un « foyer de déforestation » du Bronze final (ou de l'âge du Fer ?) mis au jour à Pagny-sur-Moselle dans le cadre de fouilles de sauvetages (crédits : Blouet et Faye, 1986)....	26
Figure 8 : Le modèle géoarchéologique des « chablis brûlés » d'après Goldberg et Macphail (2006, p. 195). ...	27
Figure 9 : Traces laissées par la carbonisation de souches d'arbres en place lors de feux naturels (crédits ci-dessous).....	29
Figure 10 : Exemple de solum complexe avec un horizon fortement teinté par évolution pédologique (crédits : Hauert et al., 2017 ; dans Gobat et Guenat, 2019, comm. pers.).....	31
Figure 11 : Les types d'incendies de végétation et leurs combustibles (d'après Scott, 2000 ; et Davis, 1959) ...	48
Figure 12 : Conductivité thermique (K_T) de quelques types de sols en fonction de la teneur en eau (θ) d'après Musy et Soutter (1991, p. 153).	48
Figure 13 : Exemples d'altérations critiques observées dans des incendies de surface.	51
Figure 14 : Les seuils de températures affectant les cendres et les éléments chimiques du sol (modifié d'après Bodí et al., 2014).....	53
Figure 15 : Coupe schématique illustrant la dynamique d'un incendie de tourbe (gauche) et profil type observé dans une tourbière nouvellement incendiée et après consolidation des produits (d'après Ellery et al., 1989)	54
Figure 16 : Différents exemples d'altérations thermiques pléistocènes des Channel Islands (Californie).	55
Figure 17 : Exemple de traces de combustion faisant suite à un brûlage de ceps de vignes sur une surface labourée (crédit : Alain Giosa).	59
Figure 18 : Représentation d'une variante finnoise de l'abattis-brûlis dite « Kaski » d'après Berndt Lindholm (1872).	62
Figure 19 : Représentation composite de la préparation d'un sol par abattis-brûlis pour la culture du lin dans la province de Vologda en Russie d'après Illarion Mikhaïlovitch Prianichnikov (1887-1890).	62
Figure 20 : Essartage à feu courant finnois avec roulage des fûts, d'après Wilhelm von Wright (1825).	63
Figure 21 : Champ essarté à feu courant en Finlande (Photographie Metla/Ismo Hyttinen ; nationalparks.fi)....	63
Figure 22 : Un abattis-brûlis expérimental en cours (crédits Manfred Rösch et al., 2017).	68

Figure 23 : Essai cartographique de l'écobuage « classique » en France et dans les îles Britanniques, vers 1800, d'après F. Sigaut (1975)	71
Figure 24 : Différentes variantes d'outils à écobuer (en partie repris de Sigaut, 1975).....	72
Figure 25 : Illustration de l'écobuage dans la Maison Rustique du XIX ^{ème} siècle, Encyclopédie d'agriculture pratique (C. Bailly, 1842 ; crédits : Internet Archive).....	73
Figure 26 : Illustrations de l'écobuage dans la littérature agronomique moderne et contemporaine.	76
Figure 27 : illustrations de différents types d'écobuages et de leurs produits en contexte extra-européen.	81
Figure 28 : Coupes schématiques de buttes <i>Guie</i> écobuées, avec leurs altérations thermiques.....	83
Figure 29 : Illustration du « déchaumage à la catalane » d'après Lasteyrie (1827, tiré de Sigaut, 1975).	87
Figure 30 : Schéma d'une meule de carbonisation vue en coupe, d'après von Berg (1860).	91
Figure 31 : Exemples d'emplois de plaques de gazon dans des structures de combustion artisanales.....	93
Figure 32 : Modélisation de la visibilité géoarchéologique potentielle des feux agro-sylvo-pastoraux et naturels.	103
Figure 33 : Carte des sites d'études.	108
Figure 34 : Durées de montée en chauffe du four à moufle.	115
Figure 35 : Contexte géologique et situation sur la carte de l'état-major de la fouille de Vaudes.	123
Figure 36 : Extrait de carte du XVIII ^{ème} siècle illustrant la plaine de la Seine et de l'Hozain, en amont de Troyes.	123
Figure 37 : Vue aérienne des traces rubéfiées de part et d'autre du Vieil Hozain, au centre de l'emprise fouillée, et sur le cadastre napoléonien de 1835 (d'après Guiblais-Starck et al., 2020).....	125
Figure 38 : Sélection de coupes géomorphologiques de l'opération de Vaudes « Les Trappes » (crédits : G. Dandurand ; INRAP ; modifié).....	126
Figure 39 : Prises de vues générales et coupes de l'unité rubéfiée de Vaudes.....	128
Figure 40 : Exemples de morphologies en plan interprétées comme des traces aratoires d'instruments tractés. 131	
Figure 41 : Morphologie planimétrique des traces rubéfiées de Vaudes.	133
Figure 42 : Unique chablis comblé de matériaux rubéfiés découvert à Vaudes, vue en coupe (cliché : A. Guiblais-Starck, INRAP).	134
Figure 43 : Scans des lames minces des traces rubéfiées et noirâtres de Vaudes (échelle centimétrique).	137
Figure 44 : Résultats granulométriques, taux de carbone organique et de CaCO ₃ des prélèvements de Vaudes.	138
Figure 45 : Compositions élémentaires majeures et traces (XRF) des prélèvements de Vaudes.	140
Figure 46 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons de Vaudes et des modèles de référence des minéraux identifiés (base de données COD).	144
Figure 47 : Courbes des premières dérivées des spectres de réflectance du domaine de lumière visible, des échantillons rubéfiés et encaissants (moyennes) et de l'échantillon VAU-59 de Vaudes.	147
Figure 48 : courbes d'évolution de la colorimétrie des unités encaissantes et des échantillons rubéfiés en fonction des températures de chauffe.	150

Figure 49 : Représentation graphique des résultats colorimétriques relatifs aux cuissons expérimentales des sédiments de Vaudes.....	150
Figure 50 : Évolution générale de la malacofaune classée d'après leurs affinités écologiques, et regroupées en trois ensembles stratigraphiques, à Vaudes (réalisé d'après les données brutes de Sophie Martin)..	153
Figure 51 : Distribution chronologique des probabilités radiocarbone obtenues pour l'opération de Vaudes...	157
Figure 52 : Transect et morphologie des principales unités lithologiques de la Combe d'Ain au niveau du lac de Chalain (d'après Campy, 1982).....	168
Figure 53 : Carte géologique du secteur du lac de Chalain.....	169
Figure 54 : Transect stratigraphique simplifié de la rive occidentale de Chalain (dessin d'après les inventaires de Pétrequin et al., 2000).....	172
Figure 55 : Localisation et contexte général des sondages et carottages des opérations de Chalain 2021-2022.	176
Figure 56 : Prise de vue générale du sondage 3 et de l'unité ocrée (profil Est) après fouille et ouverture complète.....	177
Figure 57 : Dessin stratigraphique du sondage 2 (SD2) de Chalain.....	179
Figure 58 : Dessins des unités pédo-sédimentaires des quatre profils du sondage 3 (SD3) de Chalain.....	180
Figure 59 : Photographies zénithales du décapage du sommet de l'unité 3 (Sondage 3).	182
Figure 60 : Planche photographique illustrant la morphologie macroscopique complexe de l'unité 3 de SD3.	183
Figure 61 : Photographie de l'unité 3 sur le profil Sud (non redressée) et détail correspondant du dessin stratigraphique (après redressement).	185
Figure 62 : Compositions élémentaires majeures et traces (p-XRF) et taux de matières organiques (PAF) de SD3.	191
Figure 63 : Rapports élémentaires (Ti/Al, Si/Ti, Al/Si, K/Ti, Rb/Ti, K/Rb, Mn/Ti, Fe/Ti et Fe/Al) des profils de SD3, MOR1 et MOR2.	193
Figure 64 : Graphique des deux premiers facteurs de l'analyse en composantes principales des compositions élémentaires des échantillons de Chalain.....	200
Figure 65 : Courbes granulométriques de l'unité 3 et ses encaissants.	204
Figure 66 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des sédiments glacio-lacustres U8 et MOR1-C.....	208
Figure 67 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des unités encaissantes U1, U2, U4, U5 et de trois échantillons représentatifs de l'unité ocrée U3 _{inf} [32-40], μ p-13 [U3.c] et μ p-19 [U3.b].	209
Figure 68 : Mesures de susceptibilité magnétique ($\times 10^{-5}$ uSI) du sondage 3.....	219
Figure 69 : Graphiques relationnels des paramètres colorimétriques des sols de Chalain.....	220
Figure 70 : Sélection de courbes moyennées des premières dérivées des spectres de réflectance du domaine de lumière visible, représentatives de U3 et de U4.	223
Figure 71 : Graphiques bivariés de la susceptibilité magnétique ($\times 10^{-5}$ uSI ; échelle logarithmique) en fonction (a) du rapport Fe/Ti et (b) du paramètre chromatique rouge a*.....	224
Figure 72 : Emplacements des blocs prélevés pour la réalisation des lames minces du sondage 3.....	228
Figure 73 : Scan des blocs indurés de l'unité illustrant les deux types de faciès de U3.	229
Figure 74 : Caractéristiques microscopiques des unités encaissantes U4 et U2.	230

Figure 75 : Traits rédoximorphes et formes du fer dans le faciès subcontinu de U3 (LM1 et LM3)	233
Figure 76 : Illustration de la micromorphologie des deux faciès de U3.	234
Figure 77 : Exemple de phyllosilicate récurrent de U3 fortement enrichi en oxy-hydroxydes de fer (image, cartographie de Fe, Al, et analyse élémentaire au MEB-EDS).	234
Figure 78 : Illustration de la micromorphologie complexe à la base de U3 et de la transition avec U4.....	235
Figure 79 : Analyse en composantes principales sur les compositions élémentaires des micro-agrégats du faciès granulaire de U3.....	237
Figure 80 : Représentation graphique des résultats colorimétriques des cuissons expérimentales des échantillons U5 et U4 de SD3.....	239
Figure 81 : Évolution de la susceptibilité magnétique des échantillons de U4 en fonction des durées et des températures des cuissons expérimentales.	241
Figure 82 : Sélection de diagrammes de diffraction aux rayons X d'échantillons de U4 chauffés à différents seuils de température et de durée.....	243
Figure 83 : Diagramme pollinique simplifié de SD3.	246
Figure 84 : Résultats du classement statistique (score de fonction canonique discriminante) des spectres du proche infrarouge des matières organiques du profil SD3 de Chalain.....	248
Figure 85 : Résultat de la cartographie magnétique du secteur du sondage 3 (a) et celui de la campagne 2022 (b).	250
Figure 86 : Illustration des phénomènes marquants identifiés sur l'anomalie ocrée-rubéfiée de SD7.....	251
Figure 87 : Synthèse stratigraphique des prospections géoarchéologiques de 2021 et 2022 de la rive ouest de Chalain.....	252
Figure 88 : Traces ocrées diffuses au sein d'une unité argileuse noirâtre verticale datée du Néolithique (SD7).254	
Figure 89 : Anomalies pédo-sédimentaires ocrées-rubéfiées mises au jour dans l'unité stratigraphique attribuée au Néolithique (fouille 2023).....	255
Figure 90 : Contexte environnemental général des écobuages médiévaux.	261
Figure 91 : Contexte archéologique et environnemental chronologique des premiers indices d'écobuage néolithiques.....	265
Figure 92 : Les marais de Saint-Gond sur une carte de 1635 représentés sous la forme d'un vaste plan d'eau (?).	268
Figure 93 : Carte géologique du secteur des marais de Saint-Gond.....	270
Figure 94 : Coupe géologique simplifiée et principaux types de sols de la Brie champenoise (figure tirée du Référentiel Régional Pédologique des Ardennes et de la Marne, Rigou, Vauthier, Muller et Party, 2017).	272
Figure 95 : Coupe stratigraphique simplifiée des Marais de Saint-Gond suivant le cours du Petit Morin (figure originale tirée de Damien, 2019, p. 124, modifiée et mise en forme par Jérôme Brenot ; in Martineau et al., 2022).	272
Figure 96 : Planche photographique illustrant la morphologie des traces de feu découvertes lors du diagnostic de Courjeonnet « Les Colinets » (crédits : Laurelut, 2003, INRAP).....	274

Figure 97 : Topographies, orthophotographies et cartes anciennes du bras de marais ayant livré des traces de feu.	276
Figure 98 : Dessins interprétatifs des coupes stratigraphiques de SD15, centrés sur les traces de combustion (Dessin : M. Imbeaux ; vectorisation : A. Dumontet ; mise en forme : C. Menbrivès).	280
Figure 99 : Photographie illustrée de la stratigraphie de la tranchée 15 où apparaissent les traces de combustion.	281
Figure 100 : Photographies de faits interprétés comme perturbations racinaires naturelles ou creusements de chablis.	284
Figure 101 : Spectre écologique des mollusques de l'échantillon de cendres de Saint-Gond (crédits : S. Granai, 2023).	286
Figure 102 : Carte de localisation des sites néolithiques du secteur des Marais de Saint-Gond.....	289
Figure 103 : Distribution chronologique des probabilités radiocarbone des sites néolithiques du sud de la Champagne crayeuse (dates recalibrées d'après les données brutes de Edinborough et al., 2021)...	290
Figure 104 : Régions naturelles et affleurements géologiques de la Grande Limagne, d'après L. Gachon (1963).	299
Figure 105 : Photographies en plan (a) et coupes (b, c, d, e) des niveaux rouges identifiés lors de l'opération préventive de l'A71 (crédits : Vernet et al., 2013 ; INRAP).	302
Figure 106 : Compilation des coupes stratigraphiques réalisées lors de l'opération de l'A71 où un NR a été identifié, et descriptions synthétiques des unités pédo-sédimentaires (compilé et modifié d'après Vernet et al., 2013; INRAP).	305
Figure 107 : Contextes chrono-stratigraphique et archéologique de la Limagne à l'Holocène ancien.....	308
Figure 108 : Carte des occurrences des niveaux rouges de Limagne et des sites archéologiques préhistoriques de la plaine de Limagne.....	311
Figure 109 : Diagramme palynologique de Marmilhat, modifié d'après Gachon (1963).....	314
Figure 110 : Frustules de diatomées observées dans les niveaux rouges de Limagne (lame-mince et MEB)....	315
Figure 111 : Scans des lames minces des niveaux rouges de Limagne.....	318
Figure 112 : Photographies de l'US 6 (PPL) montrant notamment des micro-lamines de résidus de végétaux fortement mélanisés et de nombreux restes phytolithaires parfois très concentrés (sommet de b). ...	319
Figure 113 : Principales caractéristiques structurales du NR à l'échelle méso- et microscopique.	320
Figure 114 : Divers résidus végétaux carbonisés et phytolithaires du niveau rouge.....	323
Figure 115 : Différents traits microscopiques ponctuels du niveau rouge.	325
Figure 116 : Phénomènes rédoximorphes et formes du fer dans le niveau rouge.....	326
Figure 117 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des micro-agrégats des NR et de leurs encaissants.	329
Figure 118 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons des NR de Limagne et des modèles de référence des minéraux identifiés (base de données COD).....	335
Figure 119 : Représentation spatiale des teintes (axes chromatiques a* et b* du système CIELAB) des échantillons rubéfiés et encaissants de Limagne.	338
Figure 120 : Courbes moyennées des premières dérivées des spectres de réflectance des échantillons rubéfiés et encaissants de Limagne.	339

Figure 121 : Schéma de la formation des NR de Limagne selon l'hypothèse de l'écobuage.....	348
Figure 122 : Situation sur le Puy de Dôme des traces rubéfiées indéterminées identifiées.	351
Figure 123 : Illustrations des anomalies rubéfiées du sommet du Puy de Dôme (crédits photographiques : Didier Miallier).	352
Figure 124 : Compositions élémentaires majeures et traces (p-XRF) des échantillons du sommet du Puy de Dôme.....	353
Figure 125 : Diagrammes de diffraction aux rayons X des échantillons du mont Dôme et des modèles de référence des minéraux identifiés.	355
Figure 126 : Représentation graphique des résultats colorimétriques des cuissons expérimentales des échantillons du mont Dôme.	357
Figure 127 : Carte des sites potentiels avec des vestiges de fourneaux agricoles (sites issus du dépouillement des rapports d'opérations archéologiques préventives).	366
Figure 128 : Illustration des structures type « foyers d'essartage » identifiées dans les rapports d'opérations archéologiques et interprétés comme des vestiges de fourneaux agricoles.....	369
Figure 129 : Vestiges de combustion découverts en bordure de berges d'un ancien îlot de l'Allier à Neuvy. ...	369
Figure 130 : Unités ocrées-rubéfiées identifiées dans les Marais de Dourges (crédits : Laurent Deschodt, comm. pers.)	370
Figure 131 : Exemples de niveaux d'argiles cuites dans les Marais Pontins.	374
Tableau 1 : Concordance et discordance entre les critères biologiques et les états économiques relatifs à « l'agriculture » d'après Testart (2012).	9
Tableau 2 : Part de l'origine de la subsistance alimentaire chez les sociétés nomades et semi-nomades (n = 381) et sédentaires (n = 806), d'après les données de l'Ethnographic Atlas (Murdock et al., 1999 ; Kirby et al., 2016).	11
Tableau 3 : Objets, concepts et emboîtement d'échelles des analyses systémiques des agricultures d'après Hubert Cochet (2011b).	37
Tableau 4 : Classification des systèmes d'utilisation du sol en agriculture selon Ester Boserup (1965 ; Mise en forme C. Menbrivès).....	39
Tableau 5 : Définition des techniques culturales temporaires et permanentes selon Roland Viader (2014 ; Mise en forme C. Menbrivès).....	40
Tableau 6 : Influences des pratiques de pâturage sur la fertilisation (d'après Sigaut et Morlon, 2008b, p. 43). ...	41
Tableau 7 : Classification des systèmes de culture comportant des défrichements (/déboisement) périodiques et des méthodes principales de préparation du champ associées, d'après François Sigaut (1975, p. 124-131 ; Formalisation et mise en forme C. Menbrivès).....	43
Tableau 8 : Proposition de classification schématique des principaux types de produits résultants des pratiques feux agro-sylvo-pastorales et des feux de végétation naturels	97
Tableau 9 : Synthèse des principales caractéristiques des différents feux agricoles recensés et de leurs produits potentiels relatifs.....	98

Tableau 10 : Liste des termes recherchés dans la base de données documentaire Dolia.	107
Tableau 11 : Bilan des analyses réalisées et présentées dans ce travail.	109
Tableau 12 : Statistiques descriptives relatives aux totaux élémentaires mesurés au p-XRF pour des sédiments préparés et des agrégats pédologiques bruts.	112
Tableau 13 : Synthèse des cortèges minéralogiques des échantillons rubéfiés et encaissants (< 200 µm) de Vaudes.	142
Tableau 14 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si.	146
Tableau 15 : Synthèse des résultats des analyses anthracologiques et carpologiques du site de Vaudes.	155
Tableau 16 : Résultats bruts des analyses p-XRF des différents échantillons de Chalain (n = 21).	186
Tableau 17 : Résultats des dosages de matières organiques, du carbone (C) total et de l'azote (N) total.	189
Tableau 18 : tableau comparatif entre les teneurs en éléments traces métalliques (chrome, nickel, cuivre, zinc) micro-régionales et celles du sondage 3.	197
Tableau 19 : Résultats des analyses granulométriques des échantillons de SD3.	204
Tableau 20 : Synthèse des cortèges minéralogiques identifiés du sondage 3 et du Calcosol morainique 1.	211
Tableau 21 : Résultats des mesures de susceptibilité magnétique et des paramètres colorimétriques CIELAB des échantillons pédologiques (SD3, MOR1, MOR2 et SD2) et des micro-prélèvements « µp » (SD3) de Chalain.	218
Tableau 22 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si des échantillons de Chalain.	227
Tableau 23 : Synthèse des cortèges minéralogiques identifiés dans les échantillons des cuissons expérimentales.	242
Tableau 24 : Tableau des résultats de l'étude anthracologique.	245
Tableau 25 : Datations radiocarbone associées aux anomalies pédo-sédimentaires ocrées et vertiques de Chalain.	253
Tableau 26 : Sélection d'assemblages minéralogiques des fractions argiles des formations géologiques qui affleurent à proximité des Marais de Saint-Gond (données tirées de Hatrival, 1988).	283
Tableau 27 : Compilations des opérations archéologiques renseignant des niveaux rougeâtres en Limagne. ...	301
Tableau 28 : Principaux sites épipaléolithiques et néolithiques référencés dans le secteur des NR.	312
Tableau 29 : Données pédologiques des échantillons de terre fine rubéfiés (< 2 mm).	316
Tableau 30 : Résultats des analyses élémentaires par fluorescence X des agrégats rouges et encaissants de Limagne.	328
Tableau 31 : Synthèse des cortèges minéralogiques des échantillons rubéfiés et encaissants (< 200 µm) de Limagne.	331
Tableau 32 : Résultats des extractions de Fe, Al et Si pour les échantillons rubéfiés de Limagne.	337
Tableau 33 : Principaux sites identifiés ayant livré des traces pédo-sédimentaires de morphologies similaires à celles de ce travail.	367

Table des matières

Remerciements	iii
Introduction	1
Partie 1 : Les débuts de l'agriculture en Europe centrale : Néolithique, modèles d'agriculture et témoins archéologiques	5
1. La néolithisation en Europe centrale : prise de vue générale	6
2. Le Néolithique : entre <i>techniques de cultures</i> et <i>économie agraire</i>	8
3. Agricultures néolithiques en domaine tempéré : modèles et données	13
3.1. Les principaux modèles archéologiques	13
3.2. Des données et des arguments éclectiques	15
4. Des traces archéologiques « primaires » de l'agriculture	20
5. Le feu : un agent primordial pour l'enregistrement des activités agropastorales préhistoriques ?	23
5.1. Les paléo-feux dans les archives pédo-sédimentaires « hors-sites » : manifestations et spécificités d'enregistrement	23
5.2. Les « foyers d'essartage »	24
5.3. Les « chablis brûlés »	26
5.4. Des modèles interprétatifs aux processus de formation : de nombreux questionnements	28
6. Problématique et démarche générale	32
Partie 2 : Les arts du feu en agriculture : vers une reconnaissance géoarchéologique	33
1. Systèmes agraires et techniques de culture : concepts, définitions et classifications	34
1.1. Le champ et sa fertilité : définitions	34
1.2. Les approches systémiques pour l'étude des sociétés agraires	35
1.3. Une classification économique des agricultures et quelques amalgames communs	37
1.4. Culture permanente, culture temporaire : antagonisme, complémentarité et techniques culturales	39
1.5. De l'utilité des sources agronomiques modernes	44
2. Les feux de végétation naturels	45
2.1. Le feu et les incendies naturels de végétation : mécanismes de la combustion et principes généraux	45
2.2. Dynamiques et sévérité des feux : généralités et exemples	49
2.3. Principaux produits et traces des feux naturels	50
2.4. Des vestiges de feux particulièrement sévères ?	54
3. Les feux anthropiques : du façonnage des paysages à la préparation des champs	56
3.1. Dans le paysage : les feux courants anthropiques	56
3.2. Le feu autour et dans les champs	58
3.3. L'abattis-brûlis	60
3.3.1. Définition générale et questions sémantiques	60
3.3.2. Procédés techniques	61

3.3.3. Les systèmes d'abattis-brûlis	66
3.3.4. Effets et produits des abattis-brûlis	67
3.4. L'écobuage ou fournelage	69
3.4.1. Définition générale et questions sémantiques	69
3.4.2. Procédés techniques	70
3.4.3. Des effets antinomiques des écobuages sur la terre ? Du point de vue des textes modernes à la documentation ethnographique et technique contemporaine	78
3.4.4. Quelques aspects agronomiques : produits et effets de l'écobuage d'après les pratiques et les expérimentations récentes	81
3.4.5. Des types d'écobuage à leurs produits : une question de point de vue ?	86
3.5. Le feu agricole « sous toutes ses formes » : techniques mixtes, variantes et antagonismes des feux courants et couvrants	88
3.6. La carbonisation en meule	91
3.7. Le brûlage des souches	94
3.8. Essai de classification et de discrimination des feux agricoles selon leurs produits potentiels	95
3.8.1. Les types de produits	95
3.8.2. Quelques réflexions et interrogations générales sur la visibilité archéologique potentielle des techniques agricoles du feu	99
3.8.3. Essai de modélisation	102
Partie 3 : Démarche et méthodes d'étude	105
1. Un premier inventaire issu de l'analyse de la littérature grise	106
2. Les sites d'étude	107
3. Méthodes d'analyses	110
3.1. Préparation des échantillons	110
3.2. Perte au feu	111
3.3. Analyses élémentaires (p-XRF)	111
3.4. Analyses minéralogiques (DRX)	112
3.5. Extractions et dosages des formes du fer, de l'aluminium, et du silicium	113
3.6. Susceptibilité magnétique	114
3.7. Spectrocolorimétrie	114
3.8. Cuissons expérimentales en laboratoire	115
3.9. Micromorphologie	116
3.10. Analyses au MEB-EDS	117
3.11. Anthracologie	117
3.12. Datations radiocarbone	118
Partie 4 : Vaudes « Les Trappes » (Aube) : un « brûlis » médiéval ?	119
1. Préambule	120
2. Contexte environnemental général	121
3. Résultats de l'opération archéologique de Vaudes	124
3.1. La séquence pédo-sédimentaire de référence	124
3.2. Résumé des résultats archéologiques de la fouille	128
4. Caractéristiques générales et morphologie des traces rubéfiées	129
4.1. Protocole général de la fouille des traces rubéfiées	129
4.2. Caractéristiques spatiales et morphologiques des traces rubéfiées	129
5. Résultats des caractérisations physico-chimiques	135

5.1. Analyse micromorphologique	135
5.1.1. Les unités encaissantes	135
5.1.2. Les faciès de l'unité rubéfiée	135
5.2. Granulométrie et teneur en carbone organique	138
5.3. Compositions élémentaires totales (XRF)	139
5.4. Caractérisation minéralogique (DRX)	141
5.4.1. Les unités encaissantes et le substrat	141
5.4.2. L'unité rubéfiée	142
5.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium	145
5.6. Spectres de réflectance	147
5.7. Susceptibilité magnétique	148
5.8. Cuissons expérimentales	148
6. Résultats des analyses paléo-environnementales	152
6.1. Étude malacologique	152
6.2. Études archéobotaniques	154
7. Chronologie et périodicité du phénomène	156
8. Discussion	158
8.1. Interprétation structurale des traces rubéfiées	158
8.2. Quelques remarques à propos des spécificités du processus de chauffe et de la taphonomie	160
8.3. Séquence événementielle autour de l'écobuage : un événement isolé ?	162
8.4. Place de l'écobuage dans son contexte archéologique	164

Partie 5 : Des « anomalies » pédo-sédimentaires médiévales et néolithiques en bordure du lac de Chalain (Jura).....165

1. Préambule	166
2. Contexte général : le lac de Chalain	167
2.1. Formation du lac et dynamiques hydrologiques	167
2.2. Le patrimoine archéologique	168
2.3. Chronologie générale des dynamiques pédo-sédimentaires péri-lacustres	170
2.4. Un secteur propice à la recherche de vestiges de paléo-feux	173
3. Démarche générale et contexte du secteur d'étude	174
3.1. Démarche générale	174
3.2. Contexte paysager actuel et récent du sondage 3	174
3.3. Les profils de comparaison	175
4. Les séquences pédo-sédimentaires : description générale et caractéristiques morphologiques	177
4.1. Les profils pédo-sédimentaires étudiés	177
4.1.1. Le profil de référence : description générale du sondage 3	177
4.1.2. Le secteur tourbeux : sondages 1 et 2	178
4.1.3. Les sols développés sur la moraine	179
4.2. Caractéristiques morphologiques et traits macroscopiques de l'unité ocrée et de ses encaissants	181
5. Résultats des caractérisations physico-chimiques	187
5.1. Compositions élémentaires totales (p-XRF et PAF)	187
5.1.1. Résultats relatifs à quelques constituants spécifiques	187
5.1.1.1. Calcium et magnésium	187
5.1.1.2. Matières organiques, carbone et azote	188

5.1.1.3. Phosphore	189
5.1.1.4. Soufre	190
5.1.2. Rapports élémentaires totaux.....	192
5.1.2.1. Aluminium, titanium et silicium	192
5.1.2.2. Potassium et rubidium	194
5.1.2.3. Fer et manganèse	195
5.1.3. Comportement de quelques éléments traces	196
5.1.4. Analyse statistique multivariée	199
5.2. Granulométrie.....	201
5.3. Caractérisation minéralogique (DRX).....	205
5.3.1. Identification des cortèges minéralogiques.....	205
5.3.1.1. Le matériau glacio-lacustre U8 et le Calcosol morainique.....	205
5.3.1.2. Les encaissants de U3	206
5.3.1.3. L'unité ocre	207
5.3.2. Synthèse des cortèges minéralogiques et implications relatives au développement des séquences pédo-sédimentaires	210
5.3.2.1. Le Calcosol morainique	210
5.3.2.2. Les encaissants de U3	212
5.3.2.3. L'unité ocre	213
5.4. Susceptibilité magnétique et spectrocolorimétrie	216
5.4.1. Susceptibilité magnétique.....	216
5.4.2. Colorimétrie	217
5.4.3. Spectres de réflectance	222
5.4.4. Relations entre la susceptibilité magnétique, la teinte rouge et le fer.....	223
5.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium.....	226
5.6. Caractérisations micromorphologiques et microscopiques.....	228
5.6.1. Les unités encaissantes U4 et U2	231
5.6.2. L'unité ocrée U3	231
5.6.3. Caractérisations élémentaires des micro-agrégats (p-XRF).....	236
5.7. Cuissons expérimentales.....	238
5.7.1. Colorimétrie	238
5.7.2. Susceptibilité magnétique.....	241
5.7.3. Minéralogie (DRX).....	242
5.8. Résultats des analyses paléo-environnementales	244
5.8.1. Étude anthracologique.....	244
5.8.2. Analyse palynologique.....	246
5.8.3. Analyse de la signature spectrale des matières organiques par SPIR.....	247
5.9. Du profil pédologique au bassin versant de Chalain-ouest : premiers résultats	249
5.9.1. Prospection géophysique	249
5.9.2. L'anomalie ocrée-rubéfiée du sondage 7	250
5.9.3. Des anomalies diachroniques : état des lieux des prospections géoarchéologiques et de la chronologie des anomalies ocrées	251
6. Discussion	256
6.1. Processus de formation de l'unité ocrée.....	256
6.2. Processus de formation des encaissants vertiques.....	257
6.3. Interprétation des anomalies pédo-sédimentaires.....	258
6.4. Les écobuages médiévaux.....	260
6.5. Les écobuages néolithiques	263

Partie 6 : Cendres et terres brûlées néolithiques aux marges des Marais de Saint-Gond (Marne)	267
1. Préambule	268
2. Contexte général	269
2.1. Contexte géographique, géologique et pédologique général	269
2.2. Des traces anciennes de feu dans les marais ?	273
3. Le site d'étude de Courjeonnet « Les Grands Prés »	275
4. Résultats de terrain et observations préliminaires	278
4.1. Résumé des résultats de la fouille de Courjeonnet « Les Grands Prés »	278
4.2. La séquence pédo-sédimentaire de la tranchée 15	278
4.3. Des perturbations naturelles	283
4.4. Caractéristiques morphologiques des traces de feu	285
4.5. Quelques premiers résultats d'analyse	286
4.5.1. Un échantillon de malacofaune	286
4.5.2. Recherche de phytolithaires	287
4.5.3. De rares charbons de bois	287
4.6. Attribution chronologique et contexte archéologique	288
5. Discussion	291
5.1. Dynamique pédo-sédimentaire d'un espace marginal des marais	291
5.2. Modalités de formation des traces de combustion	292
5.3. Interprétation et questionnements	294
Partie 7 : Des niveaux rouges énigmatiques dans la plaine de Limagne (Puy-de-Dôme)	297
1. Préambule	298
2. Contexte général et historique de découverte	300
3. Synthèse des observations générales et contexte archéologique et paléo-environnemental des Niveaux Rouges	302
3.1. Principales caractéristiques	302
3.2. Contexte pédo-sédimentaire d'apparition	305
3.3. Attribution chronologique	306
3.4. Contexte archéologique et paléogéographique	309
3.5. Quelques données palynologiques	313
3.6. Étude des diatomées d'un niveau rouge	315
4. Résultats	316
4.1. Données pédologiques générales	316
4.2. Micromorphologie et analyses microscopiques	317
4.2.1. Les unités pédo-sédimentaires encaissantes	317
4.2.2. Le Niveau Rouge	321
4.2.2.1. Principales caractéristiques morphologiques	321
4.2.2.2. Les résidus de végétaux brûlés	322
4.2.2.3. Autres traits microscopiques	324
4.2.3. Caractérisation MEB-EDS	327
4.3. Compositions élémentaires totales (XRF)	328
4.4. Caractérisations minéralogiques (DRX)	331
4.5. Formes du fer, de l'aluminium et du silicium	336
4.6. Colorimétrie et spectres de réflectance	337

5. Discussion	340
5.1. Modalités de formation des Niveaux Rouges de Limagne.....	340
5.1.1. Aspects généraux de la formation des NR	340
5.1.2. Aspects chronologiques et dynamiques	341
5.1.3. Particularités relatives à la combustion	342
5.1.4. Rubéfaction et évolution post-dépositionnelle	343
5.2. Interprétation : l'écobuage	344
5.3. Quelques remarques et hypothèses	346
Partie 8 : Un niveau rubéfié au sommet du Puy de Dôme (Puy-de-Dôme).....	349
1. Préambule	350
2. Contexte géomorphologique et caractères macroscopiques.....	350
3. Résultats.....	353
3.1. Compositions élémentaires totales (p-XRF).....	353
3.2. Caractérisation minéralogique (DRX).....	354
3.3. Cuissons expérimentales.....	356
3.4. Datation et cohérence pédo-chronologique.....	357
4. Discussion	358
Partie 9 : L'écobuage : identification géoarchéologique, première synthèse et nouvelles questions	361
1. Identifier les vestiges de fourneaux agricoles.....	362
1.1. Quelques critères diagnostics.....	362
1.2. Quelques problèmes rencontrés.....	364
2. Premiers résultats du dépouillement des archives archéologiques.....	365
2.1. Des « foyers d'essartages » aux traces de fourneaux.....	372
2.2. D'autres exemples hors de France.....	373
2.3. Des résidus de fourneaux agricoles en position secondaire ?.....	374
3. De nouvelles questions sur les agricultures préhistoriques.....	375
Conclusion	380
Bibliographie.....	386
Références antérieures à 1900	386
Références postérieures à 1900.....	387
Table des illustrations et des tableaux.....	457
Table des matières	464
Résumé	470

Résumé

L'identification des techniques agricoles, et plus précisément des méthodes de préparation du champ des agricultures anciennes est délicate. Généralement, elles ne peuvent qu'être déduites à partir de divers indices archéologiques intra-sites et de données paléo-environnementales hors-sites. Un des modèles de systèmes agraires qui est souvent présumé pour les sociétés préhistoriques, est celui de l'abattis-brûlis. Il s'agit d'une technique d'agriculture, qui vise à préparer une parcelle temporaire en forêt, par l'emploi d'un feu courant. Mais, bien que le feu engendre des produits qui peuvent perdurer à l'échelle plurimillénaire dans les archives pédo-sédimentaires, il est extrêmement difficile d'arriver à dissocier les événements liés aux feux de végétation d'origines naturelles de ceux anthropiques. Parallèlement, on recense dans la littérature archéologique de fréquentes mentions à des traces laissées par le passage du feu, qui dans certains cas correspondraient à des déboisements anthropiques, entrepris dans le cadre d'activités agro-pastorales. Ces traces, décrites comme des « *foyers de déforestation* » ou des « *chablis brûlés* », interprétées comme le résultat de la combustion de souches d'arbres, posent question. Dans ce travail, nous caractérisons à l'aide d'approches géoarchéologiques et archéométriques (XRF, DRX, micromorphologie, spectrométrie, cuissons expérimentales) des traces pédo-sédimentaires apparentées à ces phénomènes ou interprétées comme des événements catastrophiques de très haute énergie. Les résultats nous permettent de conclure que ces traces sont, pour l'essentiel, des résidus de terre cuite dans des structures de combustion à couvert, en élévation, redéposés et plus ou moins remaniés par des travaux aratoires. Nous réfutons l'hypothèse dite des « *foyers d'essartages* ». Nous les interprétons comme les vestiges de fourneaux en terre, résultant de pratiques d'écobuages (Portères, 1972 ; Sigaut, 1975). Cette technique agricole singulière, qui vise à cultiver les terres argileuses de bas-fonds humides est identifiée dès le Néolithique.

Mots-clés : écobuage, essartage, abattis-brûlis, rubéfaction, paléosols, archéopédologie, Néolithique, Moyen Âge

The identification of cultivation techniques, and more specifically of field preparation methods in ancient agriculture, is a difficult exercise. Generally, they can only be deduced from various intra-site archaeological evidence and off-site paleo-environmental data. One agrarian system often assumed for prehistoric societies is that of "slash-and-burn". This is an agricultural technique that aims to prepare a temporary plot of land in the forest, through the use of a running fire. However, although fire produces various remnants that can last for several millennia in soil-sedimentary archives, it is extremely difficult to disentangle events linked to vegetation fires of natural origin from those of anthropogenic origin. At the same time, there are frequent references in archaeological literature about traces left by the passage of fire, which in some cases correspond to anthropogenic deforestation undertaken as part of agro-pastoral activities. These traces, described as "deforestation fireplaces" or "burnt tree throw", interpreted as the result of the burning of tree stumps, raise questions. In this work, we use geoarchaeological and archaeometric approaches (XRF, XRD, micromorphology, spectrometry, experimental firing) to characterize pedo-sedimentary traces related to such phenomena or interpreted as very high-energy catastrophic events. The results lead us to conclude that these remains are essentially residues of earth fired in covered, raised combustion structures, redeposited and more or less reworked by agricultural activities. We reject the "deforestation fireplaces" hypothesis. We interpret them as the remnants of earthen furnaces, resulting from ecobuage practices (Portères, 1972; Sigaut, 1975). This singular agricultural technique, aimed at cultivating clay soils in wet lowlands, is identified since the Neolithic period.

Keywords: paring-and-burning, swidden cultivation, slash-and-burn, reddening, paleosols, archeopedology, Neolithic, Middle Ages