



UNIVERSITÉ PARIS 1
PANTHÉON SORBONNE

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne

UFR03 Histoire de l'art et archéologie – École doctorale d'archéologie

**De l'exploitation des minerais non ferreux aux
productions métalliques de la fin du Néolithique
au 1^{er} âge du Fer en Europe : formation et
caractérisation des réseaux d'échange**

Thèse présentée et soutenue publiquement le
18 septembre 2024

par Céline TOMCZYK

Composition du jury :

Directeur : Christophe PETIT, Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Co-directeur : Patrice BRUN, Professeur émérite, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Président du jury : Dominique GARCIA, Professeur, Inrap

Rapporteur : Gilberto ARTIOLI, Professeur, Université de Padoue

Examinatrice : Maryse BLET-LEMARQUAND, Ingénieure de recherche, CNRS

Examinatrice invitée : Rolande SIMON-MILLOT, Conservateur en chef du patrimoine, MC

Soutien financier

Ce travail de thèse a bénéficié du soutien financier :

De l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne :

- Contrat doctoral avec mission d'enseignement 2017-2021
- Contrat d'ATER 2021-2023
- Bourse de mobilité internationale 2019

De la fondation des Treilles¹ :

- Prix jeune chercheur 2022

Du PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie :

- Financement d'analyses isotopiques du plomb 2021

Du LabEx Dynamite

- Financement d'analyses isotopiques du plomb 2023-2024

¹ La Fondation des Treilles, créée par Anne Gruner-Schlumberger, a pour vocation de nourrir le dialogue entre les sciences et les arts, afin de faire progresser la création et la recherche. Elle accueille des chercheurs et des créateurs dans son domaine des Treilles (Var). www.fondationdestreilles.com

Remerciements

Il est souvent dit que la thèse est un long travail solitaire. Je ne peux que contredire ce fait tant je souhaite remercier de personnes qui ont apporté une pierre à l'édifice qu'est cette thèse de doctorat.

Je remercie tout d'abord les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail : Gilberto Artioli, Dominique Garcia, Maryse Blet-Lemarquand et Rolande Simon-Millot.

Merci à mes directeurs : Christophe Petit et Patrice Brun pour leur bienveillance et leurs conseils, pour les idées novatrices qu'ils ont su faire germer et, pour m'avoir appris que si l'archéologie n'est pas une science exacte, tout son charme réside dans sa part d'incertitude.

Merci à l'école doctorale (ED) 112 pour son aide dans la préparation de missions, et plus encore son soutien apporté aux doctorants lors des périodes de confinement.

Merci au laboratoire ArScAn dont les échanges lors des nombreux conseils de laboratoire m'ont permis de saisir toute la diversité des thèmes et problématiques d'un grand laboratoire de recherche en SHS. Merci à mon second laboratoire, le laboratoire AOrOc de l'ENS, où j'ai pris plaisir à échanger lors de séminaires.

Merci à toutes les institutions extérieures qui m'ont accueillie si chaleureusement et qui ont apporté une grande part de la touche d'exactitude à ce travail.

Merci à Bruno Tourlière, Éric Gloaguen et Anne-Marie Desaulty du BRGM de m'avoir confié des données minières pour ce qui n'était alors encore qu'un projet de thèse.

Merci au laboratoire de géosciences de l'Université de Padoue et plus particulièrement à Gilberto Artioli, Caterina Canovaro et Simone de m'avoir offert une première approche de la préparation d'échantillons pour analyse isotopique et pour leur accueil si chaleureux.

Merci à Catherine Chauvel et Pamela Gutiérrez de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Merci pour ces deux mois plus que formateurs me permettant d'être autonome pour la préparation et l'analyse d'échantillons en isotopie du plomb. Merci de m'avoir enseigné comment critiquer la précision des mesures et la cohérence des résultats.

Merci à l'IRAMAT et à Guillaume Sarah pour la formation à l'utilisation d'un LA-ICPMS et pour l'apport considérable de ses conseils pour ma compréhension des phénomènes de recyclage sur les compositions élémentaires.

Merci au musée du Quai Branly et en particulier à Fabrice Sauvagnargues et Céline Daher pour leur disponibilité pour l'emprunt du pistolet XRF. Peu de doctorants ont l'occasion d'emprunter si longtemps ce type de matériel si coûteux mais pourtant si utile pour guider l'implantation de fouilles d'ateliers métallurgiques et sélectionner des artefacts à échantillonner à l'aide de méthodes d'analyses plus poussées.

Merci à Jessica Legendre de m'avoir enseigné tous les secrets du MEB.

Merci à Bruno Desachy pour son aide précieuse pour créer des macros Excel.

Merci à ceux grâce à qui j'ai tant appris et échangé sur les chantiers de fouilles, qu'il s'agisse de mines et métallurgie du cuivre (équipe SISA 2019 : Gert Goldenberg, Phillipe De la Casa, Ruben et Mirco ; équipe Southeast Asian Lead Isotope Project : Oliver Pryce, Pira Venunan et Alongkot Fanka), de mines et de métallurgie du plomb-cuivre (PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie : Michel Maillé, Mehmet Şah), de folles prospections à la recherche d'étain avec Olivier Nillesse, ou de mines de plomb-argent perdues dans les « bartas » aveyronnaises (PCR Le Minier : Nicolas Minvielle Larousse, Alain Bernat, Jérôme Belmon, Lucille Brevet, Sarah Laurent). Merci à Clément Denizeau et Barbar de m'avoir formée à la spéléologie et à la délicate élaboration de nœuds de fusion. Enfin, immense merci à ceux par qui tout cela a commencé : merci à Hélène Collet et à Bruno Ancel qui m'ont transmis avec passion le virus de l'archéologie minière.

Merci aux membres de la SAFEMM pour nos échanges passionnés sur les mines et la métallurgie. Merci au réseau MSK de me permettre de m'engager pour mettre en avant la recherche en milieux souterrains et l'intérêt de la pluridisciplinarité des approches dans ce type de contexte.

Merci à toute l'équipe enseignante des UFR 03 (histoire de l'art et archéologie) et 08 (géographie) de Paris 1 avec qui j'ai pris plaisir à enseigner. Merci tout particulièrement à Barbara Sémel, à qui je dois tant de mes compétences pédagogiques : on ne nous apprend pas à enseigner en thèse mais, ces 230 h de cours dispensées à tes côtés m'ont appris combien nous pouvons apporter aux étudiants ! Tu m'as donné plus que jamais le goût de transmettre et je ne t'en remercierais jamais assez.

Un immense merci aux collègues de la 207D d'avoir assuré le maintien de mon taux vital de caféine : Alain Giosa, Annelise Binois, Gabriel Teurquety, Clément Menbrivès et Giulia Nicatore. Je n'oublierai jamais les fous rires et les missions improbables réalisées avec vous. Partager votre bureau aura été une aventure incroyable et a ensoleillé le ciel de Nanterre !

Merci à tous ceux, doctorants pour beaucoup devenus jeunes docteurs, avec qui j'ai refait le monde dans les couloirs de la MSH : Kévin Costa, Camille Gorin, Prune Sauvageot, Paul Bacoup, Marine Vanlandeghem, Ségolène Vandavelde, Béline Shi, Samson Tokannou, Jérôme Spiesser, Pauline Bombled, Thomas Delbey, Bastien Rueff, Clara Filet, Benjamin Jagou, Alex Bezut, Manon Dessaint, Valentina Sala, Aurélie Artizzu, Thomas Lagane, Audrey Foutet, Julien Ponchelet, Olivier Brunet, Agathe Riou, Manon Banoun, Carine Harivel (et tous ceux et celles que j'oublie).

Enfin, merci à ceux et celles qui, complètement extérieurs au monde de la recherche, ont su m'avoir fait sortir la thèse de la tête : merci à mes amis et à ma famille.

Table des matières

Soutien financier	1
Remerciements	3
Table des matières	5
Introduction	7
Première partie Où et comment sont produits les métaux ?	9
I/ Introduction : comment produire du bronze ?	10
I/1 <i>Des métaux inégalement répartis en Europe</i>	10
I/2 <i>Des minéraux primaires affectés par des processus post-génétiques</i>	16
I/3 <i>Du cuivre puis du bronze ?</i>	19
II/ Quels indices pour localiser d'anciennes zones minières ?	27
II/1 <i>Recensement des sites d'extraction</i>	27
II/2 <i>Indices indirects de la présence de mines</i>	55
II/3 <i>Indices peu probants de la présence d'exploitations minières</i>	57
II/4 <i>Conclusion : pourquoi est-il difficile de retrouver d'anciennes zones minières ?</i>	61
III/ Recensement des exploitations et précisions des données recueillies.....	63
III/1 <i>Travaux précédents recensant les zones d'exploitation minière</i>	63
III/2 <i>Création de la base de données</i>	68
III/3 <i>Critique des données récoltées</i>	74
III/4 <i>Cartes de répartition selon la fiabilité des données sources</i>	76
IV/ Dynamique d'exploitation minière au cours de la Protohistoire	81
IV/1 <i>Une augmentation du nombre de mines en activité ?</i>	81
IV/2 <i>Zones de production de métaux entre 5000 et 400 av. J.-C.</i>	89
V/ Discussion de la première partie	115
V/1 <i>Questions émergeant de la localisation des exploitations</i>	115
V/2 <i>Des limitations techniques expliquant la localisation des mines ?</i>	120
V/3 <i>Évolution de la quantité de cuivre produite en Europe de l'Ouest</i>	136
V/4 <i>Des rythmes de production différents ?</i>	161
V/5 <i>Degrés de spécialisation de la production de cuivre</i>	172
Conclusion de la première partie	195
Deuxième partie Exportation des productions de cuivre et de plomb	199
I/ Introduction : des échanges interconnectant les sociétés dès le Néolithique.....	200
I/1 <i>Des échanges économiques et culturels dès le Néolithique</i>	200
I/2 <i>L'âge du Bronze en continuité avec le Chalcolithique</i>	203
II/ Les isotopes du plomb pour tracer la provenance d'artefacts : apports et limites	208
II/1 <i>Comment tracer la provenance d'un artefact cuivreux protohistorique ?</i>	208
II/2 <i>Limites des études de provenance s'appuyant sur les isotopes du plomb</i>	214
II/3 <i>De nombreuses limites à la détermination des provenances</i>	221

III/	Élaboration de bases de données de signatures isotopiques	239
III/1	Base de données de signatures de minerais	239
III/2	Base de données de signatures isotopiques d'artefacts	253
III/3	Sélection des signatures de minerais pour le traçage de provenance	268
IV/	Tracer les provenances à l'aide de statistiques multivariées	286
IV/1	État de l'art des méthodes d'étude de provenance.....	286
IV/2	Protocole retenu	299
IV/3	Critique du traitement statistique appliqué	314
V/	Résultat : cartes des exportations par régions productrices et par période.....	334
V/1	Les grandes régions productrices de cuivre exportent-elles à longue distance ? ...	367
V/2	Axes d'exportations supposés pour la période 3800-3000 av. J.-C.	370
V/3	3000-2000 av. J.-C., période Chalcolithique/Néolithique	374
V/4	2000-1600 av. J.-C. Bronze ancien.....	378
V/5	1600-1300 av. J.-C. Bronze moyen.....	387
V/6	1300-800 av. J.-C. Bronze final	394
V/7	800-450 av. J.-C. Premier âge du Fer.....	398
VI/	Discussion de la deuxième partie : Certains types d'artefacts parcourent-ils des distances plus importantes ?	401
VI/1	Du plomb échangé sur de moins grandes distances que le cuivre : pourquoi ?	401
VI/2	Certains types d'artefacts ont-ils été échangés sur de plus grandes distances ? ...	403
VI/3	Distances d'exportation et type de transport.....	408
	Discussion générale : de grands axes d'échange reliant des zones produisant des métaux différents ?	415
I/1	La recherche de métaux différents ?.....	415
I/1.a	Des alliances permettant des productions nouvelles ?	415
I/1.b	Une spécialisation régionale liée au tracé des axes d'échange ?	417
I/2	Quatre grandes régions aux échanges préférentiels	418
I/2.a	Des relations de dépendance ?.....	418
I/2.b	Des régions très interconnectées ?	420
I/2.c	Des axes à très grande distance difficilement perceptibles ?.....	421
I/3	Perspectives : comment améliorer le tracé des axes d'exportation ?	423
I/3.a	Reconnaissance des signatures correspondant à des mélanges	423
I/3.b	Nécessité de réaliser des analyses dans des régions ciblées	426
I/3.c	Des développements géochimiques pour affiner les hypothèses de provenance ...	426
	Conclusion générale	429
	Références bibliographiques	432
	Table des illustrations.....	494
	Liste des tableaux	509

Introduction

Enjeux de ce travail de recherche

Entre la fin du Néolithique et la fin de l'âge du Bronze, l'Europe connaît un changement socio-économique sans précédent. C'est en effet à cette période (entre 5000 et 450 av. J.-C.) qu'apparaissent les premiers métiers, le commerce à longue distance mais aussi les premières élites et organisations étatiques. L'intensité des échanges entre les groupes culturels d'Europe et du Proche-Orient est telle que les termes « globalisation », « bronzisation » ou encore « système monde » ont été utilisés pour qualifier l'ampleur de ce phénomène.

La maîtrise des métaux est l'un des éléments fondateurs de cette mutation profonde des sociétés humaines à tel point que cette période a été nommée âge des Métaux. L'export de cuivre et d'étain vers des régions qui en sont géologiquement dépourvues demande la mise en place de zones de production et de circuits d'échanges structurés réguliers. Néanmoins, si l'ampleur de ces échanges ne fait aucun doute (en témoigne la présence de perles égyptiennes ou encore de gravures représentant des lingots chypriotes en Scandinavie), il est encore complexe de définir précisément les interconnexions entre les différentes régions d'Europe : quelles sont les régions qui échangent entre elles ? À quelle période chronologique précise ont lieu ces échanges ? Quelle est la fréquence des échanges entre l'Europe et le Proche-Orient ?

Un sujet de recherche aussi original que celui-ci ne peut pas donner lieu à une introduction classique qui dresserait, comme il se doit, un état de l'art exhaustif sur les recherches existantes tant en ce qui concerne la localisation des gisements européens que sur la nature et la complexité des échanges entre le Néolithique et l'âge du Bronze. Pour orienter le lecteur, de grandes introductions seront donc proposées au début de chaque grande partie du manuscrit.

En outre, les minéralisations et les échanges ne sont pas les seuls à avoir fait l'objet de nombreuses études. La géochimie isotopique du plomb n'a cessé de se développer depuis soixante ans afin d'émettre des hypothèses sur l'origine du cuivre ou du plomb composant un artefact. Toutefois, les études de provenance demeurent à ce jour très complexes car : (i) les signatures de certaines régions sont trop proches pour être individualisées, (ii) certaines régions sont sur-échantillonnées et d'autres sous-échantillonnées voire non référencées, (iii) les artefacts peuvent avoir fait l'objet de recyclages et/ou être issus du mélange de minerais provenant de plusieurs gisements. Ces limites sont telles que les méthodes actuelles de traçage sont régulièrement critiquées et parfois considérées comme insuffisantes. Ce constat est en effet édifiant : si des dizaines de milliers d'artefacts protohistoriques ont été analysés en isotopie du plomb, très peu présentent des provenances clairement identifiables.

L'enjeu de ce travail de thèse est de proposer une nouvelle méthodologie concernant les études de provenance, en se concentrant non pas uniquement sur les artefacts, mais en partant de l'identification et de la caractérisation précise des mines elles-mêmes, y compris sous l'angle géochimique. En effet, pour déterminer la provenance d'un artefact en cuivre et/ou en plomb en utilisant les isotopes du plomb, il est nécessaire de sélectionner des régions de production susceptibles d'avoir fourni le métal contenu dans l'objet étudié. Or, il est difficile de sélectionner ces régions faute d'une synthèse exhaustive de la localisation des zones minières exploitées en Europe au début de la Protohistoire. Où étaient localisées les mines et quelle était leur durée d'exploitation ? Les grandes régions productrices de métaux étaient-elles les mêmes durant près de 4000 ans ? Les zones minières produisaient-elles toutes du métal en quantités comparables ? Y avait-il des limites techniques à l'implantation des mines et aux pratiques métallurgiques ?

Il est crucial de répondre à ces questions pour identifier des régions de production probables. Si nous ne connaissons pas bien les principales zones de production, nous risquons de choisir les mauvais gisements et de proposer des hypothèses de provenance incorrectes. La collecte des données doit également interroger plusieurs facteurs pouvant influencer notre perception des échanges. Est-il possible de tracer les productions de toutes les régions minières exploitées ? Existe-t-il des régions dont la provenance est plus facile à déterminer ?

Une fois tracées, les exportations de cuivre et de plomb au départ des zones minières permettent de se poser de nouvelles questions. Quelles régions échangeaient préférentiellement entre elles ? Quand apparurent et se développèrent les échanges de cuivre à grande distance ? Les échanges se faisaient-ils préférentiellement par voies terrestres et fluviales ou maritimes ? Les régions se spécialisaient-elles dans la production du métal dont elles pouvaient tirer le plus de profit ? Quelle était la part du recyclage dans la production de métal ? Y avait-il des régions où les mélanges de sources de métal étaient plus fréquents ?

Annonce du plan

Nous diviserons notre propos en deux grandes parties, chacune étant introduite par une section propre permettant de poser le cadre des études et l'état de l'art des connaissances. La première partie du manuscrit est dédiée au recensement et à la caractérisation des zones minières et la seconde à la détermination de provenance en utilisant les isotopes du plomb.

Dans la première partie, nous chercherons à identifier les indices caractéristiques de la présence d'exploitations minières pour le cuivre, l'étain, l'or et le plomb-argent. Nous détaillerons la construction d'une base de données recensant ces informations, critiquerons l'abondance des sites documentés pour chaque métal et observerons les variations du nombre de sites. Nous proposerons un découpage en périodes en phase avec les dynamiques minières à l'échelle de l'Europe. Nous discuterons ensuite la localisation des mines par période chronologique et nous chercherons à l'expliquer dans une discussion ouvrant sur le type de minerai exploité et les techniques employées par grandes régions. Nous tenterons de quantifier les productions de cuivre issues des différentes zones minières et réfléchirons au degré de spécialisation des tâches de chaque région productrice de cuivre.

La deuxième partie de ce manuscrit visera à étudier le devenir des productions minières pour le cuivre et le plomb. Pour ce faire, nous avons compilé des données de signatures isotopiques du plomb de minerais et d'artefacts. Nous listerons les méthodes permettant de comparer la signature d'un artefact à celle d'une zone minière et proposerons un traitement statistique pour analyser les milliers de données compilées. Nous testerons la validité de ce traitement à travers des cas d'étude. Des cartes d'exportation des productions seront tracées par zones minières, et nous discuterons des changements observés dans les axes d'exportation à l'échelle de l'Europe.

Enfin, nous confronterons les hypothèses émises en première partie aux résultats de cette seconde partie, afin d'affiner notre compréhension de l'organisation des productions minières et de leur exportation.

Première partie

Où et comment sont produits les métaux ?

I/ Introduction : comment produire du bronze ?

L'âge du Bronze se caractérise par l'utilisation répandue du bronze dans la fabrication d'armes, de parures mais aussi d'outils. La disponibilité et la circulation du cuivre et de l'étain constituant le bronze, ont joué un rôle central dans la dynamique des échanges et des interactions entre les sociétés de cette époque. Cependant, les ressources métalliques ne sont pas uniformément réparties à travers le continent européen mais se concentrent dans des zones spécifiques.

I/1 Des métaux inégalement répartis en Europe

La répartition spatiale des ressources minérales est étroitement liée à l'histoire géologique de l'Europe. Les processus géologiques qui ont façonné le continent, tels que les orogénèses, la tectonique des plaques et les événements magmatiques, ont joué un rôle fondamental dans la formation et la localisation des gisements métallifères.

I/1.a Concentration des métaux dans la croûte terrestre

L'Europe est le résultat de l'interaction de plusieurs plaques tectoniques au cours de l'histoire géologique. Ces plaques sont les morceaux rigides de la croûte terrestre et de la partie supérieure du manteau qui flottent et se déplacent sur une couche plus ductile appelée asthénosphère. Les plaques tectoniques peuvent rentrer en collision avec d'autres plaques (on parle alors de phases de compression, conduisant à la formation de supercontinents) ou encore se scinder en deux (dans des phases dites d'extension qui peuvent conduire à la création d'un océan).

Ces grands cycles de tectonique des plaques ont été explicités par Wilson (1966) et influencent la répartition des ressources minérales (Sawkins, 1990 ; Richards, 2014 ; Palinkaš *et al.*, 2016).

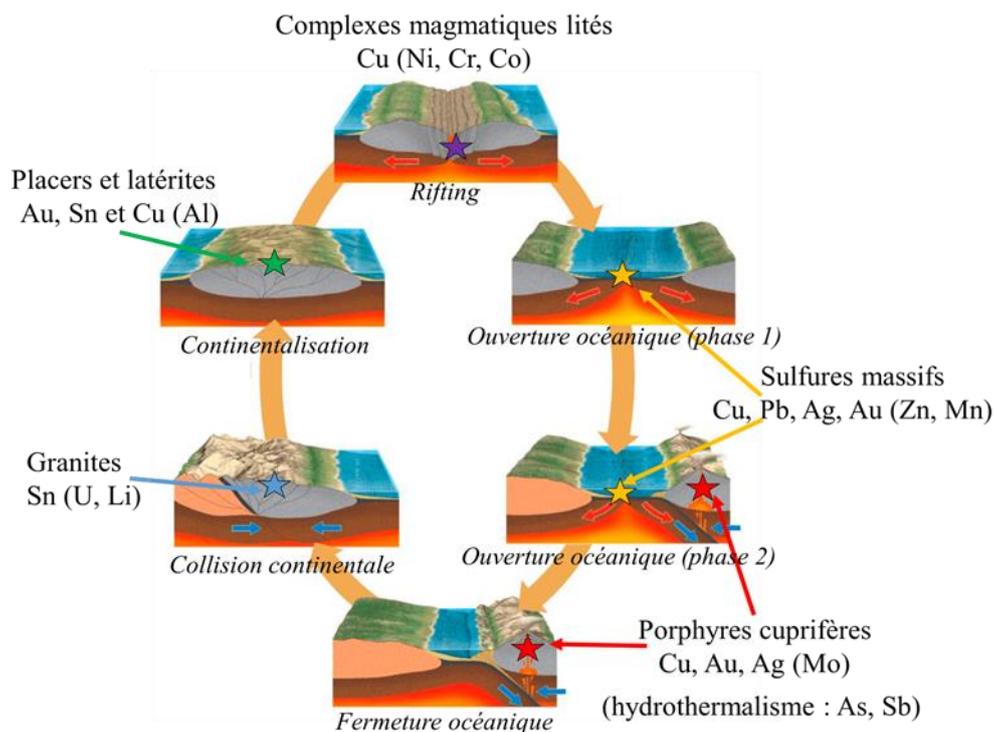


Figure 1 : Processus métallogéniques liés aux cycles de Wilson. Les principaux métaux exploités à la Protohistoire ont été indiqués, les métaux entre parenthèses ne sont pas (ou très peu dans le cas du zinc (Zn)) exploités aux périodes anciennes.

Lorsqu'une plaque commence à se scinder en deux blocs (étoile violette dans la Figure 1), du magma remonte vers la surface et refroidit lentement ce qui peut donner naissance à des gisements de cuivre (Cu), de nickel (Ni), de chrome (Cr) ou encore de cobalt (Co). Ces gisements sont dits lités car les minéraux métallifères se déposent en couches intercalées entre des couches de minéraux magmatiques.

L'écartement plus conséquent de ces plaques conduit à la création d'un océan et à la formation de grandes chaînes volcaniques sous-marines : les dorsales océaniques. L'eau de mer pénètre dans les fissures de la croûte océanique près de la dorsale, où elle est chauffée par le magma sous-jacent. Cette eau chaude et riche en minéraux dissous remonte à la surface par des cheminées hydrothermales (aussi appelées "fumeurs noirs" ou "fumeurs blancs"). Des minéraux sulfurés précipitent alors et forment des sulfures massifs riches en métaux comme le cuivre, le plomb (Pb) mais aussi l'or (Au) et l'argent (Ag) (étoiles jaunes de la Figure 1).

Lorsque les plaques océaniques créées par ces phénomènes d'extension rencontrent d'autres plaques, il se forme des zones de subduction où une plaque plonge sous une autre. Des mélanges de magmas ont lieu et les chambres magmatiques contiennent de grandes quantités de minéraux disséminés dans une matrice rocheuse fine, souvent avec des textures porphyriques (grands cristaux dans une matrice fine) d'où le nom de ces gisements : porphyriques. Ils sont riches en métaux comme le cuivre, l'or, l'argent ou encore le molybdène (Mo) (étoiles rouges dans la Figure 1).

Les zones de convergence où les plaques se rapprochent tant qu'elles entraînent la formation de chaînes de montagnes peuvent conduire à la formation de magmas acides, riches en silice, très propices à la précipitation de minéraux contenant de l'étain (Sn) (étoile bleue).

Enfin, les gisements présents dans les continents ainsi formés peuvent s'altérer (étoile verte) et créer des placers (gisements dans les cours d'eau) où peuvent se concentrer l'or et l'étain. L'altération supergène de gisements permet de reconcentrer le cuivre ou encore l'aluminium (Al) dans des couches métriques au-dessus des gisements initiaux.

Enfin, les processus associés à la tectonique des plaques, tels que la subduction, le magmatisme et le métamorphisme, peuvent favoriser la migration et la concentration des métaux dans la croûte terrestre. Des fluides hydrothermaux associés aux zones de subduction peuvent transporter des métaux à partir de la croûte océanique subduite vers la croûte supérieure, où ils peuvent former des gisements métallifères riches en arsenic (As) et antimoine (Sb).

I/1.b De nombreux contextes favorables à la précipitation de cuivre

Chaque métal se concentre dans des configurations géodynamiques précises. Le cuivre est l'un des métaux présentant le plus de configurations qui lui sont favorables, ce qui explique que l'on dénombre, en Europe, six types de gisements cuprifères (Cassard *et al.*, 2015). Chacun de ces types se forme à un moment différent du cycle de Wilson et présente des caractéristiques qui lui sont propres notamment en termes de teneur en cuivre, de morphologie et de taille du gîte (Tableau 1).

Phase	Type de gisement	Teneur en cuivre	Morphologie	Taille	Texture
Rifting à océanisation	Mafique	~0,5-3%	Lentilles de sulfures, mais aussi portions massives	métriques	Disséminée
Ouverture à fermeture océanique	Sulfures massifs Volcanogènes	1-10 % Cu	Corps béchique à <i>stockwork</i> surmonté d'un amas massif	métrique	Massive
	SEDEX (plus rarement MVT)	~0,5 %Cu	Corps tabulaires s'alignant avec la roche sédimentaire hôte	métrique	Massive
	Porphyres	< 1,5 %Cu	Partie sommitale d'une chambre magmatique	kilométrique	Disséminée
Fermeture océanique à collision	Skarns	< 0,8 %Cu	Contact roche mafique-roche carbonatée	décimétrique à métrique	Massive
Continentalisation	Sédimentaires ²	2-3,6 %Cu	Veinules millimétriques à centimétriques suivant la schistosité	kilométrique	Massive

Tableau 1 : Synthèse des différents types de gisements de cuivre primaires, d'après Arndt et Ganino (2009)³.

Certaines périodes de l'histoire de la Terre ont été très particulièrement propices à la mise en place de gisements. Par exemple, de nombreux gisements de cuivre sont datés du Crétacé qui est une période de forte activité magmatique où se forment de nombreux gisements de sulfures massifs que l'on trouve notamment à Chypre (Martin *et al.*, 2019), dans le sud de la péninsule Ibérique (Martin-Izard *et al.*, 2016 ; Almodóvar *et al.*, 2019) mais aussi en péninsule d'Oman (Swiridiuk et Close, 2004) ou encore en Iran (Aftabi *et al.*, 2006).

Le lien entre activité magmatique et présence de gisements de cuivre (mais aussi d'étain) est indéniable et s'explique par les processus conduisant à la concentration de ces métaux.

I/1.c Peu de magmas favorables à la précipitation d'étain

Bien que le cuivre et l'étain se forment dans des conditions et à des périodes différentes, ils partagent un point commun avec tous les métaux : ils sont initialement issus d'un magma.

Dans le détail, chaque métal possède des affinités magmatiques guidant les réactions géochimiques à l'origine de sa concentration. Ainsi, le cuivre se concentre dans la phase gazeuse (riche en CO₂)⁴ des magmas (Kokh *et al.*, 2016). Si cette phase gazeuse est enrichie en soufre, le cuivre y sera concentré et des minéraux de cuivre sulfurés (dits minéraux primaires) pourront se former. L'étain ne possède quant à lui pas d'affinité pour le soufre mais s'associe à l'oxygène⁵ ; de ce fait le magma initial doit donc être pauvre en soufre (Cassard *et al.*, 2015). Or, plus la température est élevée et plus les magmas contiennent de soufre (Figure 2). Inversement, plus la température d'un magma est faible, moins ce dernier contient de soufre et plus il contient d'oxygène. Le cuivre et l'étain ne se concentrent donc pas dans les mêmes types de magmas : les gisements d'étain sont associés aux magmas granitiques (qui se forment en contexte de collision continentale) et les gisements de cuivre aux magmas (ultra)mafiques et intermédiaires (qui se forment en contexte océanique).

0

² Lorsque le cuivre d'anciens gisements (magmatiques comme hydrothermaux) est reconcentré dans des sédiments, on parle de gisements sédimentaires.

³ *Sedimentary Exhalative Deposits* (SedEx) et *Mississippi Valley Type* (MVT)

⁴ D'autres métaux de base possèdent, en revanche, une affinité plus forte pour la phase fluide des magmas.

⁵ Le minerai primaire d'étain (la cassitérite : SnO₂) est un oxyde.

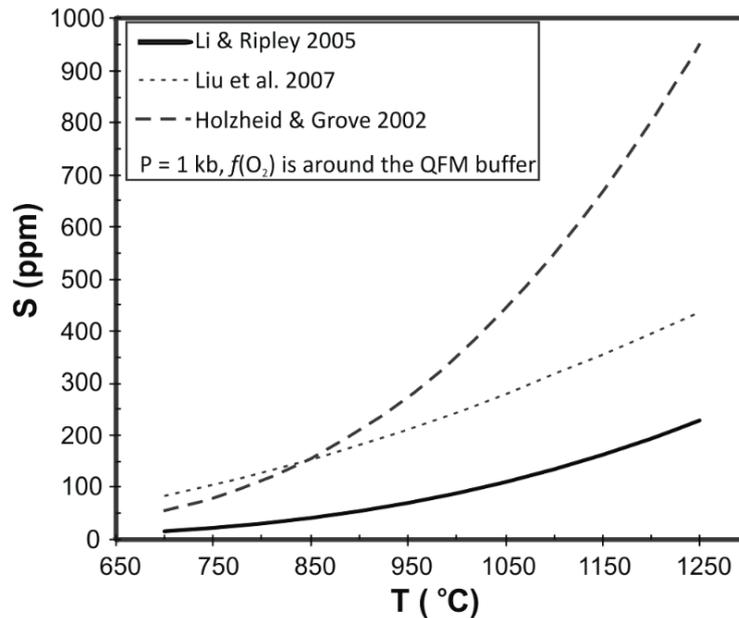


Figure 2 : Solubilité du soufre en fonction de la température (dans un granite à la pression constante de 1 kbar).
Source : Yang, 2012.

Cette différence se traduit spatialement : certaines régions sont majoritairement cuprifères (comprenant de nombreux gisements de cuivre) et d'autres majoritairement stannifères (riches en étain). Les régions et plus encore les mines, présentant ces deux ressources sont particulièrement rares et correspondent à des zones ayant connu deux épisodes minéralisateurs successifs (soit une succession de périodes de compression et d'extension des plaques tectoniques) ⁶.

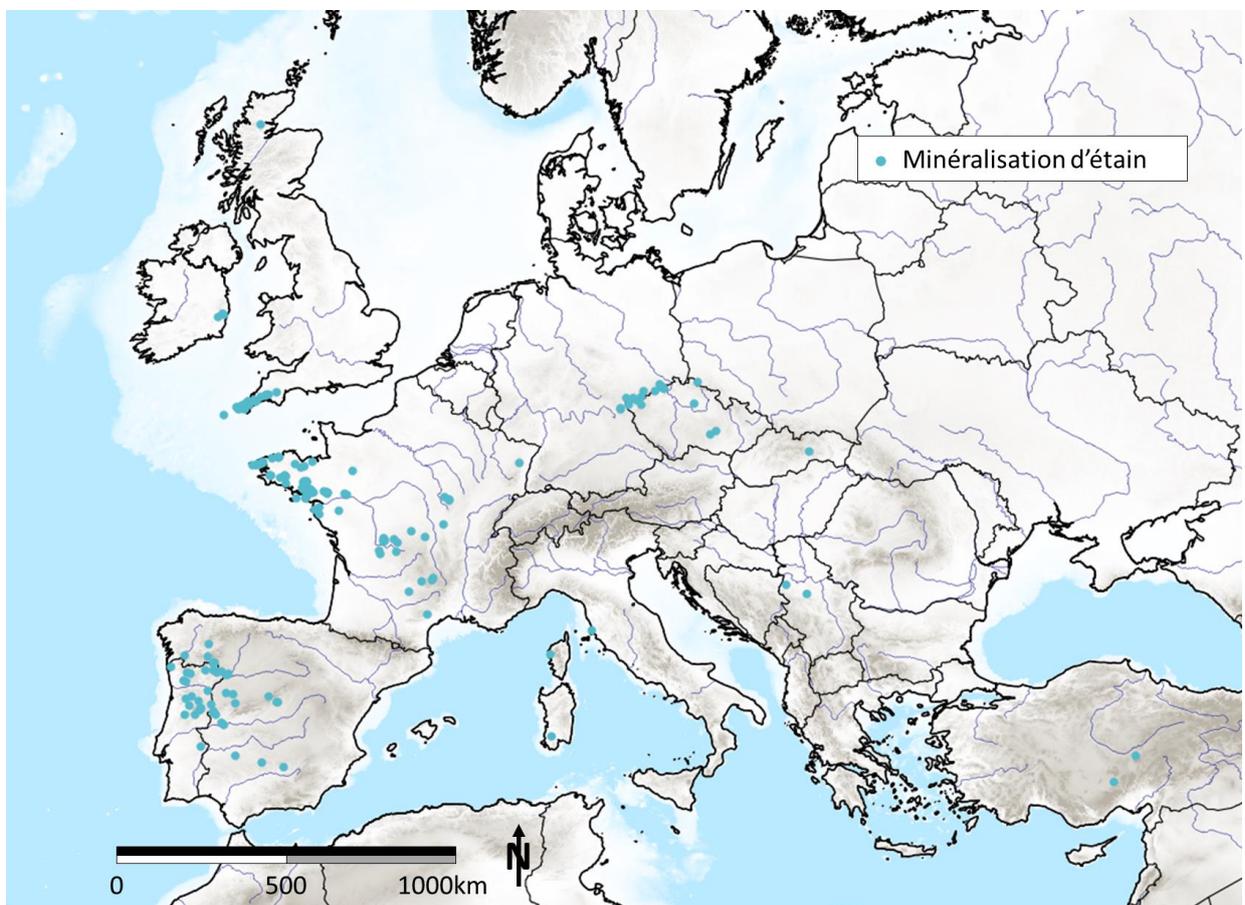
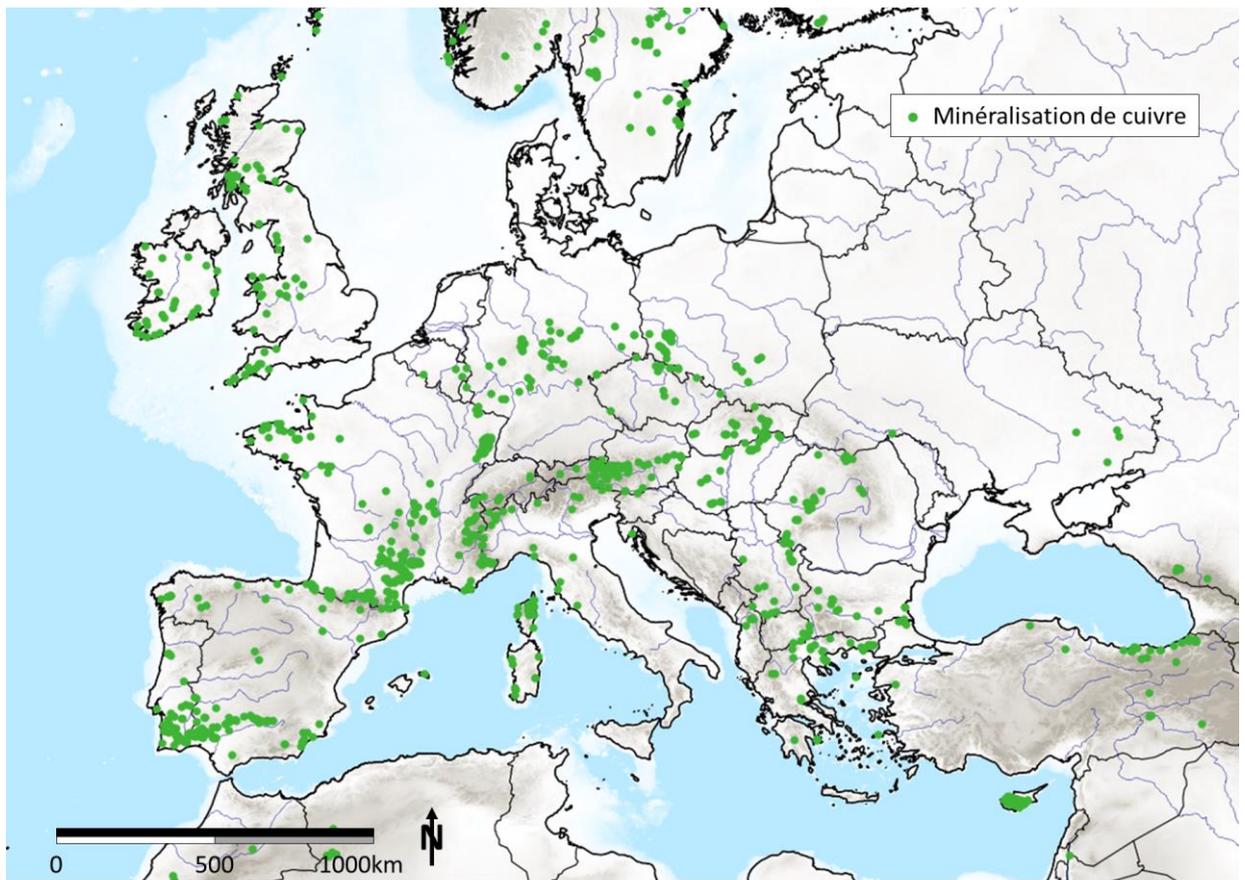
L'étain est présent dans moins de régions que le cuivre en Europe (Cassard *et al.*, 2015) : sa présence est limitée aux régions présentant des granites d'âge tardi-hercyniens (Matte, 1991 ; Williamson *et al.*, 1996 ; Franke *et al.*, 2005), période de grandes phases de compression en Europe. La rareté de l'étain combiné au fait que ce dernier est présent dans des teneurs d'environ 10 % dans les bronzes a fait que l'importance de ce dernier est parfois comparée à celle du pétrole de nos jours (Vasseur, 1961).

Observons enfin (Figure 3) que les cartes de répartition des gisements européens montrent que les régions montagneuses concentrent une très grande majorité des gisements du continent ⁷. Ce phénomène s'explique par la convergence tectonique (zones de compression), qui a engendré la formation de grandes chaînes de montagnes telles que les chaînes alpines, pyrénéennes et scandinaves. Ces chaînes de montagnes ont fait remonter des gisements qui s'étaient formés en profondeur, ce qui explique par exemple la présence de gisements de cuivre formés en contexte océanique dans les Alpes (des couches formées au fond de l'océan ont été amenées en surface).

Cette surrection des couches profondes n'est pas sans conséquences : lorsque les gisements formés en profondeur remontent à la surface terrestre, ils sont exposés à de nouveaux phénomènes dits post-génétiques, qui se produisent après la formation initiale du gisement.

⁶ L'étain et le cuivre peuvent être présents conjointement dans des veines sulfurées associées à des gîtes de haute température sous forme de stannite (Cu₂FeSnS₄) (Shimizu et Shikazono, 1985 ; Stolyarova *et al.*, 2018 ; Baranov *et al.*, 2019). La seule minéralisation de ce type exploitée à l'âge du Bronze est la mine de Mushiston au Tadjikistan (Konopelko *et al.*, 2022).

⁷ Les grands bassins sédimentaires n'abritent que très exceptionnellement des gisements métalliques.



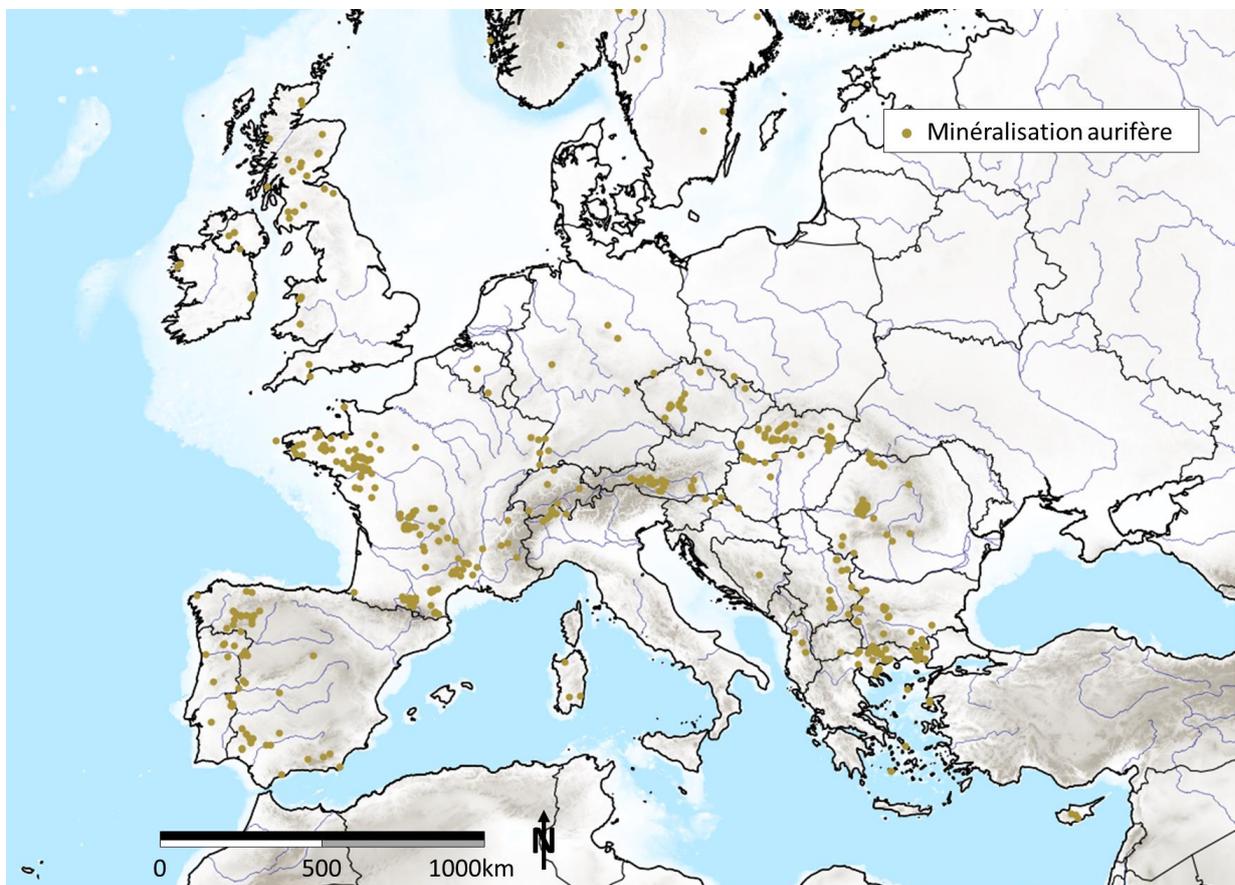
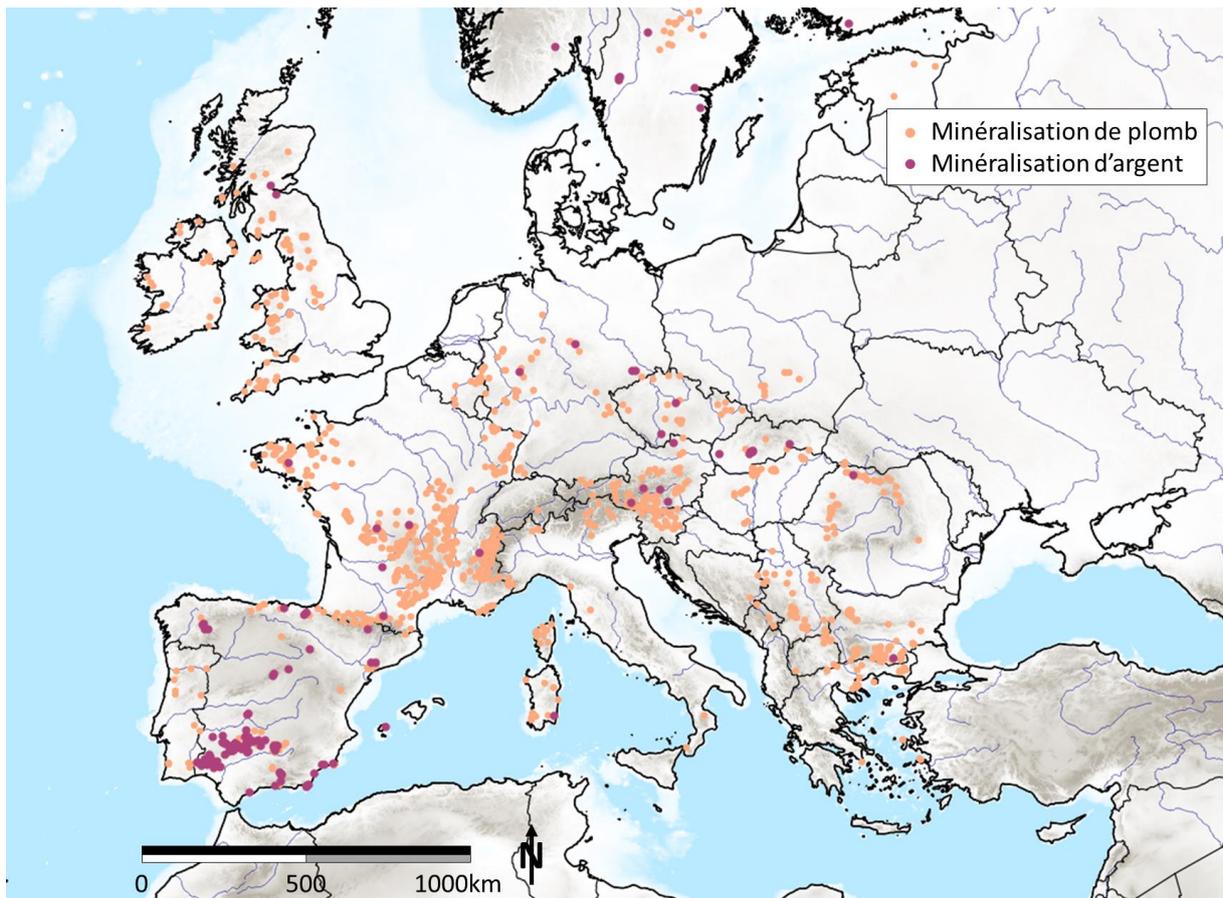


Figure 3 : Localisation des minéralisations en cuivre, étain, plomb, argent, et or en Europe occidentale. Carte produite par l'auteure, issue de compilation de la base de données ProMine fournie par le BRGM (Bureau de Recherche en Géologie Minière) et de la base de données de l'USGS (United States Geological Survey).

I/2 Des minéraux primaires affectés par des processus post-génétiques

Les phénomènes post-génétiques qui affectent les gisements varient selon les types de métaux en raison des différences intrinsèques dans la composition chimique et la structure cristalline de leurs minéraux primaires (formés initialement dans les magmas). Ces variations déterminent la manière dont les minéraux réagissent face à l'interaction avec de nouveaux fluides qui circulent dans les gisements après leur formation initiale. Les minéraux dits secondaires, résultants de ces interactions chimiques diffèrent selon le type de métal engendrant une diversité dans les altérations minérales observées.

I/2.a La formule chimique des minéraux de cuivre peut varier

Si le cuivre peut précipiter dans des contextes géodynamiques très différents, le minéral primaire formé dans les magmas est toujours sulfuré. Le plus courant d'entre eux est la chalcopysite (CuFeS_2) qui est très fréquente et connue dans quasiment tous les types de gisements de cuivre. Deux types de phénomènes peuvent affecter les chalcopysites : l'hydrothermalisme et l'altération supergène (Figure 4).

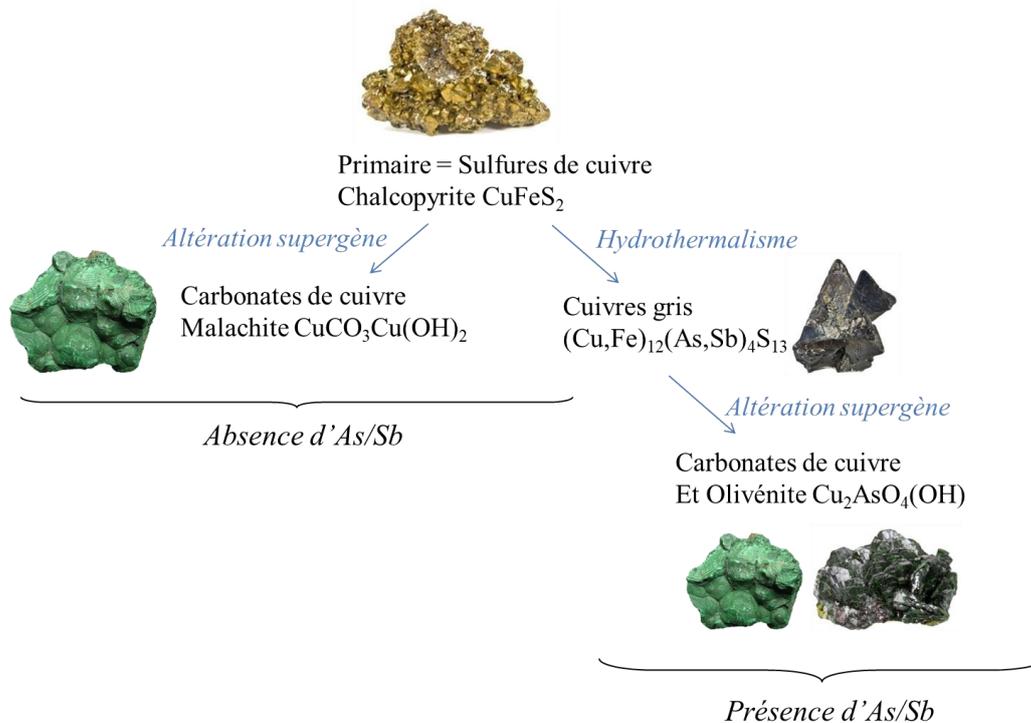


Figure 4 : Schéma simplifié du processus d'altération hydrothermale et supergène des minéraux primaires de cuivre. DAO : Céline Tomczyk

Tout d'abord, les gisements primaires peuvent être affectés par un hydrothermalisme, un phénomène se produisant en profondeur, à une température faible par rapport à celle d'un magma (environ $350\text{ }^\circ\text{C}$ ⁸). Les fluides hydrothermaux conduisent à la précipitation de cuivres gris. Ces minéraux remplacent les sulfures de cuivre primaire sous l'effet d'un fluide hydrothermal riche en arsenic (As) et/ou en antimoine (Sb) (Ixer et Patrick, 1995). La composition des cuivres gris dépend de celle des sulfures dont ils sont issus, de la composition des fluides hydrothermaux et de leur température (Sack, 2017). Leur formule chimique $(\text{Cu,Fe,Zn,Ag})_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$ est donc variable du fait de ces nombreux

⁸ Avec des variations comprises entre environ 200 et 800 °C.

paramètres⁹. En Europe, les gisements de cuivre hydrothermaux sont courants dans le sud de la péninsule Ibérique, le Massif central, les Alpes, ou encore dans les monts Métallifères.

De plus, par le jeu de l'érosion, lorsqu'ils s'approchent de la surface, les gîtes primaires comme les gisements ayant connu un épisode d'hydrothermalisme peuvent subir une altération dite supergène (Figure 5). L'altération supergène fait référence à l'ensemble des processus de transformation des roches et des minéraux exposés à l'atmosphère. L'infiltration de l'eau dans le massif explique que la plupart des éléments sont dissous, transportés en solution et exportés plus loin. Ce n'est pas le cas du cuivre qui, lui, se concentre. Il va notamment précipiter dans un horizon superficiel, au-dessus de la nappe phréatique : l'horizon d'enrichissement supergène. Ces processus d'altération donnent naissance à des minéraux carbonatés¹⁰ et/ou oxydés (dont la formule chimique contient de l'oxygène, mais pas de soufre).

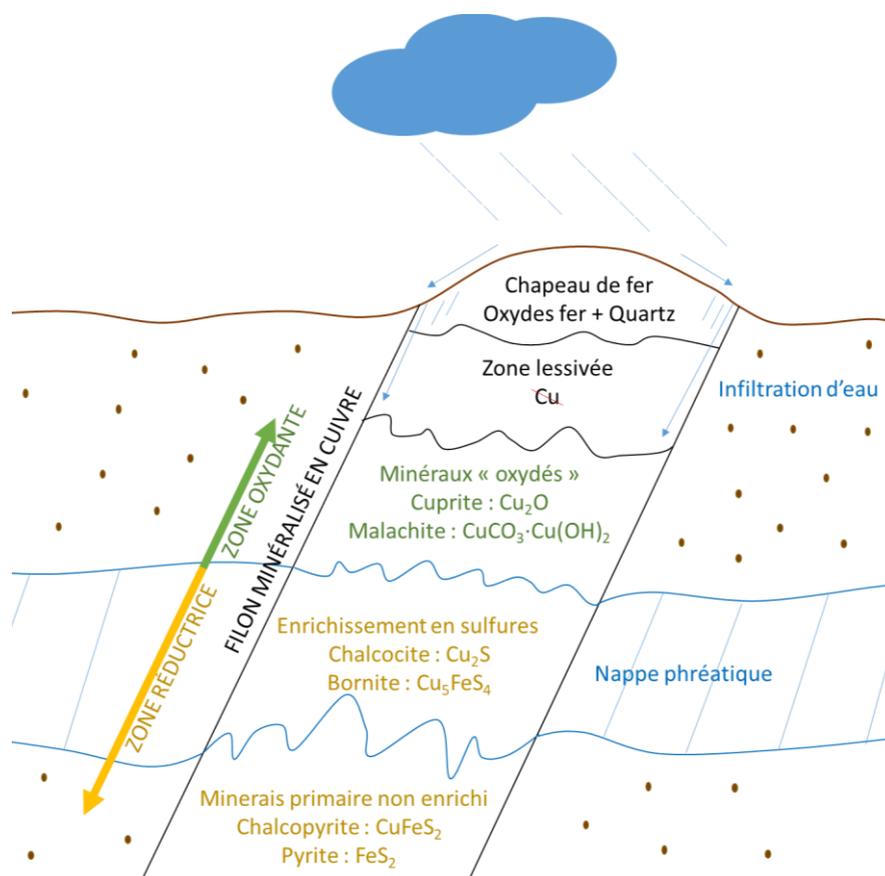


Figure 5 : Schéma simplifié illustrant le principe de l'altération supergène d'un filon cuprifère.

Les sulfures de cuivre primaires, riches en fer (c'est-à-dire les chalcopyrites CuFeS_2) sont remplacés par des sulfures secondaires, pauvres en fer tels que la bornite (Cu_5FeS_4) en zone réductrice puis par des oxydes et carbonates de cuivre (les plus courants sont la malachite et l'azurite) en zone oxydée.

⁹ Les cuivres gris forment une série dont les deux pôles purs sont la tennantite (à arsenic) et la tétraédrite (à antimoine) ainsi, le cuivre gris peut désigner tout minéral de composition intermédiaire, fruit de la substitution de l'As par Sb et inversement.

¹⁰ Ils possèdent l'ion carbonate (CO_3^{2-}) dans leur formule chimique.

	Type de gîte	Minéraux caractéristiques	Formule chimique
Minéraux SECONDAIRES	Altération supergène	Sommet	Cuivre Natif Cu
		Zone oxydée	Oxydes – Cuprite Cu ₂ O
			Carbonates – Malachite CuCO ₃ ·Cu(OH) ₂
			Carbonates – Azurite Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂
			Arséniate – Olivénite Cu ₂ AsO ₄ (OH)
		Zone réduite	Sulfures – Bornite Cu ₅ FeS ₄
	Sulfures – Chalcocite Cu ₂ S		
	Altération hydrothermale	Cuivres gris – Tétréédrite (Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	
Cuivres gris – Tennantite (Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃			
Minéraux PRIMAIRES	Primaire	Sulfures – Chalcopyrite CuFeS ₂	CuFeS ₂

Tableau 2 : Principaux minéraux de cuivre associés aux différents contextes d'altération supergène.

La partie sommitale des gisements est appelée zone d'enrichissement supergène car elle possède des teneurs en cuivre 2 à 5 fois supérieures à celles du minerai primaire (Guilbert et Park, 2007 ; Jébrak et Marcoux, 2008 ; Arndt et Ganino, 2009) et des concentrations fortes en arsenic et antimoine lorsque l'altération affecte des cuivres gris (Tylecote, 1992, p.10). Néanmoins, pour que l'altération supergène se produise, il est nécessaire que la nappe phréatique soit profonde mais aussi que la surface ne soit pas exposée à une érosion importante, et ce, pendant plusieurs centaines d'années. Les gisements ayant subi un enrichissement supergène sont donc fréquents en climat méditerranéen sec : dans la région des Baux de Provence, dans le sud de la péninsule Ibérique, ou encore à Chypre (Kassianidou, 2013a). Ces gisements sont en revanche quasi-absents des zones ayant connus des glaciations quaternaires soit dans la grande majorité de l'Europe tempérée (Figure 6).

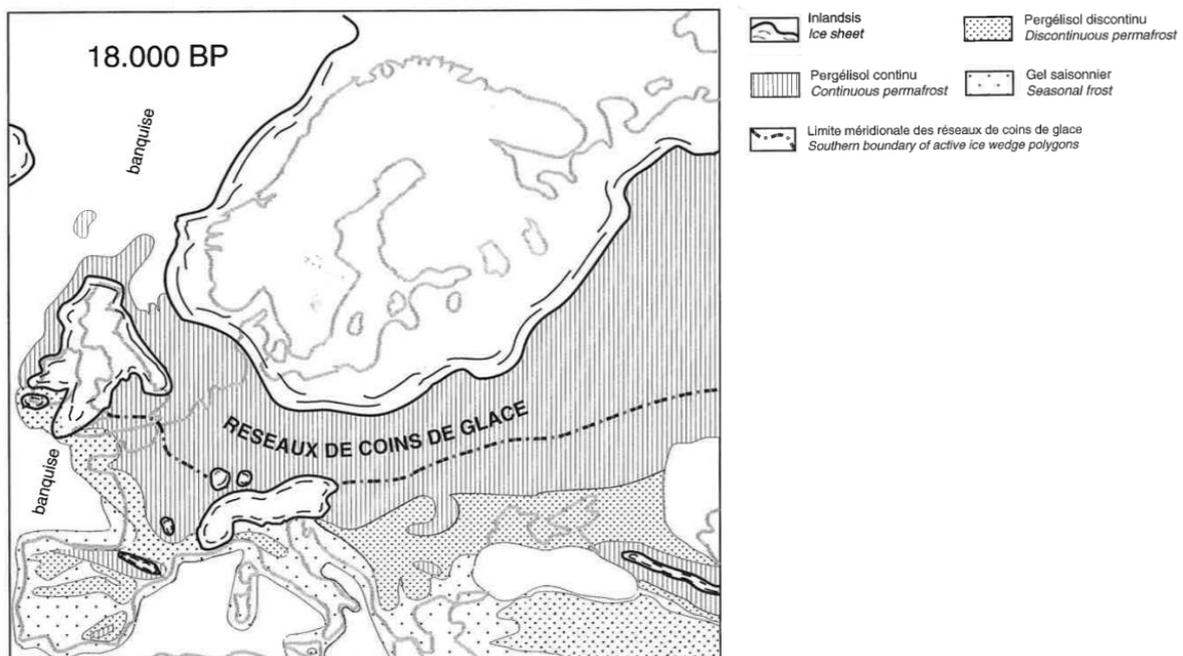


Figure 6 : Position des glaciers et du pergélisol au dernier maximum glaciaire ; dans ces régions, les zones d'altération supergène sont de taille très réduite. Source de la carte : Van Vliet-Lanoë, 1996

I/2.b L'étain et l'or peuvent se concentrer dans les rivières

Le minéral d'étain primaire est la cassitérite (SnO_2). Il semble être le seul minéral d'étain exploité à la préhistoire (Berger *et al.*, 2019)¹¹. Contrairement au cuivre ou encore à l'argent, l'étain tout comme l'or sont difficilement solubles et peuvent se concentrer dans les rivières : on parle alors de gisement alluvionnaire ou encore de gisement de type placer.

Un placer se forme à partir du démantèlement des gîtes primaires, lorsqu'une roche mère, contenant le gisement primaire (un filon de cassitérite ou d'or par exemple) est érodée. Le minerai est alors libéré de la roche et peut ensuite être transporté par un cours d'eau. Lorsque la vitesse du courant diminue, par exemple dans un méandre, ces minerais très denses se déposent dans le fond du cours d'eau ou dans les barres de méandres¹².

Les gisements de cuivre, d'étain et d'autres métaux peuvent donc être de formes très diverses et présenter des assemblages minéralogiques variés. Les populations préhistoriques et protohistoriques ont exploité ces ressources pour extraire les métaux utilisés dans la fabrication de leurs objets. Ces objets varient selon les périodes étudiées, reflétant une évolution non seulement des métaux exploités, mais aussi des alliages utilisés au fil du temps.

I/3 Du cuivre puis du bronze ?

I/3.a La métallurgie du cuivre : un tournant majeur ?

Les premiers artefacts en cuivre semblent être issus de cuivre natif comme le témoignent des billes de cuivre natif roulé trouvées à Ali Kosh en Iran et datées du début du VI^e millénaire av. J.-C. (Moorey, 1982 ; Oudbashi *et al.*, 2012 ; Thornton, 2014)¹³. Le cuivre natif aurait ensuite été travaillé au cours du VI^e millénaire (Garfinkel *et al.*, 2014) de l'Anatolie jusqu'en Iran (voir notamment les synthèses de Stech, 1999 ; Craddock, 2000 et Pegler, 2010). En Europe de l'Ouest, les indices de l'utilisation de cuivre natif sont plus tenus. Des perles de malachite et des artefacts beaucoup plus rares en cuivre natif sont connus dans les Balkans au V^e millénaire (Radivojević et Roberts, 2021) mais la difficulté d'identifier formellement les artefacts issus du travail du cuivre natif ne permet que difficilement de supposer que d'autres objets de ce type aient pu circuler en Europe¹⁴.

Quoi qu'il en soit, la quantité de cuivre produit à partir de cuivre natif devait nécessairement être faible car ce dernier est rare et ne peut donc pas alimenter une demande croissante en métal (selon Pegler (2010), la quantité de cuivre natif néolithique trouvé au Moyen-Orient avant l'apparition de la

¹¹ La stannite est une autre forme minérale (peu courante) sous laquelle peut cristalliser l'étain mais elle n'est apparemment pas exploitée à l'âge du Bronze.

¹² La cassitérite se concentre très facilement en placers alluviaux (Haustein *et al.*, 2010 ; Lehmann, 2021) ; 80 % de l'étain produit actuellement dans le monde provient de l'exploitation de placers (Kamilli *et al.*, 2017).

¹³ D'autres artefacts trouvés dans la région pourraient également être issus de cuivre natif mais ces derniers auraient été fondus (Bernbeck, 2004 ; Pernicka, 2004).

¹⁴ Pour déformer un métal à froid, il est nécessaire de le recuire (c'est-à-dire de le chauffer pendant quelques minutes entre 600 et 800 °C environ) après l'avoir martelé afin de rendre le métal à nouveau malléable pour lui faire subir de nouvelles déformations, et de réaliser ce recuit avant que des fissures apparaissent. Cette opération est courante car un simple martelage à froid entraîne la formation de fissures à la surface du cuivre (Güder *et al.*, 2021). Le cuivre natif peut alors être identifié par sa structure métallographique (Craddock, 2000) mais cela n'est plus le cas si ce dernier est fondu. Il est alors très complexe de le différencier du cuivre issu de la fonte de minéraux (Maddin *et al.*, 1980 ; Wayman et Duke, 1999).

métallurgie ne dépasserait pas quelques kilogrammes). Seule la fonte de minerai (c'est-à-dire la métallurgie d'extraction) a pu permettre aux sociétés de produire du cuivre en grande quantité.

L'apparition de la métallurgie extractive du cuivre a incité les chercheurs à définir un terme pour distinguer le Néolithique sans métallurgie du cuivre de celui qui présente cette technologie : le Chalcolithique (unissant les mots grecs *chalcos* pour cuivre et *lithos* pour pierre), reflétant le fait que durant cette période, les sociétés utilisaient le cuivre pour la fabrication de biens de prestige et d'armes, tandis que les outils de la vie quotidienne étaient encore principalement en pierre (Hansen, 2013 ; Odriozola *et al.*, 2016 ; Schauer *et al.*, 2021). L'introduction des premiers artefacts en cuivre n'a donc pas entraîné la disparition des artefacts en matières lithiques¹⁵ : bien que les prestigieuses haches en jade aient disparu vers 3500 av. J.-C, les productions d'outils dans d'autres matières lithiques ont été initialement peu affectées par l'augmentation de la circulation d'artefacts en cuivre (Pétrequin *et al.*, 2012).

L'origine de la métallurgie du cuivre a longtemps été supposée se situer en Mésopotamie (Roberts *et al.*, 2009 ; Pernicka, 1990 ; Krause, 2003 ; Amzallag, 2009) du fait de la découverte d'activités métallurgiques précoces sur le plateau iranien (Frame, 2011). Cependant, des découvertes de sites également datés du V^e millénaire en Israël (Garfinkel *et al.*, 2014), dans les Balkans (Jovanović, 1978 et 2009 ; Glumac et Todd, 1990 ; Radivojević *et al.*, 2010 et 2013) et à Cerro Virtud dans la province espagnole d'Almeria (Ruiz Taboada et Montero Ruiz, 1999) suggèrent des développements indépendants dans plusieurs foyers distincts entre la fin du VI^e et le début du V^e millénaire av. J.-C (Craddock, 1990 ; Parzinger, 1993 ; Radivojević *et al.*, 2010)¹⁶.

Les hypothèses les plus couramment admises suggèrent une diffusion de la métallurgie du cuivre depuis les Balkans vers l'Europe de l'Ouest suivant deux routes principales (Mohen, 1990 p.72-73 ; Mille, 2022) : l'une depuis les Carpates vers l'ouest des Alpes, l'autre suivant les rivages de la Méditerranée. La maîtrise de la métallurgie du cuivre se serait ainsi étendue en Europe de l'Ouest au cours du IV^e millénaire av. J.-C. tandis que sa généralisation n'aurait eu lieu qu'au III^e millénaire av. J.-C. (Obón Zúñiga, 2020). Néanmoins, des sites attribués au Chalcolithique n'ont pas été découverts partout en Europe (Pearce, 2019) et la présence ou non d'une période chalcolithique est débattue dans certaines régions comme les îles Britanniques (Allen, 2012). Ainsi, afin d'éviter de complexifier notre propos, nous proposons d'employer le terme « Néolithique/Chalcolithique » pour désigner la période où la métallurgie du cuivre n'est pas maîtrisée dans l'ensemble de l'Europe.

Notons enfin que l'apparition de la métallurgie du cuivre a longtemps été considérée comme un tournant majeur dans l'histoire des sociétés. Elle a été mise en corrélation avec l'émergence d'une complexité sociale et l'apparition d'élites (Childe, 1930 ; Wertime, 1964 et 1973 ; Renfrew, 1973 ; Bourke, 2008). Cependant, si ce lien semble pertinent dans le cas de contextes mésopotamiens et égyptiens¹⁷ (Wenke, 1991 ; Rothman, 2004) ce n'est pas le cas en Europe de l'Ouest (Obón Zúñiga, 2020 ; Marro et Stöllner, 2021)¹⁸. Par exemple, comme le précise Amzallag (2009), en péninsule Ibérique, la métallurgie est restée, pendant au moins un millénaire, une activité secondaire (servant

¹⁵ Au contraire, dans la culture de Vinča la première métallurgie du cuivre s'accompagne d'une forte augmentation des productions lithiques (Bogosavljević Petrović, 2016).

¹⁶ La théorie d'un foyer d'apparition commun plus ancien qui serait situé quelque part dans le Levant a néanmoins été émise par Roberts *et al.* (2009).

¹⁷ Où l'apparition des premiers artefacts en cuivre coïncide avec l'émergence de sociétés complexes.

¹⁸ Cela ne semble pas non plus être le cas en Asie : Amzallag (2009) souligne qu'en Thaïlande, la métallurgie sert principalement la production d'outils et ce, dès ses premiers stades de développement. Les sociétés locales n'ont pas évolué vers un pouvoir centralisé suite à l'adoption de la métallurgie du cuivre (Bayard, 1980 ; Pigott, 1996).

principalement la production de biens de prestiges et non d'outils) et n'a pas eu un impact culturel et sociétal important (Rovira, 2002).

I/3.b Les premiers alliages cuivre-arsenic/antimoine

Si les tout premiers cuivres produits ne sont pas alliés, le cuivre est rapidement associé à de l'arsenic et/ou à de l'antimoine. Cet alliage est en circulation en Europe de l'Ouest à partir d'environ 3400-3200 av. J.-C. et sera utilisé tout au long du III^e millénaire av. J.-C. (Budd, 1991 ; Merkl, 2010 ; Galili *et al.*, 2013 ; Bray *et al.*, 2015 ; Radivojević *et al.*, 2018). Les premiers artefacts réalisés à l'aide de ce type d'alliage correspondent à des armes (Vidigal *et al.*, 2016).

L'intérêt de l'ajout d'au moins 0,5 % d'arsenic/antimoine au cuivre est qu'il le rend moins susceptible de se rompre (Lechtman, 1996 ; Lechtman et Klein, 1999 ; Garbacz-Klempka *et al.*, 2015 ; Carozza et Mille, 2007 ; Figure 7). Ce n'est toutefois qu'entre 2 et 12 % d'arsenic (seuil au-delà duquel l'alliage devient fragile) que les propriétés de l'alliage sont le plus fortement améliorées (Budd et Ottaway, 1991).

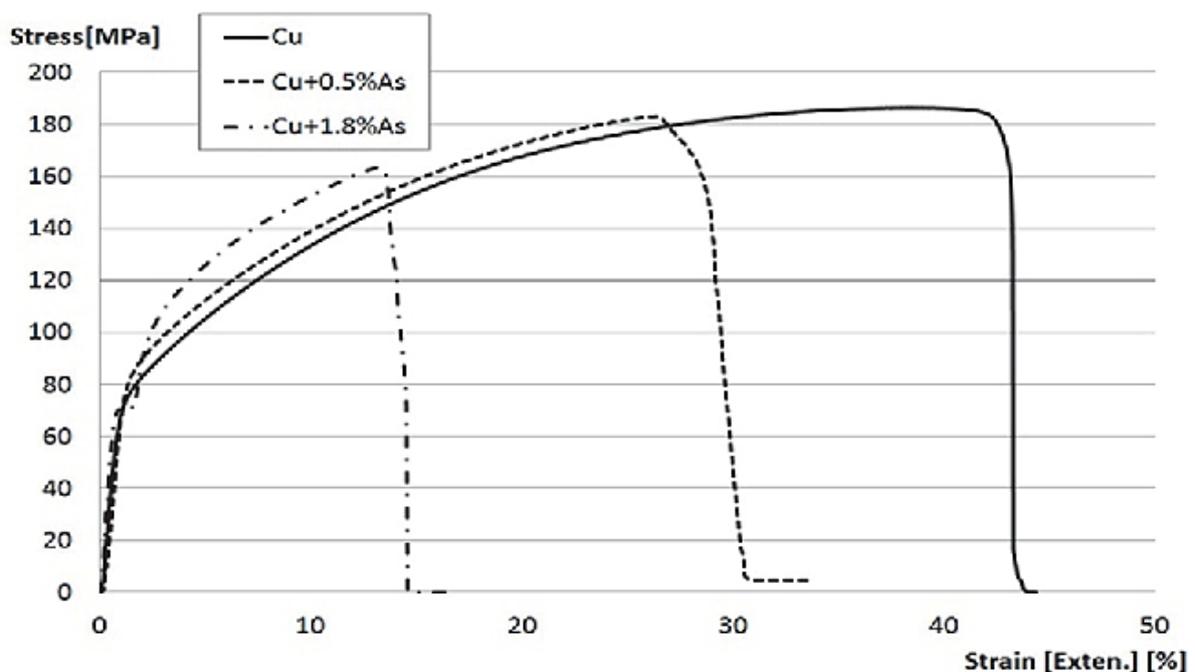


Figure 7 : Influence de l'ajout d'arsenic au cuivre sur la résistance à la déformation (la courbe décroît brusquement lorsque l'artefact se casse). Source : Garbacz-Klempka *et al.*, 2015.

La manière de produire cet alliage a longtemps été et est encore sujette à débats (voir la synthèse de Killick, 2014). Contrairement au bronze, le cuivre arsénié peut être un alliage naturel, obtenu en fondant des minéraux contenant naturellement du cuivre et de l'arsenic/antimoine. Les cuivres arséniés¹⁹ peuvent donc être produits à partir d'un seul et même gisement, ce qui n'est pas le cas du bronze, alliage de cuivre et d'étain.

¹⁹ Par convention, on nomme cuivres arséniés les alliages présentant des taux d'arsenic inférieur à 5 % et bronzes arséniés lorsque ces taux sont supérieurs à 5 % (Tylecote, 1992 ; Piccardo *et al.* 2017).

I/3.c L'adoption de l'alliage bronze

Une adoption lente du bronze

Tout comme pour la transition Néolithique-Chalcolithique, le passage à l'âge du Bronze est diachrone à l'échelle de l'Europe (Chernykh, 1992) : si dans les Balkans l'âge du Bronze s'étend de 3200 à 1000 av. J.-C. (Boyadziev, 1995), en Scandinavie il est compris entre 1700 et 500 av. J.-C. (Melheim *et al.*, 2018). Les écarts importants de chronologie entre différentes régions et en particulier entre l'Europe du Sud-Est (monde égéen et Balkans) et l'Europe occidentale donnent l'impression d'une diffusion du bronze depuis l'est mais cela n'est pas exact (Pare, 2000). En effet, ces différences reposent sur le fait qu'en Europe de l'Ouest, l'âge du Bronze débute à la fin du Campaniforme. Ce phénomène étant absent des régions plus à l'est, l'âge du Bronze y débute plus tôt.

En examinant les dates réelles de (quasi-)abandon des cuivres à arsenic au profit des bronzes à étain (Figure 8), on constate que l'écart n'est pas aussi important que ne le suggèrent les découpages chronologiques traditionnellement utilisés.

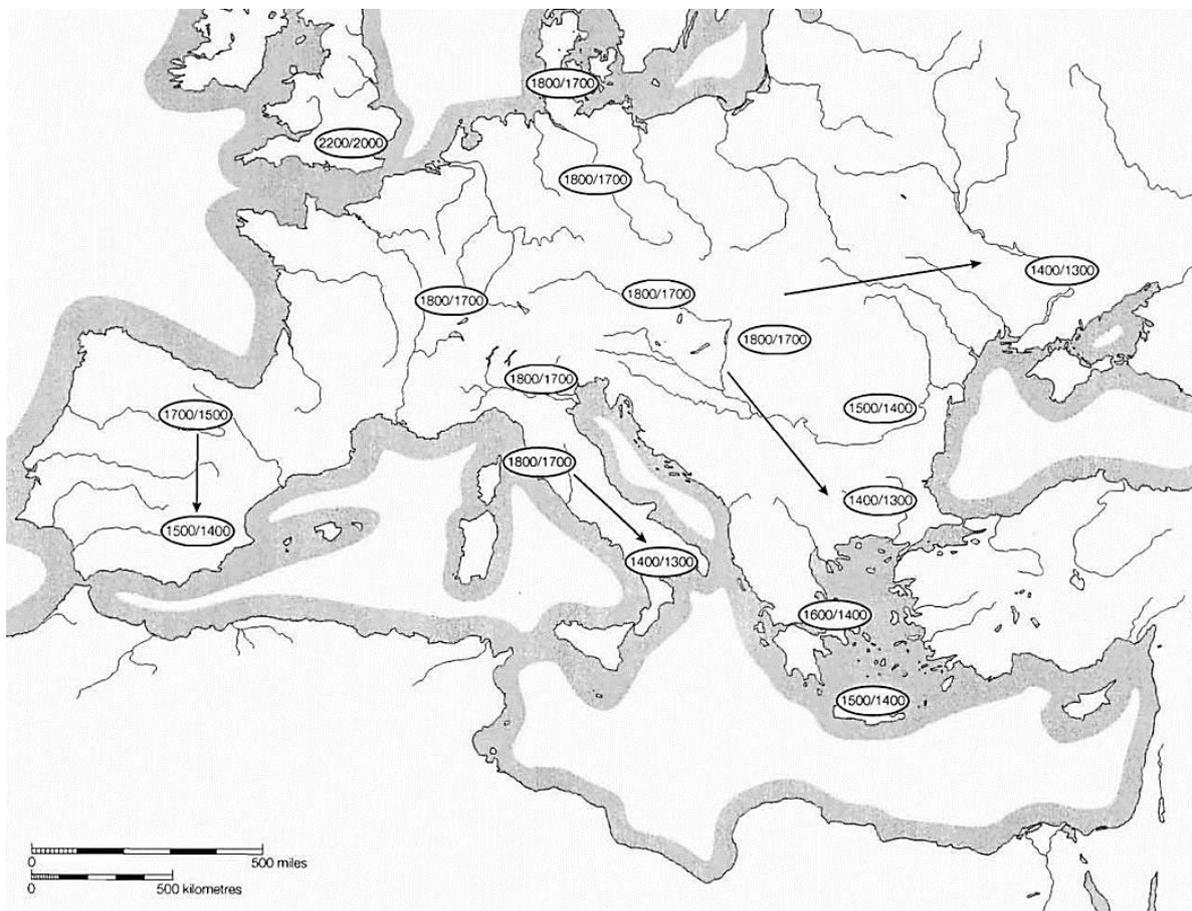


Figure 8 : Dates d'abandon des bronzes arséniés au profit du bronze à l'étain en Europe. Source : Pare, 2000. Le bronze remplace les cuivres arséniés de manière plus précoce dans les îles Britanniques que dans le sud de la péninsule Ibérique.

Les premières grandes régions à adopter le bronze en Europe de l'Ouest sont les îles Britanniques²⁰ vers 2400-2200 av. J.-C. (Taylor, 1994 ; Needham, 1996 et 2018 ; Gandois *et al.*, 2019)

²⁰ Ce n'est pourtant pas la première région à avoir produit un artefact en bronze. Un artefact en bronze particulièrement ancien (milieu du V^e millénaire) a été découvert en Serbie (Radivojević *et al.*, 2013) mais

et non les régions du sud-est européen. Les décalages de dates de début de l'âge du Bronze sont liés au fait que des critères différents ont servi de base aux découpages. Aussi, comme l'indiquent Gabillot et Colin (2023, p.16), la multitude de divisions typo-chronologiques de l'âge du Bronze pourrait être remplacée, à terme, par des datations absolues. Cela est d'autant plus vrai que l'adoption des métaux est un phénomène très progressif (Pare, 2000) : il faut au moins 500 ans pour que les bronzes à étain dominent les alliages de cuivre-arsenic/antimoine en Europe (Corboud et Piguet, 2014) et parfois plus d'un millénaire dans certaines régions du Moyen-Orient (Figure 9).

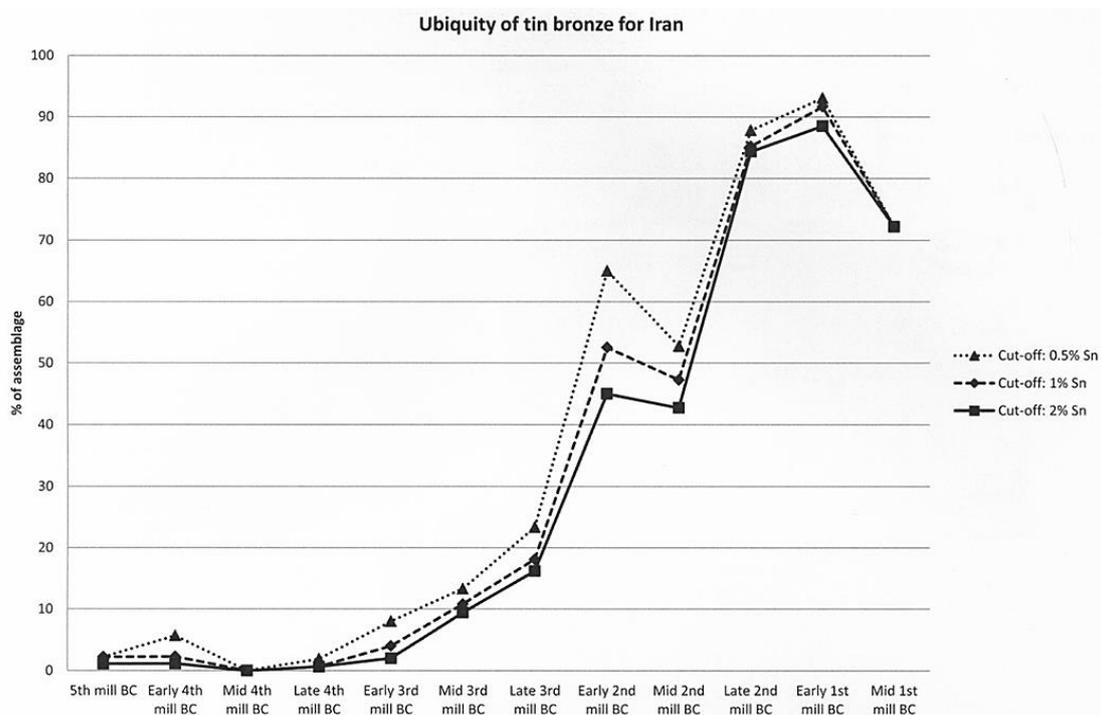


Figure 9 : Évolution du pourcentage de bronzes à l'étain dans les assemblages découverts en Iran²¹ où l'adoption du bronze est particulièrement lente. Source : Cuénod et al., 2015.

Néanmoins, si les dates bornant l'âge du Bronze reposent sur des découpages régionaux et des critères variables à l'échelle de l'Europe de l'Ouest, il demeure que l'âge du Bronze est régulièrement subdivisé en trois grandes phases²² :

- Bronze ancien entre 2200/2000 et 1600/1500 av. J.-C. ;
- Bronze moyen entre 1600/1500 et 1300 av. J.-C. ;
- Bronze final entre 1300 et 800 av. J.-C.

constitue à ce jour un *unicum*. Des découvertes isolées de bronzes de la fin du III^e millénaire av. J.-C. sont également à signaler dans le nord-est de la péninsule Ibérique (Alcalde et al., 1998).

²¹ Les premiers artefacts en bronze correspondent à de la vaisselle, des ornements et des armes, les outils en bronze apparaissent plus tardivement (Cuénod et al., 2015).

²² Ces subdivisions sont généralement appliquées pour la datation de l'âge du Bronze en Europe occidentale. Toutefois, il convient de noter que les dates précises et les caractéristiques spécifiques peuvent varier considérablement d'une région à l'autre. De plus, certaines régions de l'Europe occidentale ont connu des développements culturels distincts à chaque phase de l'âge du Bronze, ce qui peut exiger des subdivisions supplémentaires pour une compréhension plus détaillée et nuancée.

Ces phases chronoculturelles ont été initialement définies en fonction de la nature des métaux constituant les artefacts, des typologies céramiques et métalliques, ainsi que des pratiques culturelles, notamment les types de sépultures et les dépôts non funéraires²³.

En termes de mobilier métallique, le Bronze ancien est caractérisé par une faible abondance d'artefacts en bronze : des biens de prestige et des armes comportant des teneurs généralement assez faibles en étain. Des objets en alliage cuivre-arsenic/antimoine ont circulé ainsi que de plus rares objets en matériaux lithiques.

Vers 1600 av. J.-C., au cours du Bronze moyen, l'alliage bronze était toujours employé pour la fabrication d'objets de prestige et d'armes, mais il compose désormais certains outils agraires tels que les haches lourdes et les faucilles (Gallay et Lahouze Davaud, 1976). Les teneurs en étain sont plus fortes que précédemment et se stabilisent autour de 10 %.

Au Bronze final, le bronze était utilisé pour fabriquer la majorité des objets, y compris les outils. Les alliages de bronze sont souvent de qualité supérieure et les objets de prestige sont plus raffinés. Vers 1300 av. J.-C., le plomb est également utilisé comme élément d'alliages formant des bronzes dits ternaires.

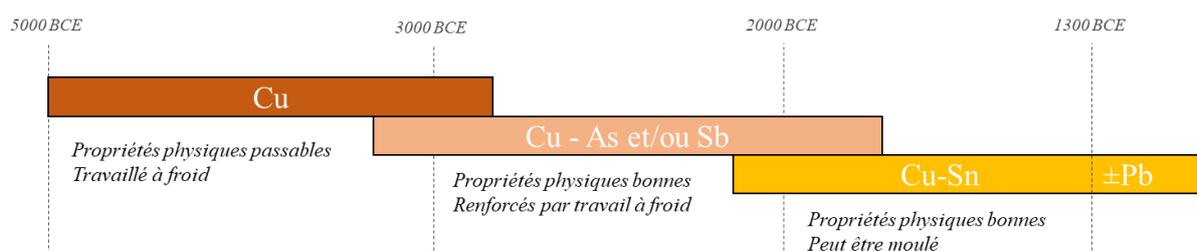


Figure 10 : Principales formes sous lesquelles le cuivre circule en Europe occidentale au cours du temps.

Pourquoi le bronze ?

L'ajout d'étain au cuivre a des conséquences très similaires à celui de l'ajout d'arsenic : il augmente la dureté et abaisse le point de fusion (Lechtman, 1996 p. 496 et 500). Le remplacement progressif du cuivre arsénié par le bronze ne repose donc pas sur une amélioration des propriétés physiques de l'alliage obtenu (Ravich et Ryndina, 1995 ; Lechtman, 1996)²⁴ mais plusieurs autres éléments pourraient expliquer l'abandon des cuivres arséniés. Le premier d'entre eux est en lien avec les processus métallurgiques employés (Tableau 3).

<u>Métallurgie du bronze</u>	<u>Métallurgie des cuivres arséniés</u>
Mélange de cuivre et étain (métal)	Minerais de cuivre oxydés et riches en arsenic
Fusion réductrice (~ 1150 °C)	Fusion réductrice (~ 1000-1100 °C)
Pas de perte d'étain	Possibles pertes d'arsenic
Alliage pouvant être coulé	Alliage devant être martelé à faible température pour lui donner forme
Faible travail d'ébarbage et martelage	

Tableau 3 : Comparaison des processus métallurgiques pour d'obtenir un objet en cuivre arsénié ou en bronze.

²³ Des subdivisions basées sur ces critères existent à l'échelle régionale, mais il est courant que des caractéristiques de plusieurs sous-périodes sont présentes simultanément (voir la synthèse de Gaucher, 1992).

²⁴ Seul l'ajout de plomb au bronze à la fin de l'âge du Bronze diminue la dureté de ce dernier ce qui permet de couler des artefacts longs et étroits (Nerantzis, 2012).

Produire du cuivre arsénié comme du bronze demandait une fusion sous atmosphère réductrice à environ 1100 °C (Pollard *et al.*, 1991 ; Rademakers et Farci, 2018). Les proportions de cuivre et d'étain du bronze obtenu à la fin du processus étaient facilement maîtrisées. Il était en revanche difficile de maîtriser les teneurs en arsenic des cuivres arséniés produits car elles peuvent varier en fonction de la charge du four et des conditions de fusion (McKerrell et Tylecote, 1972 ; Pollard *et al.*, 1991). Cette difficulté supposée de contrôler la teneur en arsenic/antimoine de l'alliage produit a longtemps fait supposer que les alliages cuivre-arsenic étaient complexes à produire (McKerrell et Tylecote, 1972 ; Branigan, 1974). Il a depuis été démontré que la présence d'éléments tels que le nickel peut aider à réduire les pertes lors de la fonte des minerais (Tylecote, 1992 p.10) et que l'arsenic se fixerait au cuivre avec peu de perte dès lors qu'il est présent dans des quantités inférieures à 7 % (Tylecote, 1992 p.10)²⁵. La difficulté de produire un alliage aux proportions de métal souhaité ne semble donc pas clairement expliquer l'abandon des cuivres arséniés.

Les alliages de cuivre-arsenic/antimoine présentent la difficulté de devoir être longuement martelés à moins de 800 °C (Haubner et Strobl, 2023) pour leur donner forme²⁶ (Northover, 1989 ; Lechtman, 1996 ; Pereira *et al.*, 2017). Le succès du bronze tient peut-être dans sa capacité à être moulé, permettant de reproduire un objet à l'identique rapidement, et ce, de nombreuses fois. Cet élément — à notre connaissance jamais évoqué dans les articles pourtant sur la transition bronzes arséniés/vrais bronzes — semble pertinent étant donné la quantité de métal échangé sous forme de produit fini.

Ce facteur n'est sûrement pas le seul. Le fait que la production de bronze ne produise pas/peu de fumées chargées en éléments dangereux²⁷ a également pu jouer. De plus, le bronze pourrait avoir été apprécié pour sa couleur dorée²⁸ qui diffère de la couleur rosée à argentée des alliages cuivre-arsenic (Callewaert, 2010 ; Mödlinger *et al.*, 2017). Certains auteurs supposent alors que cette couleur rappelant l'or a pu contribuer à son succès (Barthomeuf, 2004). Enfin, il n'est également pas à exclure que le potentiel sonore du bronze ait également pu favoriser son adoption (Clodoré-Tissot, 2006)²⁹.

²⁵ La supposition d'une légère perte d'arsenic si ce dernier est présent dans de faibles quantités a également été proposée par Pernicka (1990, p.169) mais ce dernier ne propose pas de seuil correspondant à une « faible quantité ».

²⁶ Cette phase de recuit, en alternance avec des phases de martelage permet également d'en augmenter la dureté et la résistance à la traction d'environ 10 à 30 %.

²⁷ Une très faible partie de l'arsenic s'échapperait involontairement (Aracena *et al.*, 2023) sous forme de vapeur toxique lors de la réduction (voir notamment Birmingham, 1977 ; De Jesus, 1980 p.94 ; Tylecote, 1987 p.42 ou encore Barthomeuf, 2004). Inhaler quotidiennement ces vapeurs peut avoir des conséquences importantes sur la santé (voir notamment Martin, 2017 p.53) et a pu provoquer l'intoxication de populations. De l'arsenic dans des taux élevés a été découvert dans les squelettes de populations impliquées dans la métallurgie extractive chalcolithique du cuivre à Shiqmim en Israël (Oakberg *et al.*, 2000).

²⁸ La gamme de couleurs pouvant être obtenue varie en fonction des proportions d'étain (Mödlinger *et al.*, 2017) et la couleur dorée n'est obtenue qu'à partir d'environ 12 à 20 % d'étain.

²⁹ Il compose des instruments de musique dans toute l'Europe (Clodoré-Tissot, 2006) ou encore des ceintures à pendeloques dans l'est de la France (Piningre *et al.*, 2021).



*Figure 11 : Grattages réalisés sur une hache plate à arsenic et sur un bracelet en bronze permettant de constater les différences de couleur de ces deux alliages (photographie prise au musée d'Aquitaine).
Photographie : Céline Tomczyk.*

Produire du bronze pouvait donc présenter des avantages mais cela se heurte à une difficulté majeure : contrairement à l'arsenic et l'antimoine, l'étain n'est pas naturellement associé au cuivre dans les gisements. L'élaboration de bronzes demande donc la mise en place d'échanges entre les régions produisant ces deux métaux. La première étape pour définir ces échanges est alors de localiser les exploitations de métaux et en particulier le cuivre et l'étain.

II/ Quels indices pour localiser d'anciennes zones minières ?

II/1 Recensement des sites d'extraction

La base de données créée se veut la plus exhaustive possible, ce qui a impliqué de prendre en compte des indices indirects de la présence d'extractions minières. Nous avons retenu les sites de mines fouillées et datées mais également des sites miniers encore peu étudiés.

Des sites où seules des étapes de traitement du minerai ont été identifiées (minéralurgie et plus encore métallurgie extractive) ont également été retenus. Leur prise en compte permet d'affiner la datation des exploitations³⁰ et parfois de supposer la présence d'exploitations dans des régions où aucune mine n'a été découverte.

Documenter les sites liés à l'extraction du minerai permet également de comprendre comment les minerais ont été travaillés et donc de reconstituer une chaîne opératoire (c'est-à-dire de définir des étapes correspondant à des gestes techniques à réaliser dans un ordre logique (Pfaffenberger, 1998 ; Lemonnier, 2010))³¹. Traditionnellement, les opérations d'extraction sont découpées en trois grandes étapes (Figure 12) :

- La phase d'extraction minière correspondant au fait d'extraire des minerais contenus dans un gisement ;
- La phase de minéralurgie soit le traitement (concassage, lavage, tri) du minerai extrait pour en isoler certains minéraux ;
- La phase de métallurgie extractive (également parfois dénommée pyrométallurgie) correspondant à la fonte des minéraux pour obtenir du métal qui pourra être échangé sous différentes formes et notamment être fondu pour lui donner une forme de lingot.

À ces trois étapes succède la métallurgie d'élaboration : le métal produit est destiné à être allié ou non à un autre métal et à être travaillé et mis en forme pour obtenir un objet qui peut être de nature très variée. Cette seconde phase peut être pratiquée à une distance importante des mines et ateliers d'extraction car le métal peut être transporté sur de grandes distances avant d'être mis en forme. Un transport de métal peut donc intervenir entre les phases d'extraction et d'élaboration des artefacts.

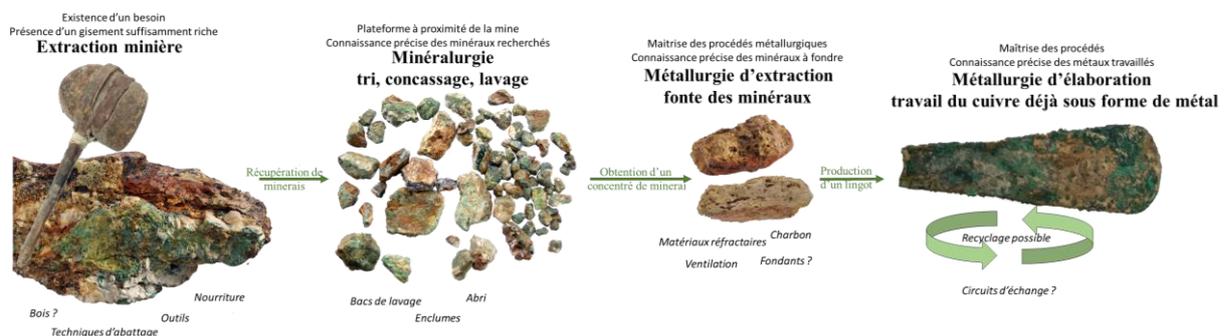


Figure 12 : Étapes de la chaîne opératoire minière et principaux composants du système technique minier.

³⁰ L'activité d'un atelier associé à une mine date indirectement l'exploitation de la mine car il lui est contemporain.

³¹ Cette vision par étapes successives peut être considérée comme simpliste et il serait préférable de considérer des « systèmes techniques » (Bertrand, 1979) prenant en compte de plus nombreux tels que la disponibilité des ressources nécessaires à la production ou encore les facilités d'export des marchandises produites.

Certaines étapes des chaînes opératoires sont stratégiques mais peuvent être réalisées de différentes manières que Lemonnier, 2010 appelle « variantes ». Par exemple, s'il est nécessaire de fondre les minerais extraits pour en obtenir du métal, il existe de nombreuses variantes permettant de réaliser cette opération. L'apparition de variantes dans les processus pyrométallurgiques peut être expliquée par de nombreux facteurs : le type de minerai extrait, la présence ou non de combustible à proximité des mines, la main-d'œuvre disponible, la pureté du métal recherché, le type de matériaux réfractaires disponibles ou encore l'artisan en tant qu'individu plus ou moins expérimenté et possédant une technique qui lui est propre peut également influencer sur la manière de pratiquer un même geste (Audouze et Karlin, 2017 ; Norgaard et Reiter, 2020).

Les techniques employées sont nécessairement très différentes selon les régions et varient au cours du temps. Les découvertes archéologiques ne permettent pas de définir l'ensemble des gestes pratiqués car certains ne laissent pas de traces et d'autres ne sont pas toujours identifiables.

II/1.a Localiser et étudier les mines anciennes

Des ramassages de surface qui ne laissent pas de traces

L'extraction minière consiste à extraire les minerais présents dans un gisement. La minéralisation exploitée peut être contenue dans une roche mais de rares minéraux peuvent aussi être détachés de la roche et collectés par simples ramassages de surface.

C'est le cas notamment du cuivre (cf I/3.a) mais aussi du fer : les rapports entre le fer, le cobalt et le nickel des premiers artefacts découverts dans le Levant mais aussi en Chine et en Anatolie indiquent qu'ils sont issus de ramassages de météorites et non de la fonte de minerais « terrestres » (Jambon, 2017). Une production conséquente des métaux demande toutefois la mise en place de structures d'extraction, c'est-à-dire des mines. Ces dernières peuvent être à ciel ouvert comme en souterrain et ont pour but l'obtention de minerais³².

Des mines difficiles à identifier du fait du comblement des structures

Si les ramassages de surface ne laissent pas de traces visibles et ne peuvent donc être supposés que par la découverte et l'analyse d'artefacts, les autres types d'exploitations (exploitations de placers, mines à ciel ouvert, puits, exploitations souterraines) peuvent être identifiés dans les paysages. Les mines anciennes subissent cependant des comblements importants, ce qui les rend parfois très peu visibles et complique leur découverte et leur identification.

Ce comblement peut être d'origine anthropique (accumulation de stériles dans les structures au cours de la phase d'exploitation³³) ou naturel (comblement des structures par des sédiments après la phase d'exploitation). Les épaisseurs plurimétriques que peuvent atteindre ces comblements (Figure 13) ne permettent généralement pas de déterminer l'ampleur réelle du creusement sans extraire ce matériel et donc sans fouiller la mine.

³² Il est intéressant de préciser, que le cuivre natif se trouve dans les zones d'altération supergène où l'on trouve également des minerais de cuivre « oxydés » (Jovanović, 1978). Il n'est pas étonnant qu'un lien ait pu être fait très rapidement entre le cuivre natif et ces minerais (Shugar, 2000 ; Yalçin, 2008). L'identification et le ramassage du cuivre natif aurait ainsi pu précéder la métallurgie (Bourgarit *et al.*, 2008).

³³ À l'inverse de ce qui est observé à l'âge du Fer, les mineurs de l'âge du Bronze veillaient à ne pas déverser de déchets à l'intérieur des mines (Stöllner 2014, p.149).



Figure 13 : Remplissage sédimentaire (alternance de sédiments sableux et d'argiles compactes) surplombant un filon à gangue de baryte (minéral blanc) dans la galerie principale de la mine de la Salière (Viala du Tarn, Aveyron). Photographie : Nicolas Minvielle.

La sédimentation permet de fossiliser les structures, et donc de les conserver (Briggs, 1983) mais les stratigraphies sont particulièrement difficiles à interpréter en souterrain et le comblement des mines demande la mise en place de campagnes de fouilles sur plusieurs années afin de désobstruer les mines et implique une gestion complexe des déblais.

Le comblement rend également complexe le repérage des mines à ciel ouvert dans les paysages : il est alors souvent complexe de différencier un ravin creusé par un cours d'eau d'une tranchée minière (Figure 14). Un indice important est la présence de minerai concassé, rejeté dans des bourrelets adjacents au creusement et parfois la présence de matériel d'extraction dans les structures.



Figure 14 : Tranchée d'extraction minière en partie comblée, district de Fayet, Aveyron.
Photographie : Céline Tomczyk.

Les relevés LiDAR³⁴ aéroportés permettent d'améliorer la détection des structures d'extraction minière en particulier sous couvert forestier. Si peu d'études ont à ce jour utilisé des relevés LiDAR pour des mines en roche, ces relevés sont particulièrement utiles pour localiser d'anciennes exploitations alluvionnaires (Cauuet et Boussicault, 2014 ; Fernández-Lozano *et al.*, 2019 ; Fonte *et al.*, 2021). En effet, les exploitations d'étain et d'or alluvionnaires souffrent des mêmes difficultés de localisation, si ce n'est plus encore, que les mines en roche car il s'agit d'exploitations souvent extrêmement localisées (les concentrations en métal et donc les mines s'implantent dans des secteurs restreints où la puissance du courant est moins forte) et soumises à un comblement naturel important (Figure 15). Les structures mises en évidence ne permettent cependant pas directement de conclure qu'il s'agit de chantiers alluvionnaires, également appelés ravines³⁵. Seule la présence de métal et/ou d'outils d'extraction permet d'en confirmer la fonction.

³⁴ « *Light Detection And Ranging* » soit en français « détection et estimation de la distance par la lumière »

³⁵ Les ravines sont des structures creusées en pente dans lesquelles s'écoulent de l'eau et des sédiments contenant de l'étain ou l'or. Les particules les moins denses parcourent les ravines et se déposent à leur base dans des cônes alluviaux alors que les métaux, plus denses, sont piégés et collectés directement dans les ravines.

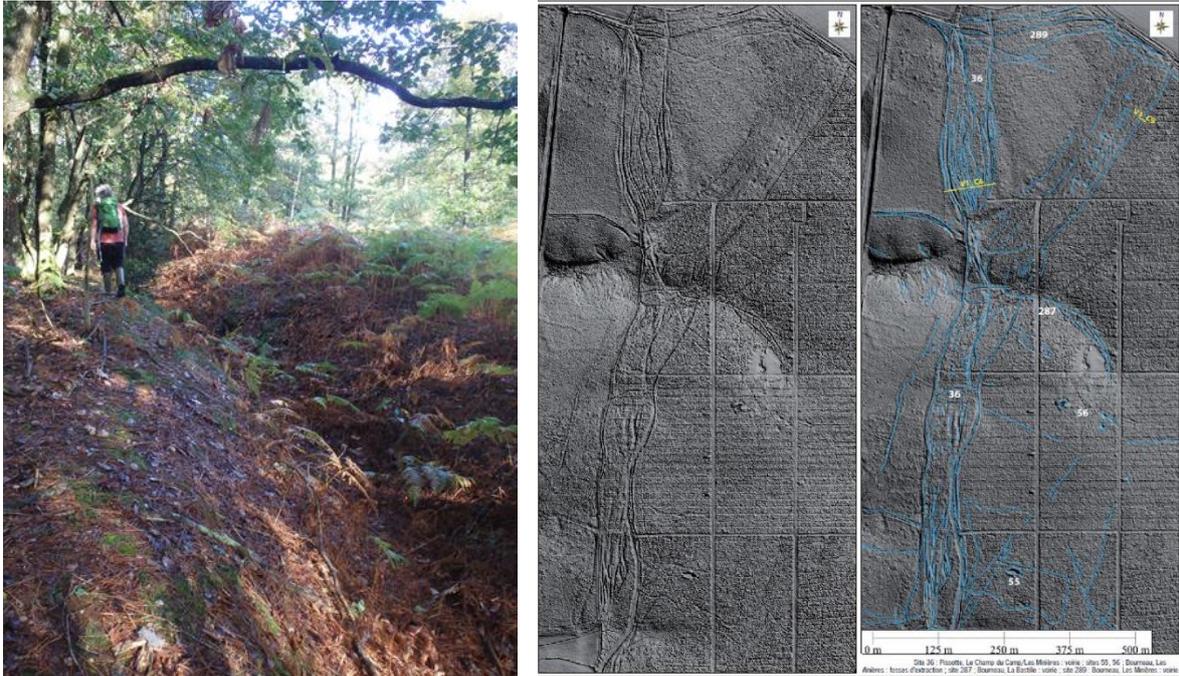


Figure 15 : À gauche : structures présentant un profil en « V » profondes de 2 m et larges de 5 m mises en évidence par les relevés LiDAR en forêt de Mervent (photographie : Céline Tomczyk) ; à droite relevé LiDAR correspondant dans Nillesse et Watteaux (2020).

Des mines souterraines pouvant présenter des risques d'effondrement

Un autre frein à l'étude des mines — et plus particulièrement des mines souterraines — est lié au risque d'effondrement des structures (infiltrations et circulations d'eau, soutènement insuffisant et/ou des boiseries de soutènement fragilisées...). Les entrées ou des portions de galeries peuvent alors ne plus être accessibles. En milieu souterrain, le danger se traduit par des effondrements provenant du toit (« plafond ») des chantiers miniers pouvant conduire à des effondrements localisés. Ces effondrements se marquent dans les paysages par la présence de fontis (dépressions circulaires correspondant à des portions de galeries effondrées, Figure 16).



Figure 16 : Fontis isolé dans le district du Minier, Aveyron. Photographie : Céline Tomczyk.

Lorsque les galeries ne sont plus accessibles, des prospections géophysiques de surface sont parfois employées pour définir l'emplacement des vides correspondant aux galeries minières comme ce fut le cas de la mine de Mali Sturac (Antonović et Vukadinovic, 2012).

Difficultés liées aux reprises minières

Les mines anciennes, qu'elles soient souterraines ou à ciel ouvert, en roche ou alluvionnaires, sont souvent détruites par les reprises minières. Parfois, les mineurs ne font que circuler dans les galeries plus anciennes, ce qui permet la préservation de quelques portions de ces galeries. Cependant, il est fréquent que les chantiers miniers plus récents élargissent les travaux anciens, les faisant ainsi disparaître. Plusieurs phases d'exploitations minières se succédant risquent donc de faire disparaître progressivement les travaux très anciens. Les reprises minières sont souvent tellement importantes que les travaux préhistoriques ne sont plus identifiables que dans d'infimes tronçons des exploitations. De très nombreux exemples de mines pré/protohistoriques ayant fait l'objet de reprises d'exploitation peuvent être citées. Parmi les plus étudiées figurent les mines de cuivre de : Great Orme au pays de Galles (Lewis, 1996 ; Figure 17), Saint-Véran dans les Hautes-Alpes (Ancel, 1997), la mine de Buco Payrol dans l'Aveyron (Léchelon, 1997), les mines d'Hondurillas dans la province de Séville en Espagne (Hunt Ortiz, 2003 p. 97-100), les mines d'étain de Schellerhau dans les monts Métallifères (Tolksdorf *et al.*, 2020).

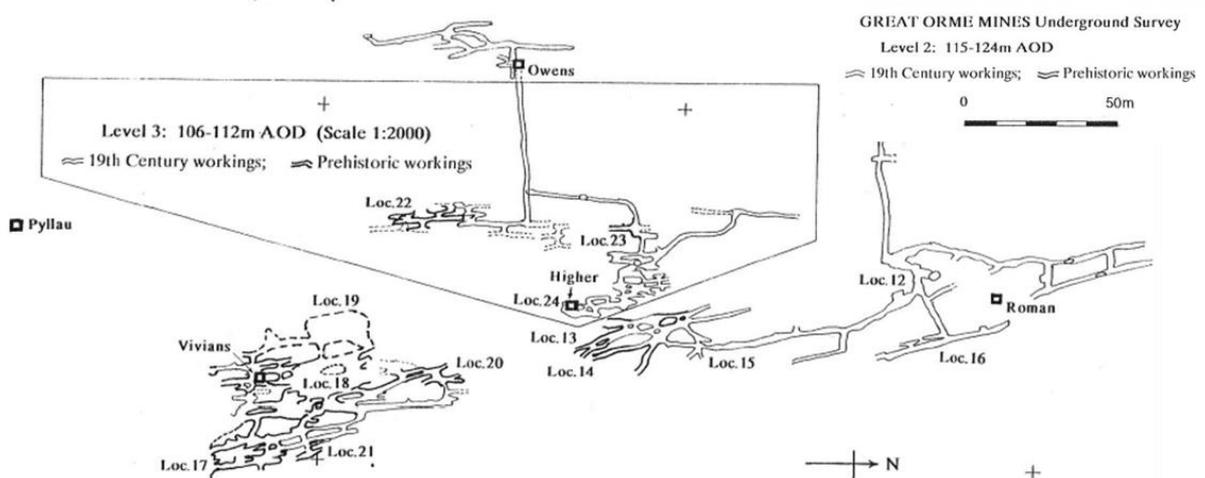


Figure 17 : Reprise minière dans la mine de Great Orme (Pays de Galles) : seules quelques galeries de l'âge du Bronze (indiquées en gras) sont conservées, les travaux du 19^e siècle ayant repris et fait disparaître une grande partie des travaux anciens. Source : Lewis 1996.

Si la reprise minière est moderne, il est courant que les ingénieurs des mines aient indiqué la présence d'anciens travaux miniers mais, dans de nombreux cas, les vestiges ont malheureusement été détruits lors de l'exploitation. De tels cas sont recensés pour le cuivre dans le sud de l'Irlande (à Toormore (O'Brien, 2003) et Reentrusk (O'Brien, 2015 p.134)) et dans le sud-est de la péninsule Ibérique (à San Telmo et à Confesionarios (Hunt Ortiz 2003, p.121-122)). Des mines d'argent entièrement détruites par la reprise contemporaine sont connues à Altinoluk en Anatolie (Pernicka *et al.*, 2003) mais aussi à Puezco Rico dans le sud de la péninsule Ibérique (Hunt Ortiz, 2003 p.54-56). Enfin, seuls les textes laissés par les prospecteurs des XIX^e et XX^e siècles indiquent la présence de travaux anciens désormais détruits, dans les mines bretonnes d'étain de Limerzel et Penestin (Siepi, 2013 p.43).

La datation des phases d'exploitation pré-contemporaines est souvent possible mais ne repose alors généralement que sur du mobilier³⁶ trouvé dans les anciens chantiers miniers.

Un bon exemple de datation ne reposant que sur du mobilier, concerne la mine de cuivre Libiola en Italie. En 1879, alors que la mine était en exploitation, un géologue y a découvert des artefacts préhistoriques (un coin en bois, une pelle, un maillet en pierre et un manche en chêne). Le manche a été daté par radiocarbone (3490-3102 cal. av. J.-C.). Malheureusement, l'exploitation s'est poursuivie à Libiola jusque dans les années 1950, sous forme d'une exploitation extensive à ciel ouvert, supprimant les anciennes galeries.

Un second exemple de caractérisation avant exploitation minière est le cas de l'étain alluvionnaire de Saint Renan (Finistère). Les prospections du BRGM menées dans les années 1960 y ont mis à jour des scories stannifères et des tas d'alluvions lavées (correspondants à des rejets d'exploitation). Un charbon découvert dans ces niveaux a été daté permettant de faire remonter l'exploitation de l'étain au Bronze final (Giot et Lulzac, 1998) et, si une estimation de la quantité d'alluvions remuées et une datation a pu être effectuée, l'étude précise des travaux n'a pas été établie car le gisement a été massivement exploité dans les années 1960 et 700.000 m² d'alluvions ont ainsi disparu (Figure 18).



Figure 18 : Drague utilisée dans le cadre de l'exploitation de l'étain alluvionnaire à Saint Renan dans les années 1960. Source de l'image : <http://www.expotem.fr/2011/08/la-comiren/>

La description des minéralisations est souvent disponible mais il n'est que rarement possible de déterminer si les anciennes exploitations ont concerné ou non l'ensemble des filons. Dans le cas de la mine précédemment citée de Confesionarios, il est probable que de l'argent ait été extrait en plus du cuivre mais rien ne permet de définir si les mineurs préhistoriques ont préféré extraire le cuivre et/ou l'argent. Enfin, l'extension des travaux anciens est rarement estimée.

³⁶ Ce mobilier n'est parfois pas lié à l'extraction minière et il n'est pas certain que l'artefact soit contemporain de l'activité minière. Des artefacts en bronze trouvés dans les galeries à Quarta Feira (Portugal) ou encore à Vallauria (Alpes-Maritimes) constituent les seuls indices d'une possible exploitation de ces mines à l'âge du Bronze.

Des mines souvent datées par radiocarbone

La datation des mines est possible lorsque les niveaux liés à l'exploitation peuvent être étudiés et est facilitée si la roche a été creusée à l'aide d'abattage par le feu. Cette technique (parfois dénommée abattage au feu) est apparue au Néolithique et a persisté jusqu'à l'arrivée de la poudre (Dubois, 1996 ; Py, 2009 p.1071). Elle consiste à allumer des brasiers (Figure 19) au contact des roches très résistantes dans lesquelles il n'est pas possible de progresser uniquement à l'aide d'outils. Le choc thermique fracture la roche et la débite en écailles³⁷ : des fragments d'épaisseur centimétrique de roche minéralisée se détachent des parois et tombent lors de l'opération. Quelques millimètres supplémentaires de progression peuvent être acquis par l'attaque de la roche fragilisée à l'aide de maillets et de pics.



Figure 19 : Représentation de l'abattage par le feu par Georgius Agricola dans *De re metallica* (1566).

Cette technique de creusement laisse des formes en coupole très caractéristiques (Figure 20) et l'importante quantité de charbons produits mêlée à des fragments de roche constitue un matériel fiable pour réaliser des datations radiocarbone.

³⁷ Le terme exact est celui de desquamation.



Figure 20 : Coupoles caractéristiques laissées par l'emploi d'abattage par le feu dans la mine de Bouco-Payrol (district de Fayet, Aveyron). Photographie : Céline Tomczyk.

La quantité de charbon retrouvée à la base des coupoles est souvent importante : Pichler *et al.* (2013) estiment à un peu plus de 900 g³⁸ la quantité moyenne de charbon retrouvé dans le comblement de chacune des coupoles d'abattage par le feu des mines de Mauk E (Tyrol autrichien).

Des études menées sur les charbons de bois issus d'abattage par le feu en Irlande à Mount Gabriel (O'Brien, 1994) et dans le Tyrol autrichien (Heiss et Oeggel, 2008) ont montré que les bois brûlés seraient principalement constitués de branches et de tiges (de moins de 5 cm de diamètre) d'arbres matures et non de troncs. Ainsi, si ces datations radiocarbone présentent le désavantage de dater le bois utilisé et non le phénomène de combustion, le fait que des branches soient utilisées limite les possibles effets « vieux bois »³⁹.

Les charbons liés à l'abattage par le feu ne constituent cependant pas le seul matériel datable par radiocarbone et, dans les rares cas où ils sont conservés, les outils en bois et os d'animaux et/ou en bois peuvent permettre une datation radiocarbone mais de telles trouvailles demeurent exceptionnelles.

Dans de plus rares cas, les mines ont été réutilisées pour des sépultures humaines et la datation des ossements correspond à des dates proches de celles de la fermeture de la mine. La seule datation préhistorique de la mine de Bouco Payrol (Aveyron) repose ainsi sur celle d'ossements humains mis en place postérieurement à l'exploitation minière (Léchelon, 1994).

³⁸ Ces quantités sont importantes mais sont très inférieures à la quantité de charbon produite dans le cadre d'expérimentations. Ceci laisse supposer que le charbon produit par l'abattage par le feu était peut-être récupéré pour d'autres usages (Ancel *et al.*, 2010).

³⁹ Si un arbre pluricentenaire est coupé puis brûlé, la datation varie fortement si elle est réalisée sur un fragment proche de l'écorce ou du tronc de ce dernier : une datation proche de l'écorce est proche de la date d'abattage de l'arbre alors que la datation du bois de cœur indique la date à laquelle l'arbre a poussé et n'est donc que peu pertinente (post quem).

Néanmoins, si ces datations radiocarbone ne souffrent potentiellement que peu d'effets vieux bois⁴⁰ et ne présentent que peu d'effets de plateaux (à l'exception de la période 800-400 av. J.-C.), elles sont peu nombreuses. Ces datations correspondent de plus à des intervalles qui peuvent s'avérer plus larges que la période d'activité de la mine. Elles ne permettent que difficilement de déterminer des ruptures d'exploitation et elles peuvent ne pas inclure les premières phases d'exploitations des mines car ces dernières sont supprimées par les phases d'approfondissement qui leur succède. L'idéal est alors de disposer de plusieurs méthodes de datation.

Des datations dendrochronologiques sont ainsi parfois associées aux datations radiocarbone, en particulier lorsque les mines contiennent des boiseries de soutènement préservées. Elles permettent de dater l'année d'abattage de l'arbre⁴¹ puisque ces bois présentent encore leur écorce. Des datations de ce type ont été associées à des datations radiocarbone dans le district de Mauk dans le Tyrol autrichien (Pichler *et al.*, 2013) permettant une datation très précise de la période d'activité des mines. Cependant, les datations dendrochronologiques employées seules présentent des limites car il est difficile de définir si les bois datés sont représentatifs de toute la durée d'exploitation. De plus, la dendrochronologie ne permet pas d'obtenir l'effet cumulatif obtenu dans le cadre de datations sur charbons de bois (permettant de mieux appréhender la chronologie longue d'une exploitation). Ainsi, si les datations dendrochronologiques permettent d'obtenir des valeurs très resserrées de la datation des exploitations, dater une activité minière par la seule dendrochronologie demande de très nombreuses observations (Tropper *et al.*, 2017). Par exemple, la mine de sel de Hallstatt a été datée par dendrochronologie réalisée sur 2271 bâtonnets de bois utilisés pour l'éclairage en souterrain (Grabner *et al.*, 2021).

Les mines sont également très souvent datées par du mobilier céramique retrouvé sur site ou par les sites d'occupations aux abords directs des mines ou (habitats, tombes...). Ces datations ne sont pas nécessairement moins précises que celles impliquant des méthodes de datation absolue : certaines typologies de céramiques permettent des datations précises et fournissent des intervalles de temps très réduits.

Enfin, il arrive couramment que les mines qui n'ont fait l'objet que de prospections ne soient caractérisées que par la présence de maillets en pierre.

Les maillets en pierre : témoins d'une exploitation préhistorique

Contrairement au fer, le cuivre comme le bronze ne sont pas assez résistants pour être utilisés comme matériau de percussion pour fragiliser les roches dans lesquelles sont contenus les métaux. Des roches dures (souvent d'origine locale) sont alors emmanchées et utilisées pour progresser dans la minéralisation. Leur forme (maillets, piochons ou encore ciseaux) ainsi que leur taille peut varier au sein d'une même mine (de Blas Cortina, 2005 ; Huelga-Suarez *et al.*, 2012 ; Breglia *et al.*, 2016) mais les maillets et piochons possèdent généralement⁴² au moins une rainure encore visible correspondant à la trace laissée par le dispositif d'emmanchement.

⁴⁰ Si les cas d'effets vieux bois semblent très rares, des datations très anciennes (5320-5060 cal av. J.-C.) de la mine de Rudna Glava dans les Balkans sont supposées être très exagérées et pourrait être liées au fait que le cœur d'un arbre pluricentenaire aurait été daté (Weisgerber et Pernicka, 1995 p.163).

⁴¹ Une datation de la date d'abattage de l'arbre à l'année près est alors possible s'il existe un référentiel dendrochronologique pour l'espèce analysée et lorsqu'un fragment contenant de l'écorce est retrouvé.

⁴² Ceci n'est pas systématique : des maillets et piochons sans rainure ont été découverts au pays de Galles (Timberlake et Marshall, 2013).

Le poids des outils varie également considérablement. Des maillets retrouvés à Engin Vein dans le Pays de Galles présentaient un poids moyen de 1 à 2 kg mais un maillet de plus de 16 kg a été retrouvé (Timberlake et Craddock, 2013). Dans la région de Solana del Bepo (péninsule Ibérique) des pics aux poids très variés ont été découverts : les plus légers pèsent entre 700 g et 2 kg et sont en roches coméennes, alors que les plus lourds pèsent près de 4 kg pour et sont en porphyres.

Cette variabilité morphologique et dimensionnelle indique des usages différents. Par exemple, de grandes masses peuvent être suspendues à un trépied (Figure 21, cas e) (Dimić, 2019). Les perceurs miniers se distinguent des outils de broyage du minerai (pilons⁴³) qui possèdent également des poids variables mais ici leur taille pourrait dépendre de la quantité de minerais à broyer⁴⁴.

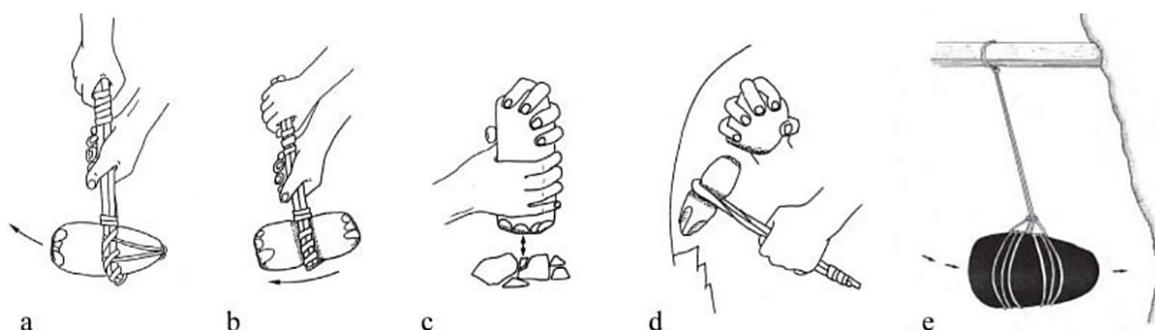


Figure 21 : Représentation schématique de différentes utilisations et manipulations des maillets et des piochons en pierre (le schéma c représente un pilon pour broyer le minerai). Illustration de Delgado-Raack et al., 2014 d'après Timberlake et Craddock, 2013.

Delgado-Raack *et al.* (2014) parviennent au même type de conclusion : en réunissant des données issues de plusieurs mines, ils remarquent que les maillets et piochons possèdent des masses variables.

Mine	Poids des maillets et piochons
El Áramo (Asturies, Espagne)	1500-4000 g (max. 9500 g)
El Milagro (Asturies, Espagne)	1500-4000 g (max. 9000 g)
Schwaz-Brixlegg (Tyrol, Autriche)	200-7000 g (moy 1400 g)
Great Orme (Pays de Galles, Royaume-Uni)	500-1300 g
Copa Hill (Pays de Galles, Royaume-Uni)	1000-7000 g
Cabrières (Hérault, France)	250-14500 g

Tableau 4 : Poids des maillets et piochons de quelques mines de cuivre préhistoriques européennes. Source : Delgado-Raack et al., 2014.

Dans une mine protohistorique, il est ainsi courant de trouver des maillets et piochons en pierre dans les couches de déblais. La quantité de perceurs retrouvés est variable mais elle est généralement conséquente : plus de 700 exemplaires ont été découverts à Bouco-Payrol (Aveyron) (Carozza *et al.*, 1998) comme à Monte Loreto (Ligurie) (Maggi et Pearce, 2005) ; 210 maillets (répartis en 6 types) ont été trouvés à Mali Sturac (Serbie) (Bogosavljevic, 1990) et 71 Grotta della Monaca (Calabre) (Caricola *et al.*, 2020).

⁴³ Outre leur contexte de découverte, les pilons servant à broyer du minerai présentent des traces d'abrasion caractéristiques permettant de les distinguer des pilons ayant servi à broyer des aliments (Dubreuil, 2001).

⁴⁴ À ce sujet, Webb (2015) montre que sur le site Ambelikou Aletri à Chypre, la dimension des outils en pierre utilisés dans les ateliers sont plus gros dans les ateliers centralisés (où des minerais issus de plusieurs mines sont regroupés pour être concassés et triés dans un même lieu) que dans les ateliers domestiques.

La présence de percuteurs en pierre (maillets, piochons ou encore ciseaux) en contexte d'extraction minière permet de supposer une période d'exploitation se situant entre le Néolithique et l'âge du Bronze car les percuteurs en pierre tendent à disparaître complètement avec l'apparition de l'outillage en fer (Blanco Freijeiro et Rothenberg, 1981). Ces outils sont ainsi très rarement retrouvés à l'âge du Fer où ils sont considérés comme des outils en remploi. Les maillets emmanchés seraient alors réutilisés pour broyer du minerai. Deux cas ont été recensés en France : le réemploi d'un maillet en pilon pour broyer le minerai dans une mine d'or du Limousin (Cauuet, 1991) et un maillet à rainures pour broyer les scories de fer dans l'Indre (Cordier, 1963). De tels remplois sont également signalés au Pays de Galles (Timberlake et Marshall, 2013). Cependant, il n'est pas à exclure que les maillets puissent également être réutilisés pour l'extraction minière. Hunt Ortiz (2005 p78-79) suggère que des maillets chalcolithiques semblent être réutilisés au Bronze final dans la mine de cuivre de Cueva del Monje (Espagne). Cela pourrait également être le cas des maillets en pierre préhistoriques associés à des matériaux d'époques puniques et romaines découverts dans certaines mines de la province espagnole de León (Martínez *et al.*, 2014).

Ces exceptions sont néanmoins très rares et il est admis que la présence de percuteurs en pierre est caractéristique de la présence de mines exploitées avant l'âge du Fer. Dans certaines mines qui n'ont fait l'objet que de prospections ou qui ne sont désormais plus accessibles, la présence de maillets constitue l'un des seuls indices archéologiques témoignant de leur exploitation au Néolithique/Chalcolithique et/ou à l'âge du Bronze. C'est notamment le cas en Calabre où la découverte de très nombreux maillets permet de supposer une exploitation importante du cuivre (Larocca et Breglia, 2016).



Figure 22 : Carte de la Calabre présentant les trois régions où la présence de maillets permet de supposer l'exploitation du cuivre. Des mines ont été découvertes et fouillées dans la région 1 (en jaune) alors que dans les régions 2 et 3 (en vert) les mines n'ont pas encore été documentées. Source : Larocca et Breglia, 2016.

En conclusion, localiser les mines anciennes, les fouiller et les dater constitue un travail de longue haleine, complexifié par la présence de possibles reprises minières postérieures à l'âge du Bronze. Ces reprises effacent les traces d'extraction et font disparaître de précieuses informations.

Cependant, les mines ne constituent pas le seul témoin de la présence d'extractions minières. Les sites où sont réalisées les étapes de la chaîne opératoire suivant l'extraction minière (minéralurgie et métallurgie extractive) permettent eux aussi de définir la présence d'anciennes zones minières.

II/1.b Difficulté de l'étude des sites de minéralurgie

Les mineurs extraient une masse contenant de la roche et de nombreux minéraux que l'on nomme minerai (Figure 23). Les minéraux qui seront fondus pour obtenir du métal ne constituent qu'une petite partie du minerai qui ne peut pas être directement fondu car il contient des fragments de roches, de la gangue⁴⁵ ou encore des minéraux métallifères pouvant gêner le processus métallurgique.

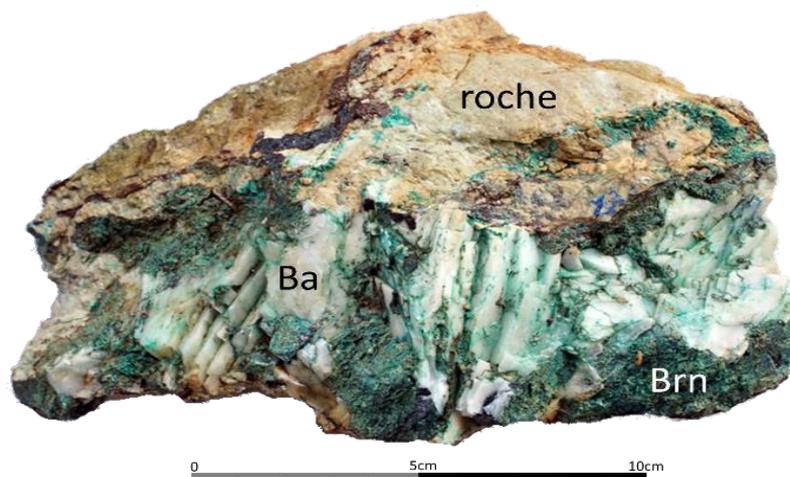


Figure 23 : Exemple de minerai composé de roche, de gangue (ici de la baryte : Ba) et de minéraux métallifères (ici de la bournonite : Brn), district de Fayet, Aveyron.

Les minerais extraits sont donc triés et les fragments les plus riches sont concassés et lavés pour séparer les minéraux porteurs des métaux des éléments stériles des minerais. Ces deux opérations successives de traitement correspondent à la phase de minéralurgie. Elles visent à obtenir un concentré de minerai correspondant aux minéraux broyés et libérés de toutes impuretés.

Les opérations sont réalisées aux abords directs des mines dans le but d'éviter d'avoir à déplacer des quantités importantes de minerais très pauvres et très lourds. De plus, si de premiers tris grossiers peuvent avoir lieu directement dans les espaces miniers, le tri fin des minéraux est réalisé dans des aires dédiées.

Tri et concassage des minerais, mise en place de haldes

Le terme de halde est employé pour désigner l'accumulation de rejets aux abords des mines. Ce terme englobe celui de stériles francs et de stériles de sélectivité (Figure 24). Les stériles francs correspondent à des matériaux quasiment dépourvus de minerais (la roche encaissante et la gangue par exemple) et les stériles de sélectivité à des matériaux rejetés par les mineurs car trop peu minéralisés

⁴⁵ Minéraux sans valeur économique dans lesquels sont inclus les minéraux recherchés

pour être fondus⁴⁶. Il peut alors s'agir de fragments de gangue ne présentant que des mouchetures de minéraux métallifères ou des minéraux métallifères n'intéressant pas les mineurs.

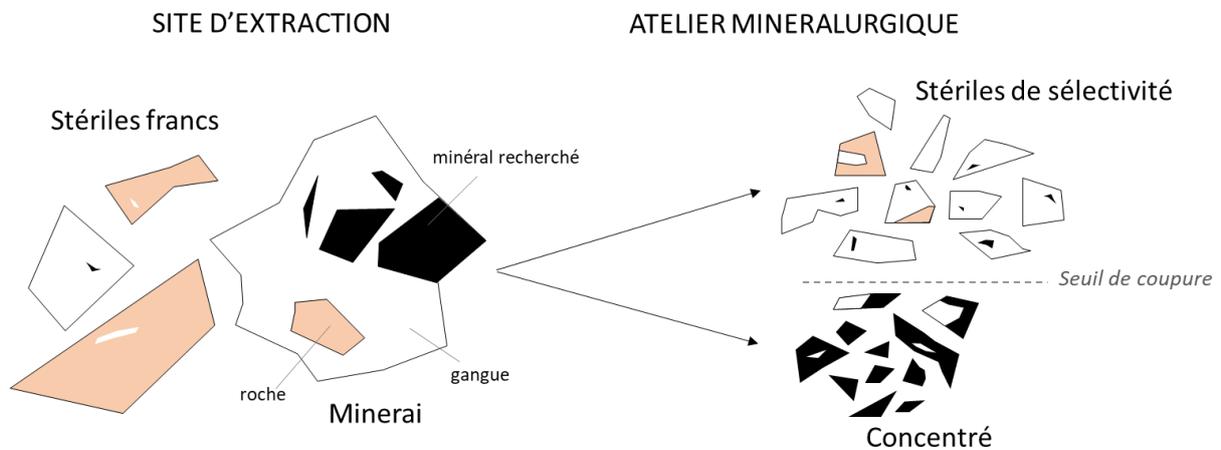


Figure 24 : Type de stériles générés par différentes phases d'exploitation. Schéma : Céline Tomczyk.

Ainsi, les stériles francs sont généralement rejetés aux abords directs des exploitations et forment des haldes marquées contenant de grands blocs. Les stériles de sélectivité sont en général contenus dans différents niveaux de haldes pouvant être localisés à plusieurs centaines de mètres de la structure d'extraction. Ils présentent des fragments de petite taille (centimétrique à millimétrique) car il s'agit de rejets de concassage (Figure 25).



Figure 25 : Atelier présentant plusieurs phases de minéralogie fouillées au Minier (Viala du Tarn, Aveyron). Photographie de gauche : halde grossière (US 6083 : stériles francs) recouvrant une halde à fragments plus petits et contenant de plus nombreux fragments de gangue (US 6186 stériles de sélectivité). Photographie au centre : sol d'atelier où des fragments de minerais concassés plurimillimétriques sont conservés. Photographies de droite : contenu des sols d'ateliers, prises de vue à l'aide d'une Dino-lite. Photographies : Céline Tomczyk.

⁴⁶ La quantité minimale de minéral devant être présente dans les minerais pour être récupérée par les processus métallurgiques se nomme « seuil de coupure » et diffère selon les périodes et les régions.

Des haldes souvent recouvertes et peu visibles dans les paysages

Les haldes peuvent être discrètes dans les paysages car elles correspondent à des amas successifs de dimension plus ou moins importante (Figure 26) dans lesquels sont parfois encore présents des outils tels que des maillets ou des outils de concassage tels que des pilons et des galets à cupule⁴⁷.



Figure 26 : Exemple de halde (forme d'amas correspondant à des déversements successifs) dans le paysage ici recouverte par un chemin forestier et visible grâce aux coupes rases effectuées dans la parcelle. La halde contient des fragments de gangue de taille millimétrique à centimétrique ainsi que quelques fragments de malachite (minéral de cuivre vert) : il s'agit de stériles de sélectivité ; Photographies : Céline Tomczyk.

Les haldes sont parfois recouvertes par une végétation rase⁴⁸ ou par une végétation pouvant se développer malgré la présence de métaux lourds : des plantes métalophytes. Cette spécificité végétale est moins évidente pour les haldes anciennes souvent recouvertes de couches de sédiments colluvionnés.



Figure 27 : Ancienne halde recouverte par une faible végétation (Aveyron). Photographie : Céline Tomczyk.

⁴⁷ La seule présence de galets à cupule ne permet pas d'identifier d'anciens ateliers de minéralurgie. La théorie de Barrouquère *et al.* (2004) proposant que des galets retrouvés dans les Landes puissent être liés au concassage de minerais de cuivre du fait de leur ressemblance avec les exemplaires découverts à Cabrières est peu convaincante car ces derniers pourraient avoir de nombreuses fonctions autres que minières.

⁴⁸ Dans le désert omanais, peu végétalisé, des zones riches en scories ont été repérées sur des images satellites (Sivitskis *et al.*, 2019).

Les haldes contenant encore des minéraux métallifères — qu’il s’agisse de stériles de sélectivité ou de pertes lors du processus de concassage et/ou de tri — peuvent alors être réexploitées lors de reprises minières postérieures car elles contiennent encore des minerais. Un cas de ce type est connu l’étain dans les monts Métallifères où les haldes de l’âge du Bronze ont été reprises à la période médiévale (Tolksdorf *et al.*, 2020).

Lavage du minerai

Le tri et le concassage du minerai sont suivis d’une phase de lavage. Son but consiste à séparer par gravité les minéraux porteurs des métaux des fragments de gangue que le concassage n’a pas suffi à isoler. Cela est possible car tous les minéraux ne possèdent pas la même densité. Les minéraux contenant des métaux sont en effet généralement plus denses que la gangue dans laquelle ils sont contenus⁴⁹.

Le lavage s’effectue sur des minerais finement broyés⁵⁰. Néanmoins, comme résumé par Wager et Ottaway (2018), très peu de zones de lavage ont été retrouvées en contexte archéologique. Les sites présentant le plus de découvertes se situent dans le Tyrol et plus précisément dans la région cuprifère du Mitterberg où des caissons de lavage en bois⁵¹ datés d’environ 1300 av. J.-C. ont été découverts à Troiboden⁵² (Stöllner *et al.* 2016), Scheidehalde (Koch Waldner, 2019), Bachalm (Pichler *et al.*, 2018) ou encore Mauk F. (Nicolussi *et al.*, 2015). Au Pays de Galles, des couches de matériel argilo-silteux finement rubanées découvertes à Mynydd Parys (Anglesey) pourraient correspondre aux résidus d’une centaine de lavages successifs (Jenkins *et al.*, 2021) et une possible rigole de lavage⁵³ a été découverte à Copa Hill (Cwmystwyth). La fonction de cette dernière demeure néanmoins incertaine et il pourrait être plus probable qu’elle ait assuré une fonction de drainage (Timberlake, 2003 p. 69-70 ; Timberlake et Craddock, 2013). Enfin, des fosses creusées dans du schiste contenant des alternances de lits fins de limons et sables siliceux⁵⁴ ont été interprétées comme des bassins de lavage du minerai à Cabrières (Ambert *et al.*, 1984 ; Ambert, 1999).

II/1.c Caractéristiques des sites de minéralurgie extractive

Les minéraux triés, concassés et lavés doivent être fondus pour obtenir du métal. Cette étape se nomme métallurgie extractive.

Distance séparant les mines et les ateliers où le minerai est fondu

Les ateliers de métallurgie extractive sont généralement implantés à proximité des zones d’extraction minière (O’Brien, 2015 p.229-233) et ce, probablement en grande partie afin d’éviter le transport de minerais lourds et volumineux. Il faut en effet plus d’une dizaine de kilogrammes de

⁴⁹ La densité des minéraux de cuivre tels que la malachite (3,98), la chalcoppyrite (4,2) ou encore la tétraédrite (4,97) est plus forte que celle des minéraux communs des gangues tels que le quartz (2,65) et la dolomite (2,85). Seule la baryte présente une densité particulièrement élevée (4,5) mais les gangues de baryte sont peu courantes.

⁵⁰ Les expérimentations menées dans la région de Mitterberg sur des chalcoppyrites par des équipes allemandes montrent qu’il faut les broyer jusqu’à obtenir des fragments de taille inférieure à 5 mm (Wager et Ottaway, 2018).

⁵¹ Le caisson était secoué dans l’eau, les minéraux de cuivre descendaient au fond du caisson quand la gangue, moins dense, restait préférentiellement dans les parties supérieures du caisson.

⁵² L’analyse par fluorescence X des tas de déchets de lavage de Troiboden a révélé qu’ils ne contenaient que 0,1 à 0,5 % de cuivre, ce qui démontre l’efficacité de la méthode employée.

⁵³ Il s’agit de rondins coupés en deux et évidés.

⁵⁴ La silice est supposée issue du concassage des cristaux de quartz présents dans les filons minéralisés en cuivre.

minerais pour obtenir un kilogramme de cuivre⁵⁵. Ainsi, dans certaines régions éloignées de toutes zones minéralisées, il est hautement plus probable que le métal/le cuivre ait été apporté sous forme métallique et non sous forme de minerais⁵⁶. Kuijpers (2008 p.76-77) fait à ce titre deux remarques intéressantes dans le cas des Pays-Bas :

- Transporter d'énormes quantités de minerai (volumineux et dense) pour extraire une petite quantité de cuivre brut ne semble pas pertinent tant cela demande d'effort physique ;
- Le transport de ces quantités massives de minerai aurait probablement laissé des traces.

Si aucun travail de recensement n'a clairement établi de distance moyenne entre les mines et les ateliers, il semble que cette dernière est en moyenne d'un à deux kilomètres et ne dépasse que rarement 10 km, et ce quel que soit la région et la période d'activité des ateliers. C'est le cas au Chalcolithique à Cabrières dans l'Hérault (Ambert *et al.*, 2005) et dans l'ensemble de la péninsule Ibérique (Gauss *et al.*, 2004 ; de Blas Cortina 2005) ; mais aussi à l'âge du Bronze dans les Alpes occidentales et orientales (Bourgarit *et al.*, 2010 ; Moulin *et al.* 2012 ; Tropper *et al.*, 2017 ; Haubner *et al.*, 2023), dans les îles Britanniques (Williams, 2013 ; Ixer et Budd, 1998), en péninsule Ibérique (Hunt Ortiz, 2003) ou même en Anatolie (Massa, 2018).

Les Cyclades constituent une exception : bien que la plupart des ateliers de métallurgie extractive soient situés à moins de 2 km des gisements de cuivre, un approvisionnement en minerai d'île en île semble possible. La Crète⁵⁷ s'approvisionnait probablement en minerai par un transport maritime de plusieurs jours de bateau (Georgakopoulou, 2016)⁵⁸ et il en serait de même pour l'île de Kythnos (Muhly, 2006).

Les raisons pouvant expliquer une distance importante entre mines et ateliers de métallurgie extractive sont de deux ordres : l'absence de ressources suffisantes pour effectuer la métallurgie et/ou une centralisation des ateliers.

Pourquoi centraliser les ateliers de métallurgie extractive

Car les ressources nécessaires ne sont pas disponibles localement

Le choix de l'implantation des ateliers repose en partie sur la disponibilité des ressources nécessaires aux processus pyrométallurgiques. Ces ressources incluent le bois ou plus exactement le charbon de bois (indispensable pour créer une atmosphère réductrice) et la présence de matériaux réfractaires pour la confection des réacteurs (Figure 28). La présence d'eau mais aussi de vent (pour

⁵⁵ Des expérimentations reconstituant les processus employés à l'âge du Bronze dans le Tyrol et en Égypte montrent qu'il faudrait environ 60 kg (Rademakers, 2015) à 450 kg (Rose *et al.*, 2020) de chalcopirites pour obtenir un 1 kg de cuivre pur. Ces rendements semblent néanmoins faibles en comparaison d'expérimentations plus anciennes supposant des pertes allant de 13 % (Stöllner *et al.*, 2011) à 25 % (Zschocke et Preuschen, 1932) de cuivre lors de la fonte de chalcopirites dans des réacteurs employés à l'âge du Bronze dans le Tyrol.

⁵⁶ Dans les plaines sédimentaires de l'Indus (dépourvues de gisements métalliques (Law, 2011)) vers 2600 av. J.-C. les lingots sont importés vers les grands centres urbains. Seule la métallurgie d'élaboration a eu lieu dans des sites dans la région principale de l'Indus, et à ce jour, il n'existe aucune preuve de l'importation et de la fusion de minerais métallifères.

⁵⁷ Les ressources en métaux de l'île sont faibles et n'ont pas pu faire l'objet d'une exploitation massive.

⁵⁸ Cette hypothèse est basée sur les résultats d'analyses isotopiques effectuées sur des sites d'ateliers pyrométallurgiques crétois indiquant la réduction de cuivre importé sur l'île, probablement en provenance des Cyclades orientales (Stos-Gale et Gale, 2006).

aider à ventiler les fours mais aussi pour évacuer les vapeurs) peut également s'avérer importante dans le choix d'un emplacement.

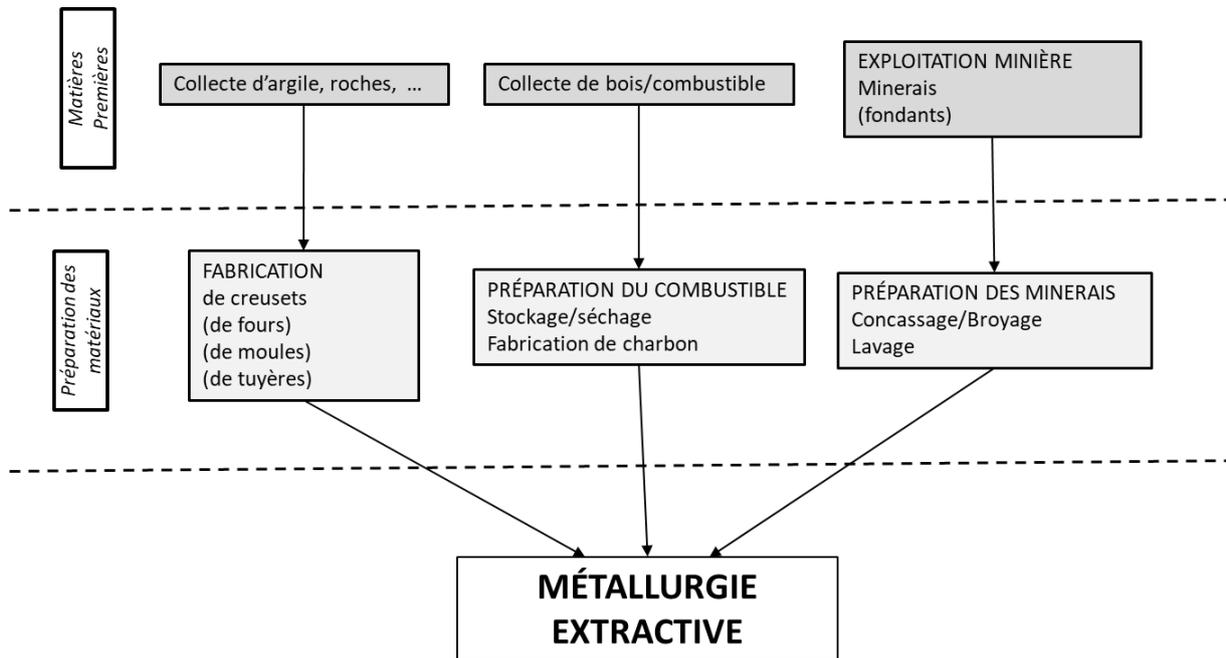


Figure 28 : Ressources nécessaires à la métallurgie (l'eau et le vent ne sont pas indiqués, mais potentiellement utilisés) pour les processus métallurgiques. Modifié par Céline Tomczyk d'après Hoffmann et Miller, 2014.

Il n'est donc pas nécessaire d'entreprendre la lourde tâche de déplacer le minerai sur de grandes distances sauf si les ressources nécessaires à la métallurgie ne sont pas disponibles dans l'environnement immédiat des mines. Ce cas de figure est connu en milieu désertique, dans le Sinaï, où l'oasis de Bir Nasb (parfois dénommé Seh Nasb) a abrité plus de 3000 fours individuels ayant servi à fondre des minéraux de cuivre. Ce centre de concentration des activités et situé à un endroit stratégique, sur une plate-forme bien ventilée et à proximité de sources d'eau et de bois pouvant servir de combustible (Tallet *et al.*, 2011). Plusieurs voies d'accès reliaient de plus les mines situées dans le désert à l'oasis.

L'approvisionnement en bois est primordial pour la métallurgie et le premier à avoir mis en avant la très forte demande en charbon des processus de pyrométallurgie est Home (1982). En étudiant les productions de cuivre du V^e millénaire en Iran, il a estimé que 20 kg de charbon sont nécessaires pour fondre 1 kg de cuivre (soit un ratio de 20 pour 1). Selon lui les fours pouvaient contenir 5 kg de cuivre et une seule opération métallurgique demandait alors 100 kg de charbon de bois soit environ 700 kg de bois frais (ce qui pourrait représenter un peu plus de 3 jours de travail de collecte pour un homme seul). Ce rapport est semblable aux conclusions de Harding (2000 p217) qui estime également un ratio de 20 pour 1. Il est cependant à noter que les quantités de charbon nécessaires semblent varier selon le type de réacteur, le type de minerai fondu mais aussi le type de bois utilisé. Ainsi, Rothenberg (1978) estime quant à lui le ratio à 40 pour 1 dans les fours du site de Timna (actuel Israël). Dans le cadre du PCR Mines et Métallurgies en Occitanie nous sommes parvenus à fondre des minerais de cuivre-plomb (des bourmonites) partiellement oxydés avec un ratio de seulement 2 pour 1 mais sous ventilation forcée (Figure 29 ; voir également Maillé *et al.*, 2019, p.245-289).



Figure 29 : Expérimentation de fonte de bournonites sous atmosphère réductrice dans une reconstitution de four-cuvette sur le site du Planet. Photographie : Céline Tomczyk.

Centraliser les activités métallurgiques pour mieux les contrôler

La centralisation des productions pourrait ne pas être motivée que par des facilités d'accès aux ressources mais pourrait être liée à un contrôle accru des productions par des élites tel que cela est supposé en Égypte dès 1100 av. J.-C. (Luria, 2021) ou encore à Chypre (Knapp *et al.*, 1990 ; Knapp *et al.*, 2001).

La volonté de contrôler la composition des alliages pourrait également être en partie la cause de la présence de grands ateliers centralisés comme cela est supposé dans une partie du Tyrol autrichien (Pernicka *et al.*, 2016).

Des ateliers de métallurgie d'extraction souvent bien datés

Si des exceptions existent, ateliers de métallurgie extractive et mines sont régulièrement localisés à proximité d'où l'intérêt que les considérer dans le cadre de ce travail de recensement. Ces sites, contrairement aux mines, sont de plus généralement très bien datés⁵⁹ et permettent d'affiner les datations des exploitations minières. En effet, la grande quantité de charbons liés aux processus métallurgiques offre des possibilités de datation importantes et permettent d'obtenir des dates radiocarbone donnant de précieux indices quant à la période de fonctionnement de l'atelier et donc, par extension, de la zone minière qui lui est associée. Le mobilier associé aux sites mais aussi la typologie des creusets/fours ou plus rarement des tuyères peuvent parfois permettre une datation⁶⁰.

⁵⁹ Il est rare que les scories ne soient datées que par des méthodes peu précises telles que la thermoluminescence. Cette méthode présentant une marge d'erreur très conséquente n'est que rarement employée. Par exemple, les scories d'al-Batin, en Oman, ont été datées par cette méthode de 2500 av. J.-C. \pm 1000 ans (Wagner et Yule, 2007).

⁶⁰ Un exemple de datation par la typologie des tuyères dans le Sinaï est disponible dans Abdel-Motelib *et al.*, 2012.



Figure 30 : Présence de charbons (reconnaisables par leur couleur noire et leur aspect strié) dans une scorie.
Photographie : Céline Tomczyk.

Les ateliers de métallurgie extractive sont néanmoins de vestiges complexes à étudier de par la difficulté d'identifier les processus métallurgiques employés.

Diversité des processus de métallurgie extractive

Les réacteurs (creuset, vases-fours, fours) dans lesquels se déroulent les opérations sont rarement retrouvés intacts car ils sont souvent démantelés pour extraire le métal (Timberlake, 2007). De plus, les parois des fours et les tuyères sont souvent recyclées. Ainsi, les vestiges les plus couramment retrouvés ne sont pas les réacteurs dans lesquels les opérations sont menées mais plutôt les scories issues de ces opérations. Ces dernières sont régulièrement découvertes amoncelées en position secondaire et ont souvent été brisées (Figure 31)⁶¹.



Figure 31 : Exemple de scories affleurant en surface (Alpes suisses, datation probable du premier âge du Fer).
Photographie : Céline Tomczyk.

⁶¹ Pour en libérer d'éventuelles billes de métal ou de matte voire pour être refondues pour extraire le cuivre qu'elles contiennent encore (à ce sujet voir notamment Della Casa *et al.*, 2016).

La quantité de scories produites dépend de plusieurs facteurs tels que la composition chimique du minéral, la température de fusion, les conditions du processus de fusion et la présence d'impuretés. La réduction de la cassitérite produit très peu de scories (Tizzoni, 1999 ; Timberlake, 2007) et, de ce fait, les ateliers de métallurgie extractive d'étain sont difficiles à retrouver. Il en va de même pour les ateliers de métallurgie du cuivre chalcolithiques qui ne produisent eux aussi que très peu de scories (quelques grammes tout au plus) et sont également extrêmement complexes à retrouver (Radivojević *et al.*, 2010). Cela s'explique par le fait que la fonte d'oxydes ou de carbonates de cuivre⁶² — largement exploités au Chalcolithique — est supposée ne pas produire de scorie (Craddock, 2009) alors que la fonte d'un minéral de cuivre contenant du fer produira nécessairement une scorie contenant le fer qui a été séparé du cuivre.

Processus de métallurgie extractive du cuivre

Les processus métallurgiques employés pour fondre des minerais de cuivre varient selon les types de minéraux de cuivre (Tableau 5). La métallurgie supposée la plus simple à réaliser est la réduction à « basse » température (700 °C) sans ajout de fondant. Cette métallurgie permet d'extraire le cuivre d'oxydes et carbonates de cuivre et/ou de cuivres gris mais encore, de sulfures de cuivre dont les chalcopyrites à condition que ces dernières soient fondues avec des carbonates ou des oxydes de cuivre.

Type de métallurgie	Minéraux concernés	Produit obtenu
Aucune ou chauffe légère	Cuivre natif	Cuivre métal
Réductrice dès 700 °C	Oxydes et/ou carbonates de cuivre	Cuivre métal
	Oxydes et/ou carbonates de cuivre + sulfures primaires (= <i>cosmelting</i>)	Cuivre métal + scories
	Cuivres gris	Cuivre métal riche en arsenic et/ou antimoine (alliage naturel) + scories
Grillage (oxydation) puis réduction à >1000 °C avec ajout de fondant	Cuivres gris	Cuivre métal + scories
	Sulfures primaires	Cuivre métal + nombreuses scories

Tableau 5 : Résumé des processus métallurgiques utilisés à la Protohistoire. Tableau : Céline Tomczyk.

Réduction des minéraux de cuivre

L'extraction métallurgique du cuivre issu d'oxydes et/ou de carbonates de cuivre ne nécessite qu'une seule opération métallurgique. Les minéraux broyés⁶³ sont recouverts de charbons de bois. Le charbon ne joue pas seulement un rôle thermique, il permet également de produire une atmosphère dite réductrice. La couche de charbons sépare les minéraux de l'air ambiant et les gaz qui se forment sous cette couche ont la capacité de réagir avec l'oxygène et de l'éliminer. Plus précisément, en conditions réductrices, le CO contenu dans le charbon réagit avec les carbonates de cuivre, il en résulte un départ, sous forme gazeuse, de l'oxygène (O), du carbone (C) et de l'hydrogène (H) contenus dans les

⁶² Les oxydes sont une classe de composés chimiques qui comprennent un élément chimique combiné avec de l'oxygène. La cuprite (Cu₂O) est un oxyde de cuivre (combinant cuivre et oxygène). Cependant, les carbonates de cuivre tels que la malachite (CuCO₃Cu(OH)₂) ne sont pas des oxydes mais des carbonates de cuivre : ils constituent une classe distincte de composés chimiques car ils contiennent le groupe fonctionnel CO₃ (carbonate).

⁶³ Minerai préalablement trié puis broyé à l'aide d'outils tels que des percuteurs, des pierres à cupule ou encore des mortiers afin de ne conserver que les minéraux de cuivre.

carbonates de cuivre. Du cuivre (Cu) est alors obtenu à la fin du processus (Pickles et Peltenburg, 1998; Ryndina *et al.*, 1999; Bourgarit et Mille, 2001).

La malachite se décompose en CuO dès 400 °C : $\text{CuCO}_3\text{Cu(OH)}_2 \rightarrow 2\text{CuO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Ce CuO est ensuite réduit par le CO du charbon à partir de 700 °C : $\text{CuO} + \text{CO} \rightarrow \text{Cu} + \text{CO}_2$

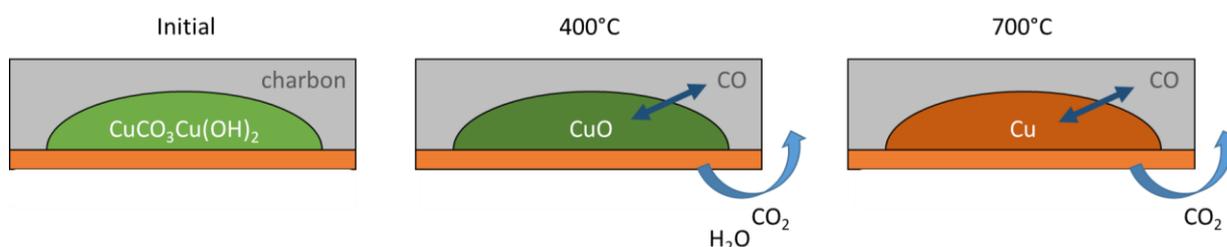


Figure 32 : Schéma simplifié illustrant la réduction des carbonates de cuivre. Cette réduction est opérée à l'aide de charbons de bois placés au sommet des minéraux concassés. Schéma : Céline Tomczyk.

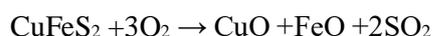
Ce type de traitement ne produit que peu ou pas de déchets métallurgiques mais une scorie très riche en cuivre va se former si le minerai et sa gangue ne sont pas correctement séparés (Rovira et Ambert, 2002 ; Craddock, 2009).

Cosmelting de carbonates et de sulfures de cuivre

Une atmosphère réductrice peut également être obtenue par l'ajout de sulfures⁶⁴. À haute température (> 1200 °C), l'ajout d'environ 20 % de sulfures de cuivre permet d'extraire le cuivre contenu dans des carbonates de cuivre (Rostoker, 1975 ; Rostoker *et al.*, 1989 ; Lechtman et Klein, 1999). On nomme ce procédé le *cosmelting* que nous pourrions traduire par fusion conjointe ou co-fusion. Dans le cas du *cosmelting* de carbonates et de sulfures de cuivre, l'oxygène présent dans les carbonates oxyde les sulfures (Rostoker *et al.*, 1989 ; Bourgarit et Mille, 2001). La séparation du métal et des scories est alors beaucoup plus efficace que dans le cas d'une réduction de carbonates/oxydes de cuivre seuls : les scories produites sont beaucoup moins riches en cuivre (Lechtman et Klein, 1999).

Métallurgie des sulfures de cuivre

Le *cosmelting* est à distinguer de l'extraction du cuivre contenu dans les sulfures de cuivre non associés à des oxydes et/ou carbonates de cuivre. Cette extraction se fait en deux étapes. La première de ces étapes implique un grillage du concentré de minerai finement broyé (Zwicker, 1989), aggloméré avec de l'argile ou de la matière organique pour former des boulettes (Strahm, 1988). Les boulettes de sulfures agglomérés sont déposées sur du bois en combustion. Les températures à atteindre varient entre 600 et 800 °C (Bourgarit et Mille, 2001). Le cuivre (Cu) et le fer (Fe) sont oxydés et séparés du soufre (S) qui part sous forme gazeuse (SO₂) :



⁶⁴ Un sulfure est un minéral qui se compose d'éléments liés à des atomes de soufre (S). La chalcopirite (CuFeS₂) est composée de cuivre (Cu), de fer (Fe) et de soufre (S) : c'est un sulfure de cuivre et de fer.

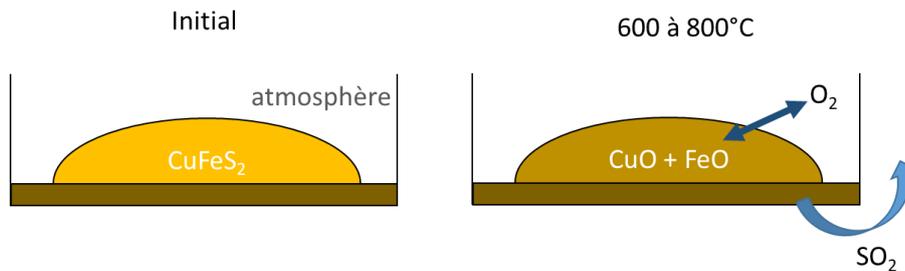
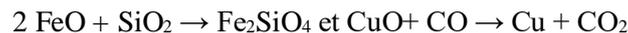


Figure 33 : Schéma simplifié illustrant l'oxydation des sulfures de cuivre. Cette oxydation est pratiquée à l'air libre et donc sous atmosphère oxydante. Le soufre (S) contenu dans la chalcopirite réagit avec l'oxygène de l'atmosphère. Ce départ se fait sous forme de SO_2 , un gaz toxique et irritant. Un mélange de CuO et de FeO est obtenu à la fin du processus. Schéma : Céline Tomczyk.

Ce grillage est ensuite suivi d'une fusion sous atmosphère réductrice (Figure 34) qui diffère cependant beaucoup de la fusion précédemment évoquée du fait de la présence de FeO et de la nécessité de l'ajout d'un fondant, souvent du quartz (SiO_2)⁶⁵, permettant de lier le fer présent à de la silice.

Cette opération demande d'atteindre des températures de fusion élevées : 1000 à 1300 °C⁶⁶ pour extraire le cuivre d'une chalcopirite (Pickles et Peltenburg, 1998 ; Ryndina *et al.*, 1999 ; Bourgarit et Mille, 2001 ; Addis *et al.*, 2016 ; Rose *et al.*, 2020). Le fer (Fe) est séparé du cuivre réduit par le CO du charbon :



Du cuivre (Cu) est obtenu à la fin du processus, le fer (Fe) est quant à lui piégé, lié à la silice dans une scorie. Isoler le fer du cuivre est peut-être plus significatif d'une innovation que le grillage en lui-même (Tomczyk *et al.*, 2021a).

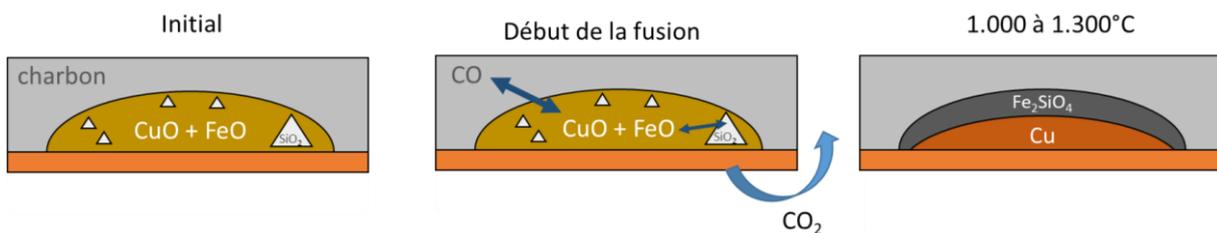


Figure 34 : Schéma simplifié illustrant la réduction des sulfures de cuivre. Cette réduction est opérée à l'aide de charbons de bois placés au sommet du CuO et FeO précédemment obtenus auxquels est ajouté du quartz (SiO_2) ici représenté sous forme de triangles. Du cuivre (Cu) est obtenu à la fin du processus, le fer (Fe) est quant à lui piégé, lié à la silice dans une scorie. Une fine matte riche en cuivre se forme au contact entre le Cu métal et la scorie. Schéma : Céline Tomczyk.

La métallurgie des sulfures de cuivre est souvent décrite comme plus complexe à exécuter que la métallurgie des carbonates de cuivre néanmoins, comme cela a été démontré par Bourgarit (2019), il est peu probable que les premiers métallurgistes aient initialement pour objectif d'optimiser leur rendement ; il semble plus juste de penser qu'ils visaient principalement à séparer efficacement le cuivre

⁶⁵ Cette silice peut être ajoutée volontairement ou bien être issue de la gangue contenant les minéraux de cuivre. L'influence de la composition de la gangue ne sera pas abordée ici bien que son rôle soit important dans le phénomène de pyrométallurgie.

⁶⁶ Certains auteurs supposent que l'importance des températures à atteindre conduirait à la généralisation de l'utilisation de fours de réduction (qui connaîtraient plusieurs phases d'évolution : voir Muhly, 2006), permettant d'atteindre une haute température de fusion mais aussi de traiter une plus grande quantité de minerai (Amzallag, 2009) ; nous reviendrons en détail sur cette hypothèse en V/5.b.

des autres éléments chimiques. Or, dans ce cas, l'affinité du fer pour le silicium facilite grandement la séparation du cuivre.

Un autre point abordé par cet auteur concerne le fait que la métallurgie des carbonates de cuivre (sauf s'ils sont parfaitement purs auquel cas aucune scorie n'est produite) demande de briser les scories pour récupérer le cuivre métallique qu'elles contiennent (Figure 35)⁶⁷.



Figure 35 : Scorie expérimentale obtenue après la fonte d'un mélange de bindhémities oxydées et de barytes. Le cuivre (orangé) est présent dans la scorie (gris sombre). Photographie : Céline Tomczyk.

En revanche, dans le cas de métallurgie des sulfures, le cuivre se sépare de la scorie par gravité et une matte se forme à leur contact (dans cette matte le cuivre est encore associé à un peu de soufre et de fer). La présence de scories en grand nombre et surtout d'une matte est donc caractéristique de la fusion de sulfures de cuivre (Georgakopoulou, 2004). En contexte archéologique, la matte n'est que très rarement retrouvée⁶⁸, ce qui laisse supposer qu'elle a été à nouveau fondue pour extraire le cuivre qu'elle contenait.

Enfin, si cette intervention en deux phases (oxydation puis réduction) permet d'extraire le cuivre de chalcopyrites, elle permet également d'extraire le cuivre des cuivres gris en ne conservant pas l'arsenic part sous forme gazeuse en même temps que le soufre lors du grillage⁶⁹. Le grillage de cuivres gris permet d'obtenir un cuivre « purifié » et non pas un alliage naturel cuivre-arsenic produit dans le cas d'une réduction seule (Forbes, 1966 ; McKerrell et Tylecote, 1972 ; Bourgarit *et al.*, 2003 ; Haubner et Strobl, 2023). Le devenir de l'antimoine contenu dans les cuivres gris (tétraédrites) est moins étudié et il se pourrait que ce dernier soit plus complexe à évacuer que l'arsenic sous atmosphère oxydante (Haubner et Strobl, 2023).

⁶⁷ Les teneurs en cuivre des scories peuvent avoisiner les 15% (Radivojević, 2015 ; La Duc *et al.*, 2022) et même atteindre 30 % (Bourgarit, 2007 ; Nezafati *et al.*, 2021).

⁶⁸ Il arrive que des mattes soient exceptionnellement retrouvées comme c'est le cas dans des scories serbes datées de 1880–1650 av. J.-C. (Mehofer *et al.*, 2021).

⁶⁹ Les taux d'arsenic liés au cuivre peuvent alors être progressivement abaissés par la réalisation de plusieurs phases d'oxydation successives.

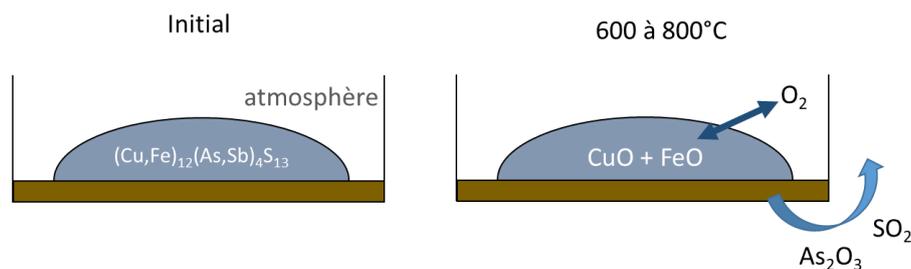


Figure 36 : Schéma simplifié illustrant l'oxydation de cuivres gris. Cette oxydation est pratiquée à l'air libre et donc sous atmosphère oxydante. Le soufre (S) et l'arsenic (As) réagissent avec l'oxygène et sont rejetés dans l'air sous forme de gaz toxiques et irritants. Schéma : Céline Tomczyk.

Les processus métallurgiques employés pour fondre d'autres minéraux métalliques dépendent également du fait que ces minéraux soient oxydés ou sulfurés. Ainsi, si le minerai d'étain est naturellement sous forme oxydée et ne nécessite qu'un processus de réduction pour obtenir de l'étain métal (Tizzoni, 1999 ; Timberlake, 2007) mais la métallurgie du principal minerai de plomb(-argent), la galène est plus complexe.

Métallurgie du plomb et du plomb-argent

La métallurgie du plomb argentifère comprend elle aussi deux étapes : la réduction puis la coupellation⁷⁰. La réduction de minéraux de plomb sulfurés (les galènes (PbS)) conduit à la formation de scories de réduction et de plomb métallique qui peut être argentifère si les galènes fondues contiennent un peu d'argent. Ce plomb métal riche en argent est alors appelé plomb d'œuvre.

Le plomb et l'argent contenus dans le plomb d'œuvre peuvent être séparés par un processus de coupellation. Cette seconde étape consiste à oxyder le plomb en litharge en chauffant le plomb d'œuvre à une température d'environ 1000 °C sous un courant d'air. Les métaux de base (tels que le plomb mais aussi le cuivre) se dissolvent alors dans la litharge alors que l'argent, chimiquement plus inerte, n'est pas oxydé et reste à l'état métallique au-dessus de la litharge.

Des litharges sont régulièrement retrouvées sur les sites archéologiques, en particulier en Grèce au tout début du III^e millénaire (Weisgerber et Pernicka, 1995 ; Papadopoulou, 2011 ; Nerantzis *et al.*, 2016 ; Koukouli-Chrysanthaki et Papadopoulos, 2018) puis vers 1500 av. J.-C. (Gale et Stos-Gale, 1981 ; Rehren *et al.*, 1999 ; Gale *et al.*, 2009) mais la présence de litharges ne témoigne pas nécessairement de la présence d'un atelier de coupellation. En effet, contrairement aux scories d'étain ou de cuivre qui ne sont pas échangées⁷¹ (Hoffmann et Miller, 2014), la litharge pouvait faire l'objet d'échanges commerciaux⁷². Elle pouvait être utilisée pour divers usages et notamment servir de pigments (Sotiropoulou *et al.*, 2010) ou encore être fondue pour en extraire le plomb qu'elle contenait. La présence de litharges sur un site ne peut donc pas être considérée comme la preuve qu'un processus

⁷⁰ Une troisième étape peut éventuellement être présente : la fonte des litharges pour obtenir du plomb métal.

⁷¹ À l'exception de scories de cuivre produites dans les Alpes orientales qui seraient vraisemblablement broyées puis utilisées pour la confection des céramiques (Stöllner, 2010).

⁷² Ce fait est avéré dès 800 av. J.-C. : une épave (Mazarrón 2), chargée de près de trois tonnes de litharges ainsi que des amphores phéniciennes a été découverte dans le sud-est de la péninsule Ibérique au large (Negueruela *et al.*, 2004 ; Polzer, 2014). Si le devenir de ces litharges est incertain, elles pourraient avoir été transportées facilement par voies maritimes (Renzi *et al.*, 2009 ; Tejedor, 2018). Un grand système de navigation côtière sous contrôle phénicien permettait alors probablement de diffuser ce plomb le long des côtes espagnoles (Murillo-Barroso *et al.*, 2016).

de coupellation y a eu lieu si aucune structure métallurgique n'y a été mise en évidence. En revanche, la présence de scories et de minerais indique qu'il a eu une activité de réduction⁷³.

II/1.d Différencier les ateliers de métallurgie d'extraction et d'élaboration

Il est primordial de distinguer la métallurgie liée à la chaîne opératoire minière (métallurgie d'extraction, en anglais *smelting*) et la métallurgie liée à la réalisation d'objets à partir d'un matériau déjà sous forme métallique (métallurgie d'élaboration, en anglais *melting*)⁷⁴.

Les métallurgies d'extraction et d'élaboration apparaissent très différentes tant de par la matière fondue que de par les produits obtenus. Distinguer les scories issues de ces deux processus est pourtant complexe⁷⁵ au point que plusieurs auteurs proposent des pistes de distinction basées sur plusieurs critères. L'une des classifications les plus riches est celle proposée par Hoffmann et Miller (2014) découlant de la compilation des travaux de Craddock (1989), Bayley (1985) et de Cooke et Nielsen (1978) (Tableau 6). Une autre définition intéressante est apportée par Belgiorno *et al.* (2009). Elle reprend en grande partie les éléments précédemment listés pour caractériser des ateliers de métallurgie extractive en y ajoutant la proximité d'une source d'eau, la quantité significative de minerai sain et/ou partiellement fondu mais aussi d'enclumes et de pillons pour broyer les minerais et les scories.

Type de matériau	Métallurgie extractive (<i>Smelting</i>)	Métallurgie d'élaboration (<i>Melting</i>)
Minerai/Fondant	- Fragments de minerais généralement trouvés associés aux scories - Présence de gisements à proximité	- Fragments de minerais rares/inexistants - Proximité avec les marchés
Installation/Réacteurs (creusets, vases, fours)	- Pas de cendres - Diamètre généralement < 60 cm - Fortement vitrifié et scorifié - Généralement mal conservés (détruits pour récupérer la masse scorifiée)	- Cendres possibles - Fortement vitrifiées, quelques scories - Généralement mieux préservés (non détruits pour récupérer le métal)
Outils et mobilier (creusets, moules, tuyères, etc.)	- Réacteurs fortement vitrifié et scorifié - Creusets possibles - Moules possibles	- Quelques traces de vitrifications, présence de scories ou de cendres vitrifiées - Creusets possibles - Moules divers
Quantité et aspect des scories	- <i>Grandes quantités (plusieurs kg) de scories dures et denses, de couleur sombre, présentant une structure relativement uniforme et des bulles moins nombreuses et plus grosses que dans les autres cas étudiés.</i> - <i>Présence de culots et de scories en cordon</i>	- <i>Scories beaucoup plus poreuses et plus légères ; moins homogènes mais présentant des inclusions distribuées de manière très hétérogène ; possible présence d'inclusions métalliques macroscopiques</i>

Tableau 6 : Distinction des assemblages des sites de métallurgie extractive et d'élaboration des métaux non ferreux. Traduit de Hoffmann et Miller, 2014.

⁷³ Le présence d'argent dans les scories permettent de définir que les minerais de plomb fondus étaient argentifères. Par exemple à Monte Romero dans le sud de la péninsule Ibérique (début du premier millénaire av. J.-C.) les scories de réduction contenaient un peu d'argent (Anguilano, 2012).

⁷⁴ Une métallurgie dite de transformation est parfois évoquée pour caractériser la fonte d'une masse plus ou moins informe de cuivre dans un moule pour obtenir un lingot. Ce découpage en sous-étapes est justifié : dans le cas des lingots peau de bœuf chypriotes, l'action de refondre le cuivre pour le mouler conduit à des modifications de la composition de ce dernier (Hauptmann *et al.*, 2002). Dans un souci de simplification, nous n'emploierons ici que le terme de métallurgie d'élaboration pour évoquer les transformations appliquées à du cuivre déjà sous forme métallique.

⁷⁵ Comme précisé par Bourgarit (2019), les matériaux céramiques utilisés pour les deux procédés sont souvent les mêmes, à savoir de l'argile ordinaire sans propriétés réfractaires particulières. De plus, la fonte d'un minerai de cuivre peut affecter le récipient en céramique de manière identique à la fonte de cuivre métal. Ainsi, les deux procédés peuvent générer des couches de scories similaires sur la surface interne des récipients.

Ces deux propositions de classification restent toutefois imparfaites. En effet, la définition de Belgiorno *et al.* (2009) correspond à un site associant minéralurgie et métallurgie d'extraction ce qui n'est pas toujours le cas, et la classification de Hoffmann et Miller (2014) est imprécise pour ce qui concerne les scories. Par exemple, dans le cas du cuivre, la quantité de scories produites dépend du type de minéral fondu et les scories issues de la fonte de cuivres gris oxydés peuvent prendre des teintes ocre et être assez poreuses (Burger, 2008 ; Figure 37) : elles ne sont pas sombres et vitreuses comme le suggère la classification d'Hoffmann et Miller (2014).



0  2cm

Figure 37 : Scorie de réduction de tétraédrite ocre et poreuse découverte sur le site néolithique du Planet (Aveyron). Ces scories ne sont ni vitrifiées ni sombres et denses comme le supposerait la classification de Hoffmann et Miller, 2014. Image modifiée d'après une photographie par Emmanuel Dransart.

Les scories issues de la fonte de sulfures de cuivre peuvent elles aussi présenter des couleurs et des textures très variables. Des travaux menés dans les Alpes suisses par Reitmaier-Naef (2019) y montrent un processus métallurgique en trois temps produisant des scories aux faciès très différents allant de scories poreuses riches en inclusions à des scories plates, très denses et très sombres. Ainsi, la texture des scories n'est pas un élément permettant de différencier de manière certaine des scories de métallurgie extractive et d'élaboration.

De plus, il est parfois rapporté que la présence de minerais partiellement fondus dans la scorie indique qu'il s'agit d'une scorie de réduction. La réalité est cependant plus complexe : la présence d'inclusions de minerais dans les scories n'exclut pas de possibles erreurs. Un exemple repris par Bourgarit (2019) concerne l'étude de creusets néolithiques provenant de Suisse, dont une première étude (Maggetti *et al.*, 1990) avait conclu que de la chalcopirite y avait été fondue. Pourtant, des observations optiques des mêmes creusets ont montré que les inclusions de chalcopirite ont été formées par des réactions chimiques après le dépôt du creuset dans des sédiments limoneux (Rehren, 2009).

Il est enfin couramment admis que les récipients utilisés pour la réduction des minerais de cuivre sont plus fins que ceux utilisés pour la fonte de cuivre déjà sous forme de métal (Müller *et al.*, 2006 ; Rovira Llorens, 2005). À Al Claus, dans le sud du Massif central, le matériau scorifié recouvrant les tessons de céramique domestique a ainsi été interprété comme issu de la fusion de chalcopirite (Carozza

et al., 1997) en prenant en compte la fragmentation des vases, leur faible épaisseur et l'absence systématique de réutilisation de la céramique⁷⁶.

Néanmoins, des contre-exemples existent : dans le cas de l'atelier du Planet les fours-cuvettes possèdent une épaisseur pluricentimétrique et l'épaisseur de la couche scoriacée indiquerait que ces cuvettes sont utilisées à plusieurs reprises (Figure 38).



Figure 38 : Four-cuvette de l'atelier du Planet (Aveyron), la céramique (en orange) est pluricentimétrique et la couche scoriacée la recouvrant (en jaune) est plurimillimétrique. Photographie : Kévin Costa

Ainsi, comme l'écrit Bourgarit (2019) : « Si notre compréhension des processus de fusion du cuivre et des modes de production a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, principalement grâce à des études minéralogiques et pétrologiques approfondies et aux simulations théoriques et expérimentales associées, la question apparemment simple de savoir comment distinguer la fusion de la fonte devrait sembler triviale. Elle ne l'est pas. »

Dans le cas où aucune étude archéométallurgique poussée n'aurait été réalisée, le seul élément clairement distinctif entre métallurgie extractive et métallurgie d'élaboration est la présence, au sein de l'atelier, de minéraux sains ou partiellement fondus⁷⁷ et de scories. Afin d'éviter toute confusion, nous n'avons donc retenu dans notre inventaire, que les ateliers présentant, en plus du mobilier lié à l'activité métallurgique (scories, creusets, fours, tuyère, moules...) des fragments de minerai sain et/ou de minerai partiellement grillé ou fondus, caractéristiques d'une activité extractive. Une telle sélection implique que peu d'ateliers ont été retenus. Par exemple, dans l'excellente compilation de Kunst (2013) recensant les ateliers du III^e millénaire en péninsule Ibérique, sur 109 ateliers listés⁷⁸, seuls 33 présentent des minerais associés.

⁷⁶ Ces critères de distinction sont à l'opposé de ceux caractérisant classiquement les creusets utilisés pour la fusion de métal qui sont épais car ils ont vocation à être réutilisés. Des exemples de creusets très épais ont été trouvés en Eure-et-Loir sur le site de Ford Harrouard (Bronze final ; Queixalos *et al.*, 1987).

⁷⁷ La fragmentation importante des scories constitue également un argument en faveur d'une activité de pyrométallurgie (Gauss *et al.* 2004 ; Hoffmann et Miller 2014). Néanmoins, aucune publication ne fournit d'indication quant à la taille moyenne d'une scorie de réduction et nous préférons donc ne pas considérer la taille des scories comme une information pertinente tant cette question demeure complexe.

⁷⁸ Trois de ces ateliers sont en fait des mines.

Il est également important que des réacteurs ou des scories soient associés aux minerais découverts car la présence de minéraux seuls ne permet pas de définir la présence d'un atelier de métallurgie extractive. Des minéraux peuvent être extraits d'exploitations minières à des fins autres que métallurgiques :

- Les carbonates de cuivre et en particulier la malachite, sont utilisés comme pigments depuis le Paléolithique (Shugar, 2000 ; Yalçın, 2008) et durant tout le Néolithique (Siddall, 2018) ;
- Ces minéraux peuvent également être recherchés pour leur aspect décoratif et servir à produire des perles et autres bijoux en malachite (Baysal, 2014 ; Radivojević et Rehren, 2016)⁷⁹ ;
- Les minéraux peuvent également avoir un rôle cosmétique comme c'est le cas de la galène qui donne le célèbre khôl prisé en Égypte (Muhly, 1997).

II/2 Indices indirects de la présence de mines

Si la présence de mines et d'ateliers de travail du minerai (minéralurgie et métallurgie extractive) constitue l'indice le plus clair de la présence d'anciennes zones minières, il existe des indices plus indirects d'activités minières.

II/2.a Les paléo-pollutions, témoins de la présence d'activités métallurgiques

Le premier de ces indices est la présence de paléo-pollution dans les environnements de tourbières, d'estuaires ou encore de lacs pro-glaciaires. Les sédiments enregistrent les pollutions métalliques liées à une activité métallurgique de type extractive ou d'élaboration⁸⁰. Ces pollutions se marquent principalement par de fortes teneurs plomb mais aussi parfois en zinc et en cuivre bien que ces derniers soient moins bien conservés dans ce type d'environnement (Förstner, 1985). Des études montrent que les pollutions atmosphériques peuvent être détectées jusqu'à une trentaine de kilomètres des ateliers (Mighall *et al.*, 2009) mais certaines d'entre elles, atteignent les couches atmosphériques les plus hautes et se propagent bien au-delà (Candelone *et al.*, 1995 ; Rosman *et al.*, 1997 ; McConnell *et al.*, 2018). Les niveaux de pollution peuvent être datés notamment par le radiocarbone sur des macro-restes végétaux. La précision de la datation varie selon la qualité des enregistrements sédimentaires et le nombre de datations réalisées.

Les études de paléo-pollution sont souvent couplées à des analyses palynologiques pour déterminer si un déboisement, non lié à la mise en culture, est présent (la métallurgie nécessitant du bois, des défrichements sélectifs sont réalisés pour alimenter les réacteurs en charbon). Un exemple d'étude liant pollution et palynologie est celui de la tourbière du Verny-des-Brûlons (Morvan), où quatre grandes phases de pollution ont été détectées, dont deux datées de l'âge du Bronze et accompagnées de défrichements ciblés (Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2008). Dans ce cas, comme dans de nombreux autres, les pollutions trouvées dans les tourbières et autres bassins sédimentaires constituent l'une des rares méthodes pour dater l'exploitation minière. Cela est particulièrement vrai dans les régions ayant connu des reprises minières intenses telles que la région de Rio Tinto (dans le sud de l'Espagne) où seule la

⁷⁹ Par exemple, sur le site de Gilat (Israël), la malachite est interprétée comme un matériau brut destiné à la fabrication de perles (Shugar, 2000) alors que des sites contemporains situés à moins d'un kilomètre fondent ce même minéral pour obtenir du cuivre.

⁸⁰ Il est cependant également possible qu'une partie des pollutions enregistrées soient le fruit d'un abattage par le feu dans le cas de mines à ciel ouvert : les particules de charbons (cendres) produites sont 40 fois plus concentrées en plomb que la roche mère et peuvent être dispersées sur une distance allant de 20 à 100 m dans le cas de vents forts (Timberlake, 2007).

découverte de maillets en pierre témoignait d'une exploitation entre le Néolithique et l'âge du Bronze. Un sondage réalisé dans l'estuaire du fleuve a permis de dater les pics de pollution minière (Leblanc *et al.*, 2000). De même, à Llancynfelin (Pays de Galles), les paléo-pollutions ont permis d'affiner les dates d'exploitation minière et de découvrir une première phase d'exploitation chalcolithique, non identifiable dans les charbons de la tranchée d'exploitation mise au jour (Mighall *et al.*, 2009).

Néanmoins, les études ne couplent que très rarement les fortes pollutions identifiées à une analyse isotopique du plomb, qui permettrait de déterminer si ces pollutions proviennent de l'exploitation (et plus précisément de la fonte) de minerais issus de gisements proches. En l'absence de ces données, il demeure impossible de savoir si la métallurgie pratiquée implique la fonte des minerais locaux ou si elle est le signe d'une activité de transformation impliquant des métaux extraits dans d'autres régions⁸¹. À La Molina (Espagne), la source de pollutions a pu être identifiée comme locale (Martínez Cortizas *et al.*, 2016). À l'inverse, deux études sur des tourbières belges montrent que les gisements de plomb locaux n'ont probablement pas été exploités entre 500 av. J.-C. et 50 av. J.-C., mais le sont par la suite à la période romaine (Allan *et al.*, 2018).

Ce type d'étude couplant analyses isotopiques du plomb et paléo-pollution demande cependant de disposer de la connaissance des signatures isotopiques des gisements environnants. Dans la tourbière de Fūramoos dans le sud de l'Allemagne, à 60 km de la bordure nord des Alpes, l'analyse isotopique du plomb indique que les gisements dont sont issues les pollutions seraient lointains et changeraient entre 1650 av. J.-C. (soit l'âge du Bronze) et l'antiquité classique. Elles montrent, dans un premier temps, des importations de plomb issu des gisements de l'ouest de la Méditerranée (péninsule Ibérique et Sardaigne) et plus tardivement, les mines du Laurion (Kem *et al.*, 2021). Il est cependant à noter que la signature des gisements alpins n'est pas prise en compte dans l'étude ce qui est regrettable car les sources locales auraient mérité d'être également considérées.

II/2.b L'identification de provenance par isotopie du plomb

Comme nous venons de l'évoquer, les isotopes du plomb peuvent permettre de supposer l'activité d'anciennes exploitations minières. En effet, si la signature d'un gisement est retrouvée dans un artefact, il est concevable que le gisement en question ait été exploité à une période correspondant à celle du façonnage de l'artefact⁸². De précédentes études ont ainsi envisagé une possible exploitation d'une vingtaine de zones minières, même si aucune exploitation n'y a été identifiée mais, là encore, cette méthode présente des limites⁸³ et peut produire des résultats erronés. Un exemple cité par Liu *et al.* (2018) concerne les mines du Laurion auxquelles est associée une production cuprifère conséquente entre 3000 et 1000 av. J.-C. (Georgakopoulou 2005 ; Gale *et al.*, 2009) alors que très peu de cuivre y a été détecté.

Les analyses isotopiques du plomb utilisées pour définir la présence de mines doivent donc être combinées avec d'autres indices d'une possible activité minière pour renforcer leur validité. Dans le cas des gisements de Majdanpek en Serbie (Weisgerber et Pernicka, 1995 p163) et de Baños de la Encina (El Polígono) en Espagne, la présence de percuteurs de pierre dans les mines constitue un argument

⁸¹ En particulier si aucune mine n'a été découverte à moins de 30 km de la tourbière.

⁸² Les processus métallurgiques ne modifient pas la signature isotopique du plomb (qui demeure identique à celle des minéraux fondus). Cela n'est vrai que si l'artefact n'est pas issu de la refonte de plusieurs objets métalliques.

⁸³ La principale d'entre elles concerne la similarité importante des signatures de certains districts miniers (cf II/3.b pour plus de détails).

supplémentaire fort en faveur d'une exploitation préhistorique (Contreras Cortés et Moreno Onorato, 2011 ; Martínez *et al.*, 2014).

Ainsi, sur les 25 exploitations supposées par isotopie du plomb, 3 apparaissent particulièrement douteuses. Budd *et al.* (2000) propose que deux artefacts du III^e millénaire av. J.-C. proviendraient d'un granite des Cornouailles (*Cornubian granite batholith*) or, dans ce cas l'absence de mines découvertes et l'absence de cuivre dans le gisement analysé appellent à la plus grande prudence. Les gisements de type Kupferschiefer (Europe centrale) pourraient également présenter des similarités de signatures isotopiques avec des artefacts cuivreux du début de l'âge du Bronze mais cela est encore débattu (Niederschlag *et al.*, 2003 ; Borg, 2017). Si les portions altérées de ces gisements pouvaient être exploitables par des mineurs pré-protohistoriques (Borg, 2017), aucun indice d'exploitation minière n'a été découvert avant la période médiévale (Borg *et al.*, 2012) dans ces gisements particuliers car pauvres en cuivre⁸⁴ et ne présentant que des veinules de chalcopyrites de très faible épaisseur. Nous ne pouvons donc pas affirmer que ce cuivre a été exploité. Un autre exemple souvent débattu (Höppner *et al.*, 2005 ; Frank et Pernicka, 2010 ; Lefranc, 2015) concerne l'origine des nombreux artefacts chalcolithiques de la région de Mondsee dont une source locale ne peut pas être clairement identifiée car les signatures locales sont très similaires aux signatures des Balkans.

Enfin, il convient de préciser que si les isotopes du plomb peuvent servir à retrouver des mines anciennes, ils ne peuvent pas être utilisés pour tracer tous les types de métaux : si cette méthode peut s'appliquer aux gisements de cuivre et de plomb(-argent), les gisements d'or et d'étain ne peuvent pas être retracés (cf partie 2 II/2.c).

II/2.c La présence d'occupations humaines

Les anciennes exploitations d'or et d'étain sont particulièrement difficiles à retrouver car les exploitations alluvionnaires de ces métaux laissent très peu de traces dans les paysages (cf II/1.a). Ainsi, seule la présence de fortifications et de lieux de vie aux abords directs de gisements de type placers peut parfois permettre d'émettre l'hypothèse d'une possible exploitation alluvionnaire. Le fait de ne pas avoir directement retrouvé les chantiers alluvionnaires s'expliquerait alors car ces derniers laissent des traces plus ténues dans les paysages que ces autres types d'occupations humaines (Hanks et Doonan, 2009).

II/3 Indices peu probants de la présence d'exploitations minières

II/3.a Présence de nombreux ateliers de métallurgie d'élaboration

Un facteur qui aurait pu être pris en compte pour localiser les zones de production minières réside dans l'abondance de sites de métallurgie d'élaboration (autrement dit d'ateliers de bronziers). Des hypothèses (non prouvées archéologiquement) formulées par Needham (1998) supposent que les plus fortes concentrations d'ateliers d'élaboration d'objets seraient localisées à proximité des centres miniers (Figure 39).

Utiliser les zones de métallurgie d'élaboration comme traceur des zones minières paraît alors prometteur. Néanmoins, la confirmation d'un tel modèle à grande échelle demanderait de recenser un nombre très conséquent d'ateliers de bronziers. Il demanderait également de prendre en compte de

⁸⁴ Ils contiennent 1,5 % de cuivre en moyenne (Oszczepalski *et al.*, 2019).

nombreux facteurs tels que la densité de peuplement ou encore la dynamique régionale en matière de production d'objets (qui peuvent varier au cours du temps et selon les régions).

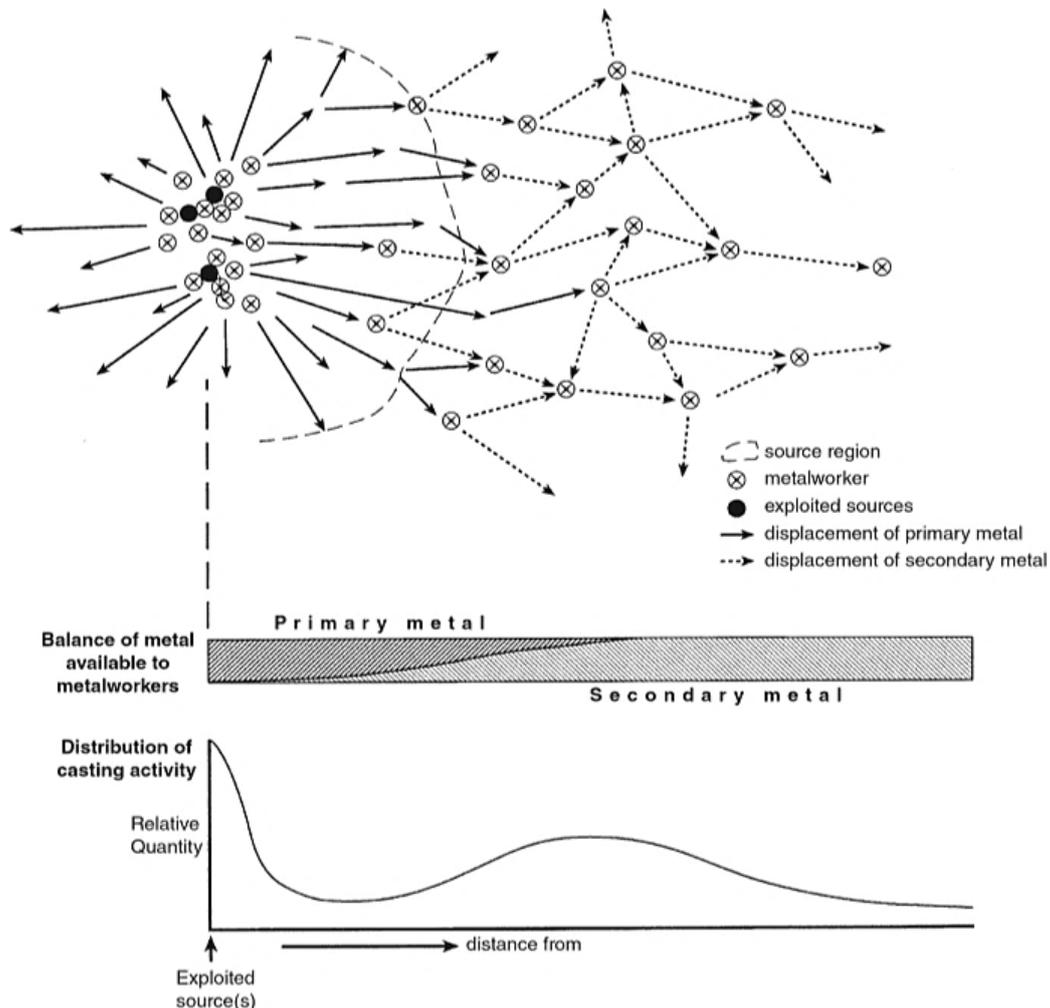


Figure 39 : Hypothèses d'organisation de la production du métal et distance aux zones minières.
Source : Needham, 1998.

La supposition que le travail du métal était organisé autour des grandes zones minières ne semble pas confirmée par les découvertes archéologiques. Au contraire, à l'âge du Bronze, certains bronziers étaient probablement itinérants notamment dans les sites de bords de lacs suisses (Jennings, 2016) quand d'autres travaillaient dans de grands centres de production à proximité de grandes zones d'échanges (tels que des ports) comme c'était le cas dans les ateliers de Midtfeltet en Norvège (datés par radiocarbone entre 1300 et 700 av. J.-C. ; Melheim *et al.*, 2016). Le cas de la Scandinavie est à ce titre à intéresser car les riches gisements de cuivre n'y ont pas été exploités durant l'âge du Bronze : le cuivre et l'étain fondu dans les ateliers provenaient d'importations (Ling *et al.*, 2014 b ; Nørgaard *et al.*, 2019 ; Radivojević *et al.*, 2019). Ainsi, dans ce cas, la présence de nombreux ateliers de bronziers ne peut pas être corrélée à la présence de mines.

Cette corrélation ne semble également pas valide au III^e millénaire av. J.-C. en péninsule Ibérique (culture argarique). Si certains ateliers localisés à proximité des mines présentent des activités de fonte de minerai et de travail du cuivre métal, beaucoup d'ateliers ne sont dédiés qu'à la métallurgie extractive et d'autres qu'à la production d'objets finis (Lull *et al.*, 2010). De plus, il est impossible de relier spatialement la concentration d'ateliers métallurgiques (données issues de Kunst, 2013) à une distance moyenne aux zones minéralisées (Figure 40).

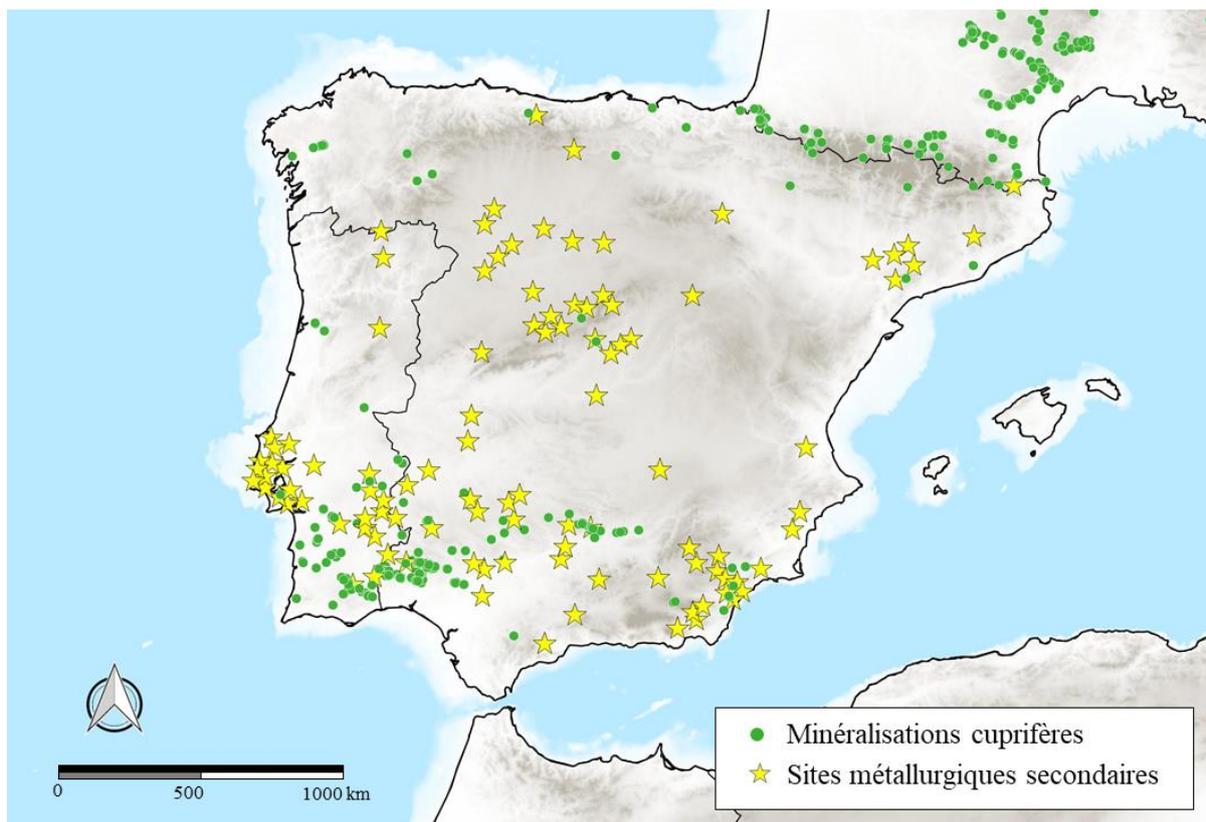


Figure 40 : Carte de localisation des ateliers métallurgiques datés du III^e millénaire av. J.-C. (Kunst, 2013) et minéralisations cuprifères en péninsule Ibérique (données issues des bases de données Promine et de l'USGS).
Carte : Céline Tomczyk

Ainsi, dès le Chalcolithique, les ateliers d'élaboration produisant des objets en métal couvrent la quasi-totalité du territoire. Ils sont parfois implantés à plusieurs centaines de kilomètres des gisements les plus proches. Il ne semble donc pas possible de proposer un modèle s'appuyant sur les hypothèses de Needham (1998) pour les périodes du Chalcolithique et de l'âge du Bronze⁸⁵. L'abondance de sites de métallurgie d'élaboration n'a ainsi pas été prise en compte dans le cadre de cette compilation car, si les minerais sont en général fondus à proximité des mines, les ateliers de métallurgie d'élaboration peuvent se fournir en cuivre de source lointaine et s'implanter à de grandes distances des zones minières.

I/3.b Présence d'une forte production d'artefacts dans une région

Un modèle, assez similaire au précédent, propose qu'une plus forte production d'objets pourrait avoir lieu près des mines (citons par exemple Nezafati *et al.* (2008) ou encore Oy (2017) pour le cuivre, Yener et Özbal (1987) et Rubinstein et Barsky (2002) pour l'étain).

Des régions telles que les Carpates sont ainsi supposées produire du cuivre car les gisements y sont abondants et les artefacts nombreux aux abords des zones minières (Harding, 2000 ; Szigeti *et al.*, 2017). Dans le sud de la péninsule Ibérique, les nombreux artefacts en argent des sociétés argariques seraient liés au grand nombre de gisements d'argent (souvent sous forme native) qui y affleurent

⁸⁵ Une conclusion similaire a été tirée de l'étude des variations de poids des poignards et des haches entre le Chalcolithique et le Launacien. Cette étude révèle des variations de flux de métal dans le temps et potentiellement dans l'espace : le poids de ces artefacts étant plus faible dans certaines régions importatrices de métal (Mordant *et al.*, 2004) mais cette tendance ne semble pas parfaitement homogène et ne valide pas complètement la théorie émise par Needham (1998).

(Murillo-Barroso *et al.*, 2014). Enfin, dans le sud de la France, la répartition des artefacts cuivreux et des gisements de cuivre permet de supposer une corrélation entre la présence d'artefacts et la présence de gisements exploités (Figure 41).

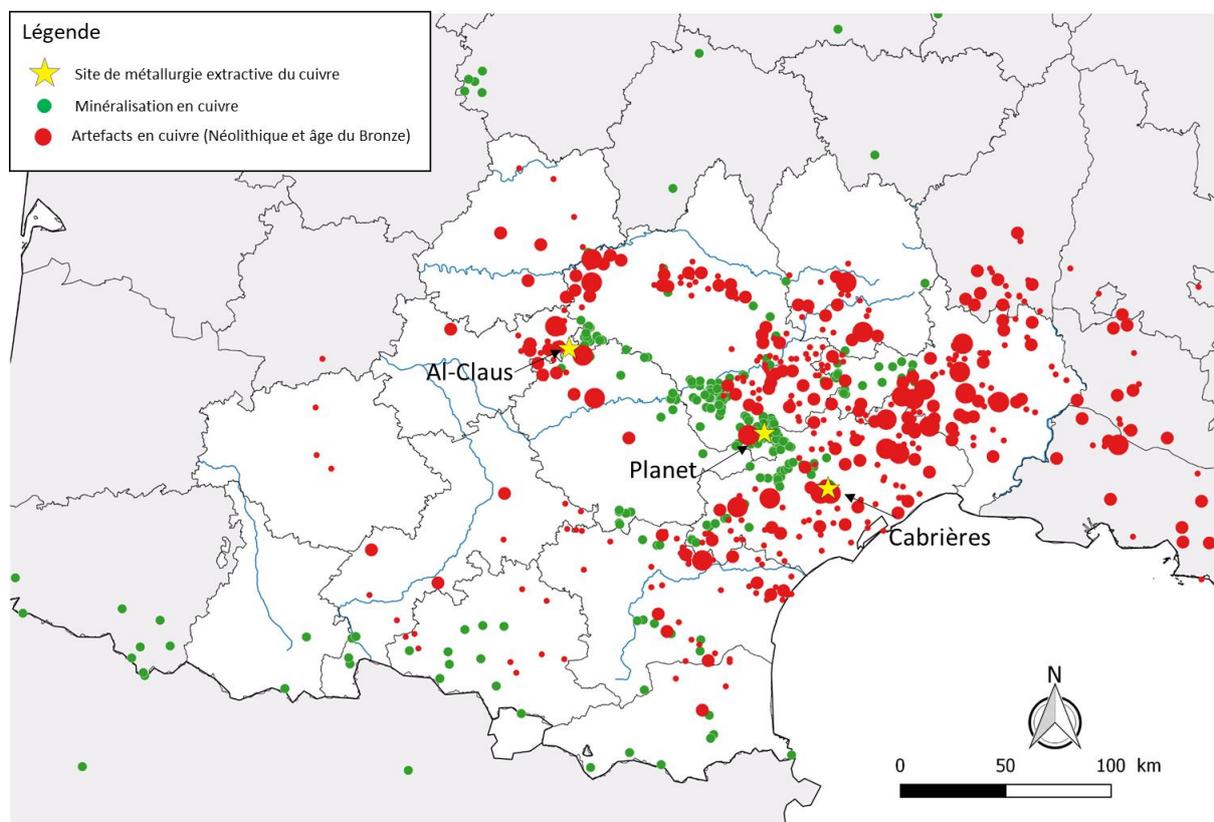


Figure 41 : Carte de répartition des gîtes de cuivre au sud du Massif central (base de ProMine avec ajout de données PCR 2019) présentant une possible corrélation avec la répartition des artefacts en cuivre (répartition d'après Carozza *et al.* 2015) et les sites de pyrométallurgie. Source : Rapport PCR 2019 Mines et Métallurgie protohistorique en Occitanie. Carte : Céline Tomczyk.

Toutefois, le fait de trouver une concentration importante d'artefacts dans une région donnée n'implique pas nécessairement que les artefacts aient été produits à partir de cuivre local :

- En Corse, les gisements de cuivre et les ateliers néolithiques de pyrométallurgie découverts à ce jour sont majoritairement localisés dans la partie nord de l'île alors que les artefacts cuivreux sont quant à eux très nombreux dans le sud de l'île (Peche-Quilichini et Mary, 2016 ; Peche-Quilichini, 2019) ;
- En Angleterre, Wang *et al.* (2018) recensent un nombre très important de lingots de cuivre dans les zones d'échanges (telles que l'estuaire de la Tamise et la péninsule des Cornouailles) mais très peu de lingots au Pays de Galles où de nombreuses mines de cuivre sont alors pourtant en exploitation ;
- Des analyses géochimiques (compositions élémentaires et analyses isotopiques du plomb) réalisées sur les très nombreux artefacts retrouvés dans la région des monts Métallifères n'ont pas démontré une origine locale des artefacts (Niederschlag *et al.*, 2003) ;
- Les artefacts découverts en Europe centrale ne présentent pas clairement de correspondance en isotopie du plomb avec les grands gisements sédimentaires (les Kupferschiefers) qui y affleurent (Niederschlag *et al.*, 2003) ;
- Les nombreux artefacts néolithiques dits de « type Mondsee » (au faciès cuivre-arsenic) ne seraient pas d'origine locale : une origine des gisements des Alpes de l'est est incompatible avec leurs signatures isotopiques du plomb (Frank et Pemicka, 2012) ;

- Les analyses isotopiques du plomb réalisées sur de nombreux artefacts scandinaves indiquent qu'ils n'ont pas été produits à partir des abondants gisements cuivreux du bouclier scandinave (Ling *et al.*, 2013 ; Ling *et al.*, 2014 ; Melheim *et al.*, 2018 ; Ling *et al.*, 2019).

La présence d'un nombre très important d'artefacts dans une région ne peut donc pas de supposer une production locale en l'absence d'analyses géochimiques confirmant l'origine locale de ces artefacts.

II/4 Conclusion : pourquoi est-il difficile de retrouver d'anciennes zones minières ?

Toutes périodes confondues, découvrir et plus encore fouiller des mines est un travail de longue haleine tant les comblements sont souvent importants et appellent des travaux de désobstruction. Les remblais sont souvent délicats à éliminer sans boucher les structures et la stabilité des structures est parfois peu engageante. La datation des exploitations, si elle gagne à être issue de méthodes différentes et basée sur de nombreuses analyses, n'est également pas toujours chose aisée (Stöllner, 2014 p.151). Les premières phases d'extractions ne sont généralement pas retrouvées et le matériel permettant les datations n'est pas toujours abondant. De plus, si les régions sans reprise minière présentent les mines les mieux conservées, cette dernière est très courante et seule une faible partie des travaux anciens est alors conservée.

Ainsi, s'il reste sans nul doute beaucoup de mines à découvrir, il est également certain que beaucoup de mines anciennes ont disparu du fait de reprises minières. Dresser un panorama le plus complet possible des mines découvertes et documentées jusqu'à présent demande de prendre en compte des indices indirects tant pour pallier à l'effet des reprises minières que pour affiner la précision des périodes d'exploitation. Ces indices sont directement liés à la chaîne opératoire minière.

La présence d'ateliers de métallurgie extractive constitue l'un des éléments les plus pertinents permettant de supposer la présence d'une zone minière car les activités de métallurgie extractive sont très majoritairement réalisées aux abords des mines. Les informations fournies par la fouille des ateliers permettent d'affiner la chronologie des exploitations mais aussi d'identifier les types de minerais fondus. Ils fournissent des indices sur l'intensité de l'exploitation (de grands centres métallurgiques laissent supposer l'extraction d'une quantité importante de minerais) et constituent même parfois les seuls vestiges encore présents dans le cas de reprises minières⁸⁶. Cependant, en l'absence de minerai encore partiellement sain, les ateliers de métallurgie extractive ne peuvent pas être aisément différenciés des ateliers de métallurgie d'élaboration. La présence de pollutions conservées dans des tourbières fournit des indications concernant la datation et l'ampleur des activités métallurgiques dans un rayon d'une vingtaine de kilomètres mais il est également difficile de s'assurer que les concentrations en métaux découlent d'une activité extractive et non d'élaboration.

⁸⁶ Un exemple intéressant concerne la mine de cuivre de Skouriotissa actuellement exploitée à Chypre. L'exploitation à ciel ouvert y a révélé un tas de scories de 25 m de hauteur constituant le seul vestige indiquant l'exploitation ancienne de ce gisement (Ben-Yosef *et al.*, 2011).

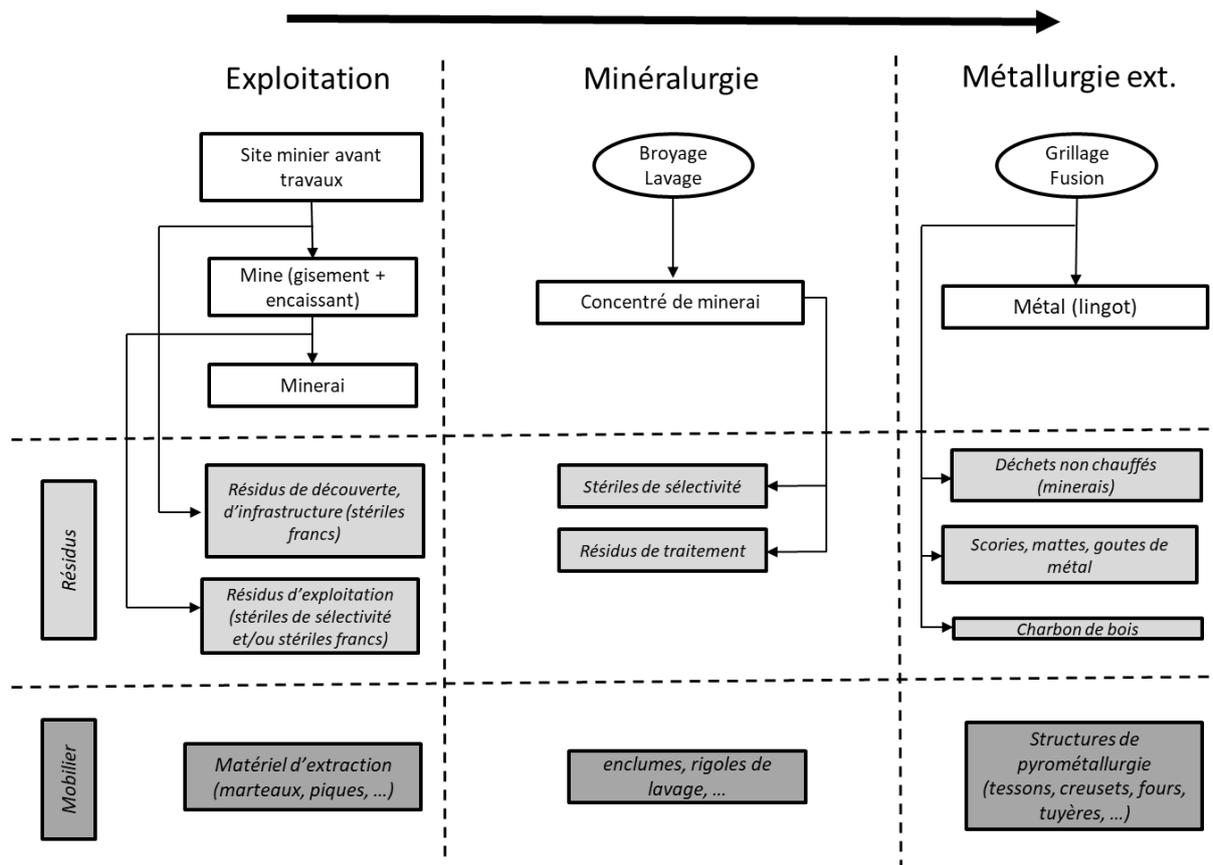


Figure 42 : Déchets et mobilier couramment retrouvés pour chacune des trois étapes de la chaîne opératoire minière à la Pré/Protohistoire. Schéma par Céline Tomczyk, inspiré d'Artignan et Cottard (2003).

III/ Recensement des exploitations et précisions des données recueillies

Comme nous venons de le souligner, recenser les zones minières en exploitation entre la fin du Néolithique et la fin de l'âge du Bronze nécessite de considérer les limites inhérentes à la découverte et à la fouille de tels sites. En effet, les informations que les archéologues retirent de l'étude des mines ne sont souvent que partielles car la datation des chantiers miniers peut s'avérer imprécise tout comme l'extension des chantiers miniers ou encore l'identification des minerais exploités.

III/1 Travaux précédents recensant les zones d'exploitation minière

Concernant l'étain, seul James Muhly (1985) a tenté de dresser un inventaire des zones minières à l'échelle de l'Eurasie. Cette étude d'une quinzaine de pages ne s'appuie toutefois que sur des textes anciens et des découvertes d'artefacts et non sur la présence avérée de sites d'exploitation. Un autre inventaire existe à la même échelle géographique. Réalisé par Penhallurick (1986), il ne fait que lister les zones à potentiel stannifère en Europe et ne cherche pas à inventorier les sites découverts. De plus, peu de travaux existent à l'échelle régionale et la publication de 10 pages de Liritzis Maxwell et Taylor (1987) portant sur la circulation d'étain en Égée mérite d'être soulignée. Cet article présente également l'avantage de fournir des dates d'apparition des premiers artefacts contenant de l'étain dans certaines régions. Enfin, Stoellner *et al.* (2011) recensent les exploitations du Kazakhstan avec un très bon niveau de détail.

L'argent n'a également pas fait l'objet de synthèses générales. Seules les exploitations de la péninsule Ibérique ont été référencées par les très riches travaux d'Hunt Ortiz (2005) (portant également sur le cuivre), de Murillo-Barroso *et al.* (2016) (pour le I^{er} millénaire av. J.-C.) et par la thèse d'Anguilano (2012) (p. 121-122) pour la période après 800 av. J.-C.

Aucune synthèse européenne ou inventaire à l'échelle régionale n'existe ni pour les mines d'or ni pour celles de plomb pré et protohistoriques.

À ce jour, seules les exploitations de cuivre ont fait l'objet de grandes synthèses à l'échelle européenne. La première d'entre elles correspond aux travaux de Weisgerber et Pernicka (1995) ; 14 sites miniers et/ou de métallurgie extractive englobant le Néolithique et l'âge du Bronze avaient alors été recensés (Figure 43).

Prehistoric mining and smelting sites

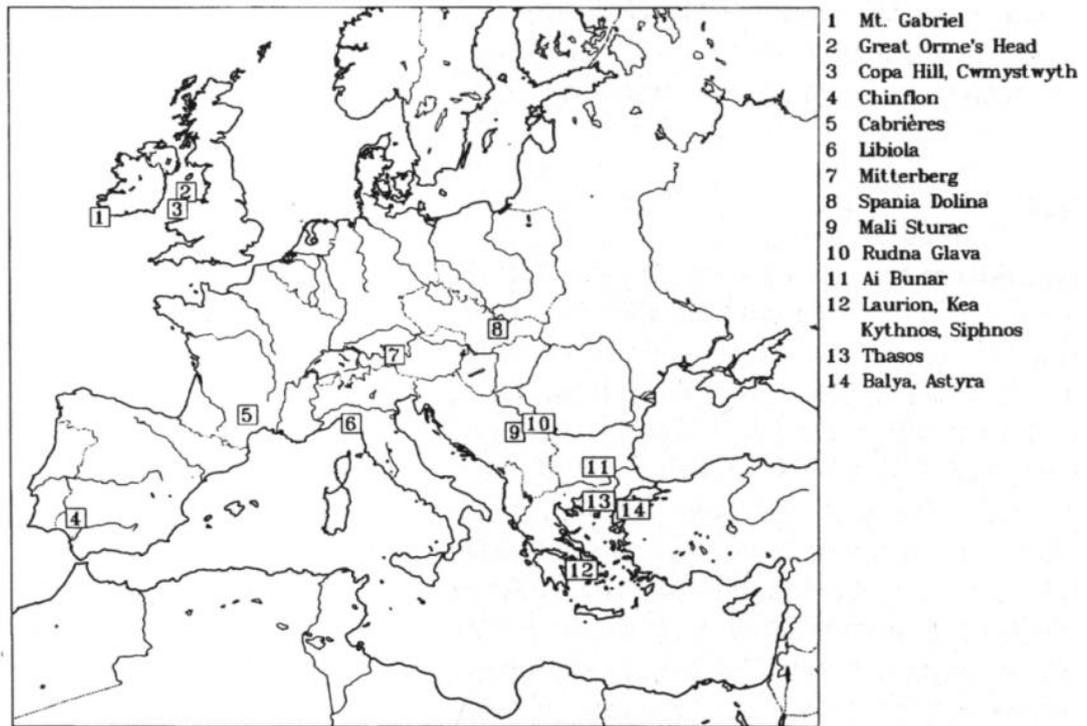


Figure 43 : Carte de synthèse des mines de cuivre et ateliers de pyrométallurgie préhistoriques publiée par Weisgerber et Pernicka (1995).

La récente synthèse de Radivojević *et al.* (2019) mérite d'être soulignée pour ce qui concerne l'inventaire des mines de cuivre exploitées à l'âge du Bronze (Figure 44).

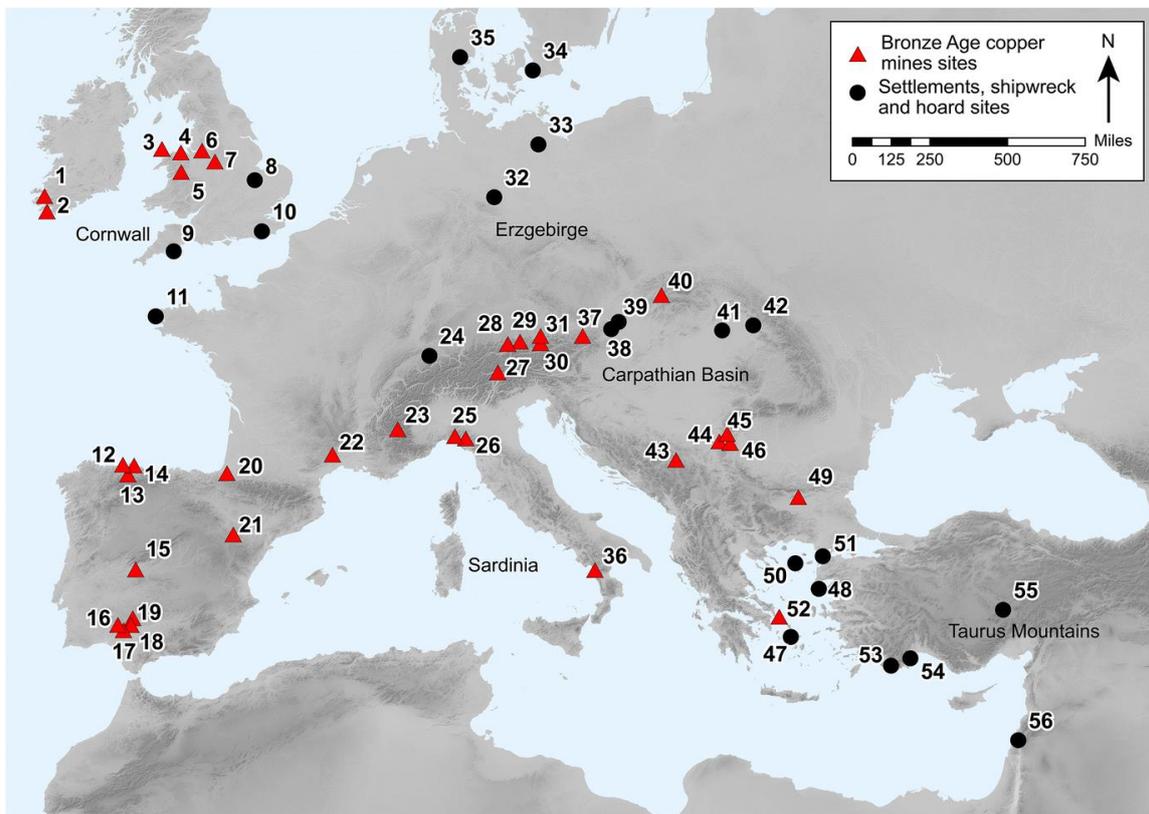


Figure 44 : Carte de synthèse des mines de cuivre de l'âge du Bronze par Radivojević *et al.* (2019).

Les sites de métallurgie extractive chalcolithiques ont récemment fait l'objet de synthèses à l'échelle européenne par Obón Zúñiga (2020) (Figure 46) mais aussi Bourgarit (2007) (Figure 47).



Figure 45 : Carte des principaux sites de fonte de minerais de cuivre du Néolithique par Obón Zúñiga (2020).



Figure 46 : Répartition des ateliers de pyrométallurgie néolithiques par minerai fondu par Bourgarit (2007).

Les travaux listant à la fois les mines et les ateliers de métallurgie extractive sont rares. La synthèse de Bourgarit *et al.* (2003) s'intéresse à la période allant de la fin du Néolithique au début de l'âge du Bronze (Figure 47). Cependant, l'ouvrage plus riche et qui a été d'un apport très conséquent pour ce travail de recensement est l'ouvrage de 2015 de Willam O'Brien (*Prehistoric Copper Mining in Europe 5500–500 BC*). Il liste tant les exploitations minières que les ateliers de métallurgie, et ce à l'échelle du continent européen (Figure 48).

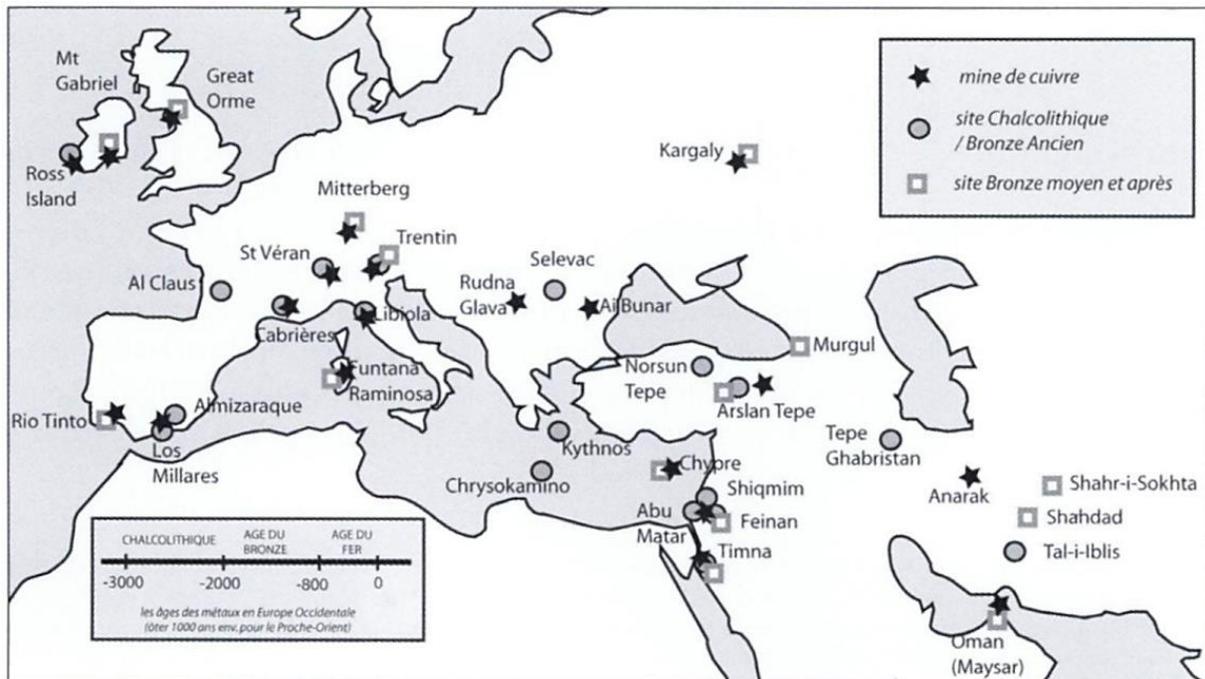


Figure 47 : Localisation des mines de cuivre et des ateliers de métallurgie recensés par Bourgarit *et al.* (2003).



Figure 48 : Carte de répartition des mines et ateliers par O'Brien (2015) ; cette carte ne recense pas toutes les exploitations indiquées dans l'ouvrage.

Ces travaux de synthèse permettent d'avoir un très bon aperçu des exploitations les mieux documentées datées du Néolithique et de l'âge du Bronze. Il est cependant dommage qu'aucun découpage chronologique ne soit proposé et que les cartes couvrent une période de plus d'un millénaire.

Des synthèses à l'échelle de grandes régions sont de plus à souligner :

- Pour la péninsule Ibérique : le très riche ouvrage de Hunt Ortiz (2005) (*La explotación de los recursos minerales en Europa y la Península Ibérica durante la Prehistoria*) ou encore les travaux de : Domergue (1990), Vidal (2012), Escanilla Artigas et Delgado-Raack (2014) et d'Escanilla Artigas (2016).
- Pour les Balkans : les travaux de Jovanović (1985) et de Chernykh (1992) mais aussi plus récemment de Radivojević *et al.* (2010).
- Pour les îles Britanniques : les travaux d'O'Brien (1994) pour l'Irlande, et de Timberlake (1992) et Timberlake *et al.* (2013) pour l'Angleterre.
- Pour Chypre : les travaux de Kassianidou (2013) ; Kassianidou et Knapp (2008) mais aussi de Constantinou (2007).
- Pour les Alpes : la thèse de Florence Cattin (2008), le récent ouvrage de Turck *et al.* (2019), les travaux de Gilberto Artioli et de son équipe (Artioli *et al.*, 2014 et 2015) ou encore de Lutz et Pernicka (2013).
- Pour l'Italie non alpine : la publication de Dolfini (2013) listant les ateliers de métallurgie est à souligner bien que cette étude ne propose pas de distinction entre les ateliers de métallurgie extractive et d'élaboration.
- Pour le pourtour égéen : Georgakopoulou (2016) propose un inventaire très complet des ateliers de métallurgie extractive.

Des travaux de synthèses existent également pour certaines régions du Proche-Orient. De nombreux travaux portent sur l'Anatolie où un effort particulier semble avoir été fait concernant le recensement des mines préhistoriques à travers les travaux de Oy (2017), Efe et Fidan (2006) ou encore la thèse de De Jesus (1977). Une autre région particulièrement bien documentée est la péninsule d'Oman dont Begemann *et al.* (2010) ont réalisé une riche synthèse des sites miniers découverts.

Certaines régions aux ressources cuprifères abondantes ne sont que peu documentées. Citons à ce titre le Sinaï pour lequel Abdel-Motelib *et al.* (2012) présentent néanmoins des résultats de prospection ou encore, plus simplement, la France pour laquelle aucune synthèse à grande échelle n'avait encore été réalisée avant ce travail de thèse. La constitution de la base de données a donc nécessité une approche exhaustive, car son élaboration ne pouvait se limiter aux inventaires préexistants. En outre, les travaux de synthèse ne garantissent pas toujours la précision des informations relatives aux sites répertoriés car ils ne les évoquent parfois que de manière succincte.

Si les travaux de synthèse que nous venons de citer constituent des bases solides pour démarrer un inventaire, il a fallu compléter ces derniers. Tous les sites inventoriés ont fait l'objet d'une recherche bibliographique. Les publications les plus récentes ont été privilégiées afin de disposer des données les plus complètes. Un travail conséquent a ainsi été mené afin de compléter et vérifier ces inventaires mais encore de supprimer des informations erronées dans le cas de sites dont la fonction avait été initialement mal définie et qui se sont avérés ne pas être en lien avec l'exploitation minière. Citons par exemple le cas du site de Forat de la Tuta (Catalogne) initialement défini comme une mine de cuivre du Bronze

ancien mais dont des études plus poussées ont permis de souligner qu'il s'agissait d'une tombe (Soriano, 2011) ou encore celui d'un petit site de métallurgie extractive du complexe minier de Timna (Israël) dont la datation initiale (VI^e-V^e millénaire av. J.-C.) s'est avérée erronée, le site étant contemporain du pic d'activité minière des 13-11^e siècles av. J.-C. (Ben-Yosef *et al.*, 2010). Un autre exemple concerne un fragment de minerai de cuivre associé à un lingot de plomb du Bronze final III découvert à Massérac-Langon en Loire-Atlantique (Briard *et al.*, 1995). Cette découverte est issue d'un dragage de la Vilaine en 1983 et le manque de contexte pose alors un problème car rien n'indique que le minerai soit associé à l'origine au matériel en bronze, même si cela reste tout à fait possible.

Enfin, quelques-uns des sites miniers listés dans notre inventaire sont inédits et correspondent à des prospections menées dans le cadre du PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie (dir. M. Maillé).

III/2 Création de la base de données

La base de données créée dans le cadre de ce travail de thèse se veut être la plus exhaustive possible. Elle recense de nombreuses informations mais toutes ne sont pas toujours documentées pour l'ensemble des sites (soit parce que les sites n'ont pas fait l'objet d'une fouille approfondie soit parce que leur étude n'a pas permis de fournir ces informations).

L'ensemble de la base créée est disponible dans un document Excel fourni en annexe. Chaque métal fait l'objet d'une feuille distincte car les informations pertinentes varient selon les métaux. Par exemple, une exploitation d'étain ne possède pas de variation de type de minerai exploité (à l'âge du Bronze, il s'agit toujours de cassitérite) mais peut correspondre à une exploitation alluvionnaire. En revanche, beaucoup de types de minéraux différents peuvent être associés à une mine de cuivre mais ces dernières ne peuvent pas faire l'objet d'exploitations alluvionnaires.

Pour un même métal, les informations permettant de caractériser les mines et les ateliers de métallurgie extractive étant très différentes, ateliers et mines ont été subdivisés dans deux feuilles distinctes. Le document Excel est donc divisé en 8 feuilles (mines de cuivre, ateliers de travail du cuivre, mines d'étain, ateliers de travail de l'étain, mines de plomb et/ou de plomb-argent, ateliers de plomb/plomb-argent, mines d'or, ateliers d'extraction de l'or).

III/2.a Organisation du tableau de données : découpage par localisation et par périodes d'exploitation

Une entrée (soit une ligne du tableau de données) correspond à un site. Si le site est publié sous différents noms⁸⁷, l'ensemble des noms couramment employés sont indiqués dans cette première colonne du tableau de données. Le terme le plus couramment employé figure alors en premier et l'orthographe moins courante est entre parenthèses (par exemple le site de Kubban est parfois orthographié Quban).

Chaque site a été accompagné d'une coordonnée GPS dans le système de coordonnées WGS84. Les sites ont été positionnés avec précision lorsqu'une donnée GPS était indiquée en format numérique ou lorsqu'une carte précise était fournie avec la publication. Dans le cas où seuls le village ou l'élément de relief le plus proche sont précisés, le point indiqué correspond au centre du point de repère cité. Les

⁸⁷ Cela est surtout le cas lorsque les noms ont été transcrits vers l'alphabet latin.

éléments textuels utilisés pour placer le repère sont alors indiqués dans la colonne « indications de localisation ».

Les références bibliographiques sur lesquelles s'appuient les descriptions des sites de la base de données sont disponibles dans les colonnes « Sources ». Les références indiquées en rouge et orange correspondent à celles fournissant peu d'informations concernant le site.

La datation du site est indiquée sous la forme présentée dans la ou les publications (dans la langue d'origine). Le type de datation (radiocarbone, céramiques, autres éléments de contexte archéologique⁸⁸...) est précisé. Les datations relatives ont été transformées en une information chiffrée. Ce travail était nécessaire car toutes les régions considérées ne présentent pas un découpage chronologique similaire.

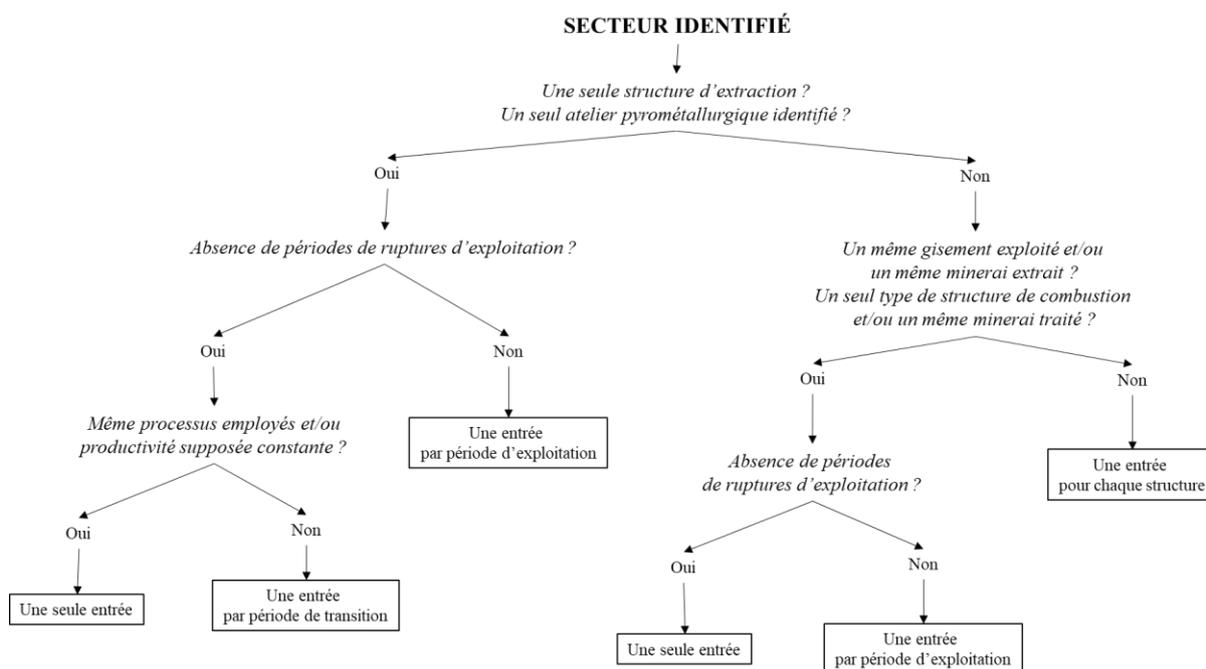


Figure 49 : Organisation des entrées des différentes feuilles de la base de données.

Certains sites ont été découpés en plusieurs entrées dans le tableau de données (Figure 49). Les duplicatas les plus courants correspondent aux cas où une même zone minière a été exploitée à différentes périodes. Chaque période d'exploitation constitue alors une entrée dans la base de données. Par exemple, le site de Consuelo (Filón Consuelo) possède deux entrées distinctes dans le tableau de données, l'une correspondant à l'exploitation chalcolithique et la seconde à la reprise minière du Bronze final.

Si un même site est exploité de manière continue mais que nous savons qu'un élément important du processus de production varie (processus employés et/ou volumes produits) alors une nouvelle entrée est créée. L'atelier chypriote d'Enkomi (Engomi) a ainsi été divisé en deux entrées (1725-1250 av. J.-C. et 1250-1150 av. J.-C.) car une augmentation extrêmement importante de la quantité de cuivre fondu se produit à partir de 1250 av. J.-C. en lien avec la centralisation des productions.

⁸⁸ La datation n'est par exemple pas celle de la structure minière ou de l'atelier précisément mais celles des habitats associés.

Si deux sites contemporains distants de moins de 1 km sont comparables (même filon exploité ou même type de métallurgie dans le cas d'ateliers), ils sont fusionnés dans la base en un seul site. Les noms des différentes zones fusionnées et le signe « + » lie les deux sites (exemple : Montesei di Serso + Croz del Cius). Ainsi, si une même minéralisation est exploitée (localement) sous la forme de nombreuses structures d'extractions et que ces structures sont contemporaines, elle ne sera indiquée que par un seul point. La zone de Rudna Glava où 40 puits de mine ont été repérés n'est donc représentée que par une entrée unique dans la base de données et non pas par 40 lignes.

III/2.b Informations pétrographiques et minéralogiques

Si plusieurs métaux sont exploités au sein d'une même mine ou produits par un même atelier, les sites sont cités dans chacune des feuilles de la base de données correspondant à ces métaux. Il est alors précisé dans la dénomination du site de quel métal il s'agit (par exemple, la mine de Monte Romero est dénommée « Monte Romero-Cu » dans la feuille dédiée au cuivre et « Monte Romero-Ag » dans celle dédiée au plomb et plomb-argent). Si d'autres métaux sont présents en quantité importante dans une mine, ils sont indiqués dans la colonne « autres métaux présents ». Dans le cas du cuivre, une attention toute particulière a notamment été portée à la présence d'arsenic (As) et d'antimoine (Sb) et ces derniers sont donc souvent recensés dans cette colonne « As-Sb ».

Des informations concernant le type de minerai extrait (dans le cas de mines)⁸⁹ ou fondu (dans le cas d'ateliers) ont été reportées lorsque cela s'y prêtait (c'est-à-dire dans le cas du cuivre et du plomb-argent). La qualité de cette information est alors inégale : dans le cas des mines, il ne reste parfois que très peu de minerais dans les galeries et dans le cas des ateliers métallurgiques, il est rare de retrouver du minerai sain (non fondu ou grillé). L'étude des scories permet alors de déterminer les minéraux fondus si des fragments de minerais partiellement sains ont été identifiés. La présence d'une matte ou de très nombreuses scories indique la fonte de minéraux de cuivre sulfurés.

Dans le cas du cuivre, deux colonnes sont dédiées aux observations concernant les minéraux : l'une correspond au texte présent dans la publication source, la seconde correspond à une simplification de cette donnée (N pour les cuivres natifs, C pour carbonates et oxydes de cuivre, S pour les sulfures simples de cuivre (chalcopyrite et bornite) et F pour les cuivres gris). Si deux types de minéraux sont exploités, les deux lettres correspondantes sont accolées.

Le plomb et l'argent ont volontairement été regroupés dans une même feuille. Cela s'explique par le fait que, pour la quasi-totalité de la période étudiée, l'argent est issu de la fonte de galènes, un sulfure de plomb (PbS) reconnu pour son potentiel argentifère⁹⁰. Pour autant, tous les gisements de galènes exploitées ne sont pas nécessairement fortement argentifères et des galènes non ou très peu argentifères peuvent être exploitées pour le plomb et non pour l'argent. Des exploitations pour le plomb seul ont eu lieu à la fin de l'âge du Bronze en Angleterre comme le montre la découverte de rares exploitations de plomb (Timberlake *et al.*, 2013 ; Mighall *et al.*, 2014 ; Timberlake, 2017).

Au Néolithique, le plomb pourrait être un sous-produit valorisé de la métallurgie du cuivre comme nous l'étudions actuellement dans le cadre du PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en

⁸⁹ Dans le cas des mines, seuls les minéraux extraits sont indiqués. Cela ne signifie pas qu'un autre type de minéral puisse être présent dans le gisement exploité : les mineurs peuvent par exemple n'exploiter que la portion supergène et donc les carbonates de cuivre d'un gisement contenant des sulfures situés plus en profondeur.

⁹⁰ L'argent peut également être issu de jarosites mais le potentiel argentifère de ces dernières n'est découvert que tardivement, par les Phéniciens (Pérez Macías, 1999 ; Craddock, 2014 ; Wood et Montero-Ruiz, 2019) soit à la fin de la période qui nous intéresse (vers 1100-900 av. J.-C.).

Occitanie. L'atelier chalcolithique du Planet (commune de Fayet, Aveyron) aurait produit du plomb comme en témoigne et la présence de bourmonites altérées (PbCuSbS_3) dans des fosses de concassage ou encore celle d'un petit lingot de plomb-cuivre⁹¹ de 50 g découvert sur le site (Figure 50). Des cuivres gris argentifères ont également été découverts dans cet atelier mais l'argent qu'ils contiennent n'était visiblement pas extrait mais incorporé au cuivre lors de la fusion comme en témoignent les analyses pXRF réalisées avec Kévin Costa en août 2022 sur des artefacts conservés aux musées de Roquefort et de Montrozier (Costa *et al.*, 2022)⁹².

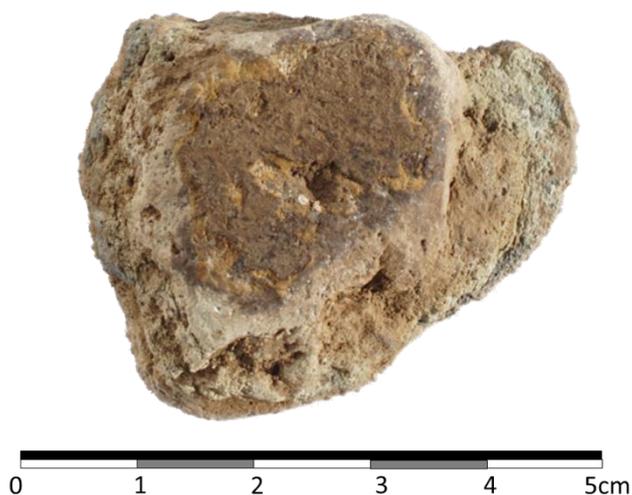


Figure 50 : Lingot de plomb-cuivre découvert sur le site du Planet.

III/2.c Datation des sites

Comme explicité précédemment, dater une mine est parfois complexe. Les méthodes de datation dépendent en partie des techniques d'exploitation employées. Ainsi, une partie des mines de cuivre peut être datée à l'aide des nombreux charbons⁹³ liés à l'utilisation de l'abattage par le feu. La réalisation de datations radiocarbone est cependant dépendante du fait que les mines aient ou non fait l'objet de fouilles poussées (Tableau 7). Si plusieurs datations ont été réalisées, les dates les plus extrêmes obtenues ont été retenues (cela permet de borner au plus large le début et la fin de l'exploitation). Il aurait été intéressant de pouvoir proposer des projections en se basant sur les datations radiocarbone à 2σ et à 1σ , mais, malheureusement, si les données non calibrées sont parfois publiées, les données ne sont souvent publiées que sous forme calibrée avec une précision de 2σ soit l'intervalle de datation le plus large (95,4 %)⁹⁴. Les dates radiocarbone peuvent ainsi être supérieures à la période réelle d'activité de la mine et ne permettent pas de mettre en évidence des ruptures de courte durée de l'exploitation.

⁹¹ Les teneurs en plomb varient de 19 à 63 %.

⁹² Les analyses de fluorescence X portable ne portent que sur la surface des artefacts et sont donc fortement dépendantes de l'altération des artefacts. Nous avons quantifié en moyenne 2 à 4 % d'antimoine, 10,5 à 16 % d'argent et 2 à 3 % de plomb dans de nombreuses billes chalcolithiques en cuivre. Si les teneurs en argent sont indéniablement exagérées (du fait de la meilleure résistance de l'argent à l'altération de surface par rapport au cuivre), de telles teneurs ne peuvent que souligner la présence de ces éléments dans le métal sain.

⁹³ Le nombre de datations radiocarbone réalisé pour dater une mine joue également sur la précision de l'estimation des périodes d'activités.

⁹⁴ Toutes les publications ne présentant pas les datations brutes, il n'est malheureusement pas possible de réaliser de manière systématique une nouvelle calibration afin d'homogénéiser les datations.

	Nombre total de mines	Abattues par le feu et/ou datées par radiocarbone	Datation céramique	Autre datation
Cuivre	208	96 soit 46 %	31 soit 15 %	81 soit 39 %
Étain	18	6 soit 33 %	2 soit 11 %	10 soit 56 %
Plomb et plomb-argent	17	4 soit 23,5 %	3 soit 17,5 %	10 soit 59 %
Or	6	1 soit 17 %	2 soit 33 %	3 soit 50 %

Tableau 7 : Pourcentage des mines découvertes en Europe de l'Ouest datées par radiocarbone.

Cependant, toutes les mines ne sont pas abattues par le feu (en particulier lorsque la roche encaissante est tendre) ce qui explique dans ces cas que très peu de charbons sont présents dans les mines. Des datations de mines (et en particulier les exploitations alluvionnaires) peuvent être proposées en exploitant les informations issues des occupations archéologiques proches, en particulier les sites fortifiés supposés protéger la production des ressources minières, les tombes des mineurs et /ou les périodes de consommation locale du métal.

La datation des exploitations minières peut également se baser sur le mobilier retrouvé dans ou aux abords des mines : majoritairement des céramiques. La précision et la fiabilité de cette datation sont néanmoins très variables selon les périodes et les régions.

Enfin, les sites n'ayant fait l'objet que de prospections ne sont parfois datés que par la présence de maillets en pierre (cf II/1.a). Il est alors impossible de déterminer si ces maillets sont datés du Chalcolithique ou de l'âge du Bronze.

	Mines non datées
Cuivre	86
Étain	5
Plomb et plomb-argent	8
Or	3

Tableau 8 : Nombre de mines d'Europe de l'Ouest dont la datation antérieure à l'âge du Fer n'est supposée que par la présence de maillets en pierre.

La projection cartographique des mines datées uniquement par la présence de maillets en pierre (Figure 51) nous montre que les sites non précisément datés sont nombreux dans la *Pyrite Belt*⁹⁵ du sud-est de la péninsule Ibérique (41 mines de cuivre), en Calabre (11 mines de cuivre non datées) et en Angleterre (6 mines de cuivre et 2 de plomb).

⁹⁵ La *Pyrite Belt* ibérique est une zone de minéralisation localisée dans les régions méridionales de l'Espagne et du Portugal. Elle présente d'importantes concentrations de minéraux sulfurés, dont la pyrite qui lui donne son nom, ainsi que d'autres minéraux tels que la chalcopryrite, la sphalérite et la galène.

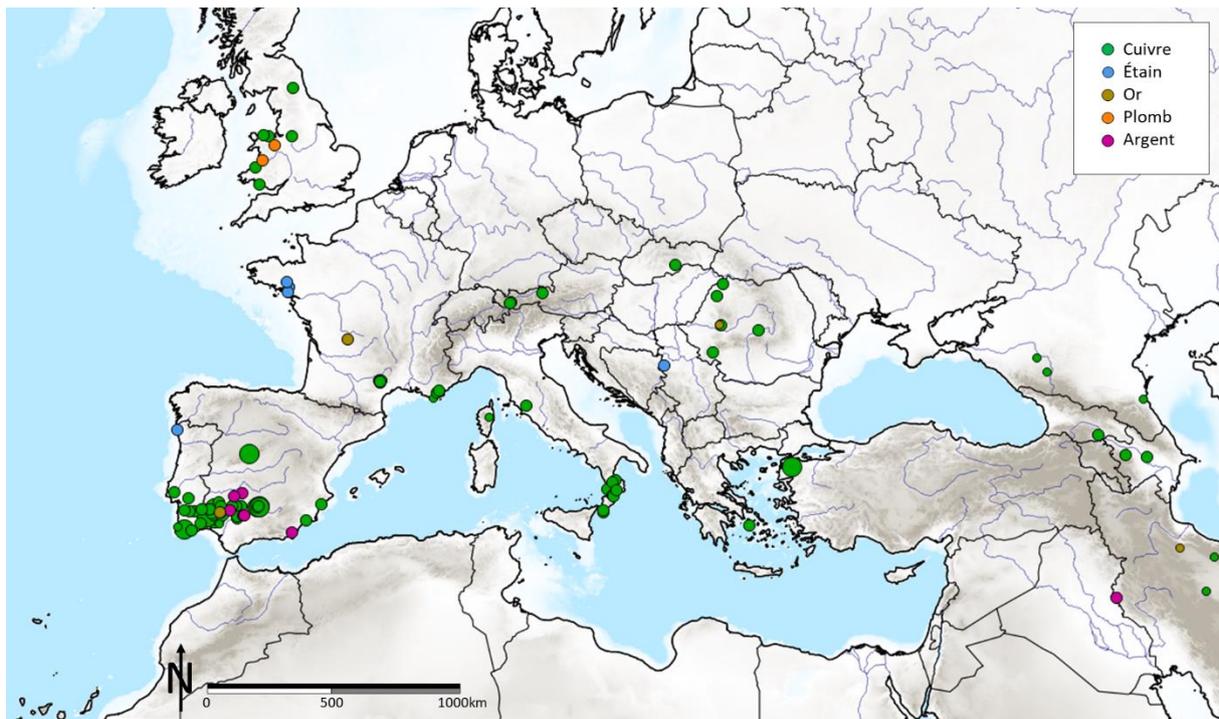


Figure 51 : Localisation des mines dont la datation antérieure à l'âge du Fer n'est supposée que par la présence de maillets en pierre.

Une partie de l'histoire de l'exploitation minière de ces régions reste donc à définir et les sites recensés ne pourront réellement être intégrés à nos résultats qu'une fois qu'ils auront été plus précisément étudiés.

III/2.d Volume de minerais extraits des sites miniers

Dans le cas des mines comme des ateliers, des informations ayant trait au volume de minerais extraits et traités ont été recherchées.

Pour les mines, elles concernent les dimensions de l'exploitation (volume, longueur, largeur, profondeur) permettant d'estimer le nombre de m³ de roches abattues. Dans les cartes produites, la représentation graphique des mines tient compte de la volumétrie.

La présence d'abattage par le feu a été renseignée. La nature de la roche encaissante et le type de gisement exploité ont été ajoutés à la description de la mine dès lorsqu'elles étaient disponibles. Dans le cas de l'or et de l'étain, le type d'exploitation (alluvionnaire ou en roche) a été distingué.

La dimension des ateliers de métallurgie extractive a été recherchée (atelier domestique ou grandes aires spécialisées). Cette information est complétée par des observations concernant les types de réacteurs employés (creusets, fours...) et la quantité de scories retrouvées. À la différence des mines, nous n'avons pas indiqué la dimension des ateliers sur les cartes produites. Un atelier décrit comme domestique pourrait être classé comme « très petit », un atelier spécialisé comme « petit » à « moyen », un atelier centralisant les productions de plusieurs mines comme « grand ». Pourtant, si ce découpage semble logique, il reste subjectif. En effet, des chercheurs travaillant dans des régions où les productions

sont très spécialisées auront tendance à qualifier de petit atelier un atelier qui, dans une autre région, pourrait être qualifié de taille importante⁹⁶.

III/3 Critique des données récoltées

III/3.a Des descriptions d'inégale qualité

La constitution d'une base de données la plus exhaustive possible implique l'implémentation d'informations de précision variable. Les entrées de la base de données ont été distinguées en trois grandes catégories permettant de pouvoir facilement identifier les sites dont les informations sont très fiables et les sites pour lesquels les informations sont douteuses. Ces trois catégories sont :

- Sites très bien documentés ;
- Sites peu documentés pour lesquels au moins l'une des informations les plus importantes (datation, type de mine, minerais exploités) est présente mais est imprécise⁹⁷ ;
- Sites dits douteux dont l'interprétation est hasardeuse : il n'est pas certain qu'ils soient liés à la chaîne opératoire minière du Chalcolithique et/ou de l'âge du Bronze.

L'attribution de certains sites à des cas douteux est motivée en fonction de plusieurs paramètres. Dans le cas d'ateliers de métallurgie extractive, il peut, par exemple, s'agir de sites où aucune structure de combustion n'a été mise au jour et dont l'interprétation ne repose que sur la découverte d'une unique scorie ou de très rares fragments de minerais. Dans le cas des mines, des exploitations supposées de l'âge du Bronze ne sont parfois évoquées que de par une appréciation textuelle subjective (du type « semble préhistorique ») ou encore par la présence d'un artefact découvert hors stratigraphie et non lié à la chaîne opératoire minière (une statuette en bronze, une pointe de flèche...).

Nous n'avons pas toujours d'information concernant les minéraux fondus dans les ateliers et exploités dans les mines mais avons recensé les sites ne disposant pas de cette information pour augmenter le nombre de sites dénombrés et cela en dépit du fait que l'absence de cette information puisse conduire à leur non-prise en compte lors de la discussion.

Dans le cas des mines, les sites non datés⁹⁸ ont été isolés tout comme les zones minières supposées sur le seul argument d'une correspondance de signatures isotopiques du plomb de certains artefacts avec les gisements locaux.

Les secteurs où une activité métallurgique n'est supposée que par la présence de paléopollutions ont également été isolés (cf II/2.a)⁹⁹.

⁹⁶ Ainsi, dans un premier temps, nous avons évité d'utiliser ces qualifications mais nous discuterons de possibles découpages en V/5.b Recherche de critères adaptés à la chaîne opératoire de production du cuivre.

⁹⁷ Il s'agit pour beaucoup de mines n'ayant fait l'objet que de prospections ou, désormais détruites par la reprise minière ou, plus rarement, de sites non publiés, évoqués en une ligne dans une publication (mais potentiellement fouillés).

⁹⁸ Il s'agit des sites où seuls des maillets en pierre permettent de supposer une datation antérieure à l'âge du Fer.

⁹⁹ Ils ne permettent pas toujours clairement de définir si la métallurgie qui y était pratiquée était extractive ou non. Cependant, leur présence questionne l'existence de mines et pourra notamment être mise en parallèle avec les régions minières où une exploitation pourra être supposée grâce à l'analyse isotopique du plomb (voir la deuxième partie du manuscrit).

III/3.b Un corpus d'étude abondant de sites d'extraction du cuivre

Il ressort de cette recherche bibliographique que la quantité de sites identifiés varie considérablement selon le type de métal. Les sites liés à l'extraction du cuivre sont plus nombreux et mieux caractérisés que ceux liés à l'extraction des autres métaux : 492 mines et ateliers d'extraction de cuivre ont été bien documentés toutes régions confondues (Tableau 9 et Tableau 10). Les exploitations d'étain et d'argent/plomb sont moins nombreuses : 53 mines et ateliers bien documentés pour l'étain, 94 pour l'argent/plomb. Les sites liés à l'exploitation de l'or sont très peu nombreux, avec seulement 32 sites bien documentés.

Métal	Localisation	Bien documenté	Peu documenté	Non daté	Isotopes	Douteux	Total
Cu	Europe	138	70	62	25	50	345
	Hors Europe	51	33	24	11	8	127
Sn	Europe	11	7	5	/	6	29
	Hors Europe	17	1	/	1	2	21
Ag/Pb	Europe	17	/	8	/	3	28
	Hors Europe	8	2	2	/	5	17
Au	Europe	4	2	3	/	4	13
	Hors Europe	19	/	8	/	2	29

Tableau 9 : Classement des mines recensées selon la quantité et la fiabilité des informations récoltées.

Métal	Localisation	Bien documenté	Peu documenté	Paléo-pollutions	Douteux	Total
Cu	Europe	99	69	22	40	230
	Hors Europe	81	52	/	14	147
Sn	Europe	16	2	2	2	22
	Hors Europe	4	2	/	5	11
Ag/Pb	Europe	50	/	5	4	59
	Hors Europe	6	/	/	/	6
Au	Europe	1	4	/	/	5
	Hors Europe	1	1	/	/	2

Tableau 10 : Classement des ateliers de métallurgie extractive recensés selon la quantité et la fiabilité des informations récoltées.

La faible quantité de sites d'extraction stannifères et aurifères connus à ce jour pourrait s'expliquer par le fait que ces derniers peuvent être exploités sous forme alluvionnaire, complexe à identifier. Il s'agit également de métaux dont la provenance est difficile à tracer ce qui ne permet pas aisément d'orienter les prospections vers de supposées régions productrices.

Il est certain que, quel que soit le métal, l'ensemble des exploitations découvertes ne correspondent qu'à une petite partie des mines ayant réellement été en activité entre la fin du Néolithique et la fin de l'âge du Bronze. Cependant, la dynamique actuelle (et le renouveau s'opérant dans la recherche européenne en archéologie minière) complète notre connaissance des zones minières préhistoriques. Cette compilation, débutée en 2017 n'aurait pas été aussi riche si elle avait été entreprise 10 ans plus tôt. Une quantité non négligeable des mines de la péninsule Ibérique et des Balkans, n'y aurait pas figuré. Aucune mine de cuivre n'aurait été connue dans les Alpes et supposée en Corse. L'étain des monts Métallifères aurait été supposé non exploité à l'âge du Bronze.

Les résultats de cette synthèse souffrent donc des limites inhérentes à la découverte et à l'étude, souvent longue et technique, de mines anciennes. Ils ne pourront qu'être enrichis par de nouvelles découvertes qui pourraient faire émerger de nouvelles zones de production encore à découvrir.

Cette compilation possède néanmoins l'avantage d'être la plus exhaustive possible et de constituer le premier travail conduit à cette échelle.

III/4 Cartes de répartition selon la fiabilité des données sources

III/4.a Mines et ateliers de cuivre

Les données recueillies pour le cuivre montrent que la précision des données disponibles diffère selon les pays (Figure 52). Certaines grandes régions telles que le sud de la péninsule Ibérique, les Alpes, le Pays de Galles, le Levant ou encore la péninsule d'Oman présentent beaucoup de sites très bien documentés. D'autres pays et régions telles que la façade atlantique ou encore les Carpates présentent de nombreux sites dont l'interprétation en tant que site lié à l'extraction de cuivre peut être questionnée. Néanmoins, à l'exception de ces régions, la couverture de l'Europe de l'Ouest est satisfaisante. Un total de 471 mines et 377 ateliers d'extraction a été recensé. Le nombre de sites bien documentés s'élève à 189 mines et 180 ateliers, ce qui constitue un corpus d'étude solide.

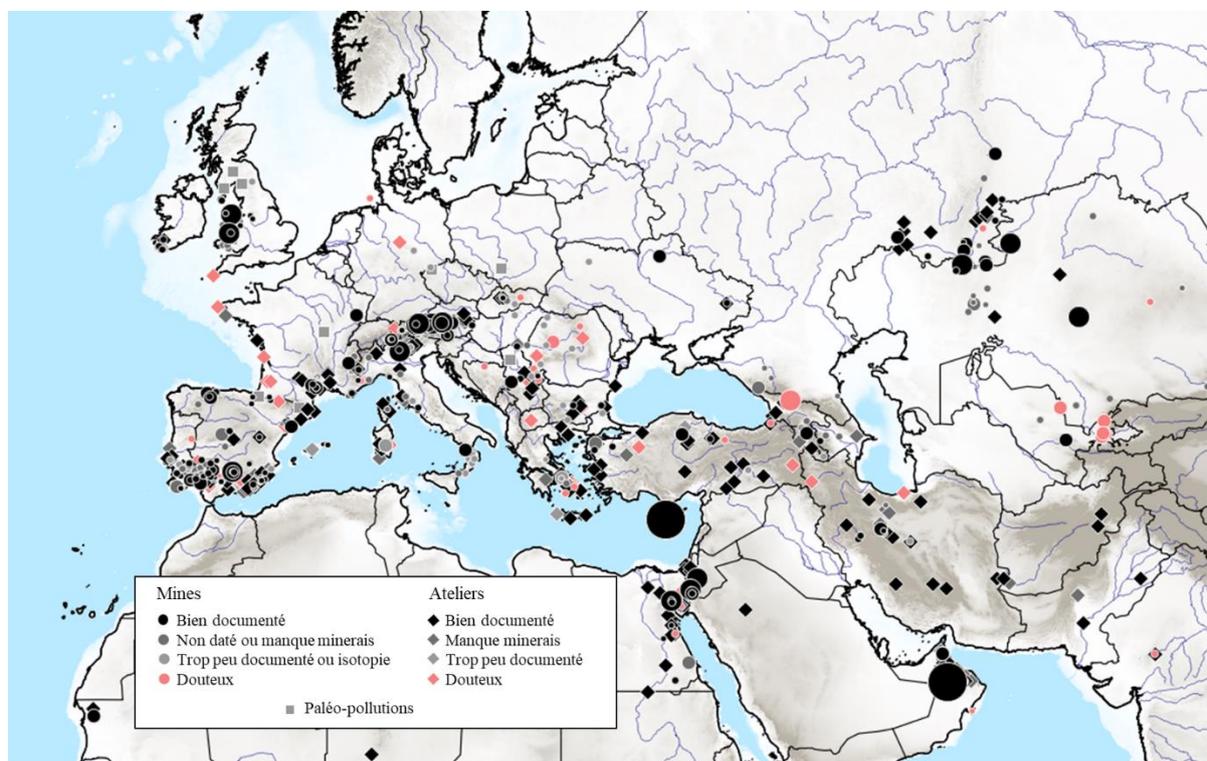


Figure 52 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction du cuivre référencés dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).

III/4.b Mines et ateliers d'étain

Très peu de sites d'exploitation d'étain sont connus en Europe de l'Ouest (Figure 53). Les gisements des Comouailles mais aussi de la péninsule Ibérique ont fait l'objet d'une attention particulière et sont bien documentés. Les gisements des monts Métallifères et du Massif central¹⁰⁰ ont en revanche été peu prospectés et mériteraient de nouvelles investigations. Un total de 50 mines et 33 ateliers d'extraction a été recensé. Le nombre de sites bien documentés s'élève à 28 mines et

¹⁰⁰ Exception faite des gisements du sud Aveyron prospectés par P. Abraham.

20 ateliers. Il y a donc 6 fois moins de mines et d'ateliers bien documentés pour l'étain que pour le cuivre.

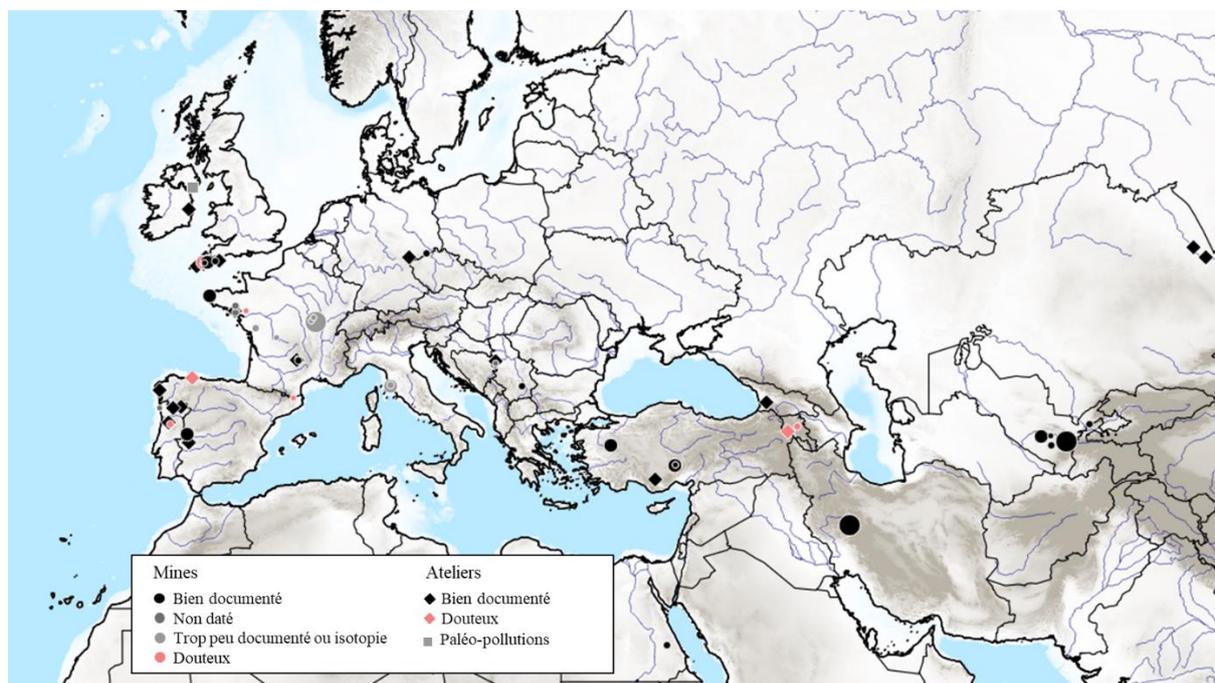


Figure 53 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction de l'étain référencés dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).

III/4.c Mines et ateliers d'argent et de plomb

De nombreux sites liés à la production de plomb et de plomb-argent ont été recensés dans le sud de la Méditerranée ainsi qu'en Angleterre (Figure 54). L'absence d'exploitations ailleurs en Europe nous interroge car le plomb est largement présent en Europe et devient couramment employé comme élément d'alliage à la fin de l'âge du Bronze.

Un total de 45 mines et 65 ateliers d'extraction a été recensé. Le nombre de sites bien documentés s'élève à 25 mines et 56 ateliers. Ce corpus de sites est également limité en comparaison de celui consacré aux exploitations de cuivre. Il se distingue des autres corpus par un nombre considérablement plus élevé d'ateliers découverts par rapport aux mines. Cette abondance d'ateliers découverts est particulièrement notable dans la péninsule Ibérique¹⁰¹.

¹⁰¹ Cela pourrait être lié à une dynamique de recherche (visant à étudier les ateliers dès lors qu'ils sont découverts) ou, plus probablement au fait que les riches mines d'argent ibériques ont été largement reprises aux périodes antiques et modernes : les ateliers pourraient être les seuls vestiges encore en place des exploitations anciennes.

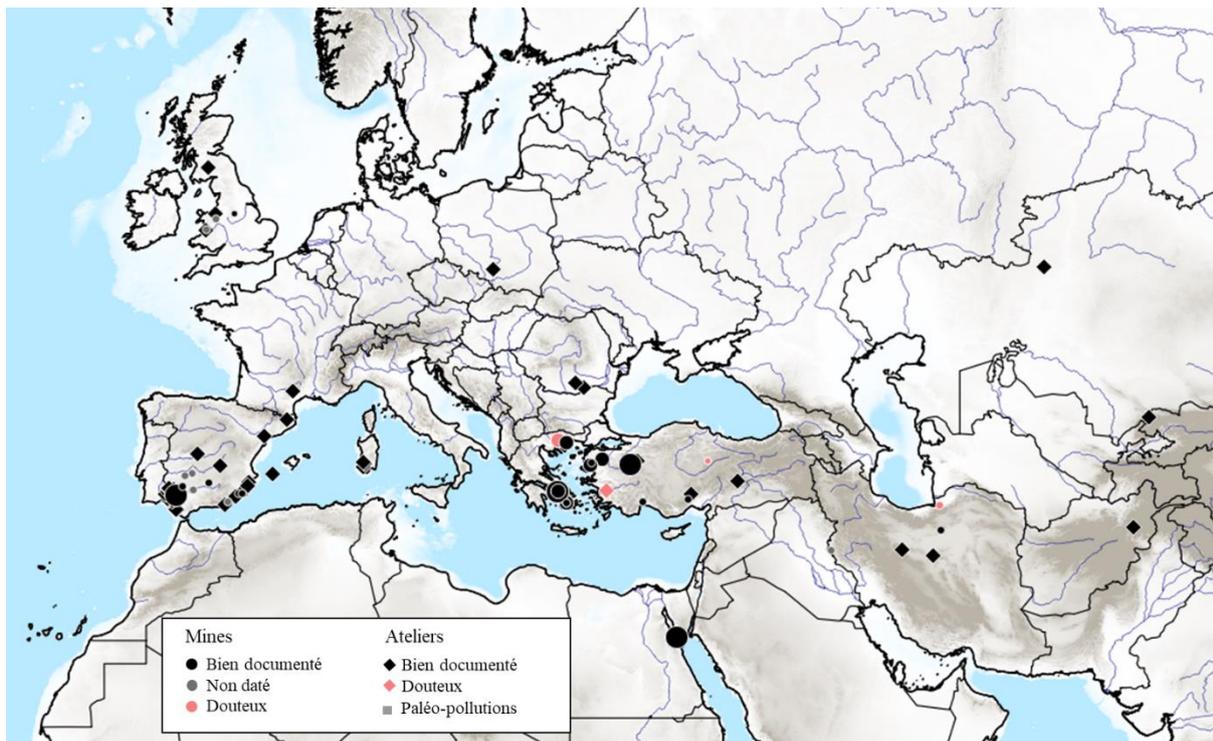


Figure 54 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction du plomb-(argent) dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).

III/4.d Mines et ateliers d'or

Très peu de sites en lien avec l'extraction d'or sont connus en Europe (Figure 55). La majorité des découvertes se concentre dans le pourtour égéen. Des textes anciens couplés à la découverte de mines laissent également supposer une activité intense dans le sud de l'actuelle Égypte.

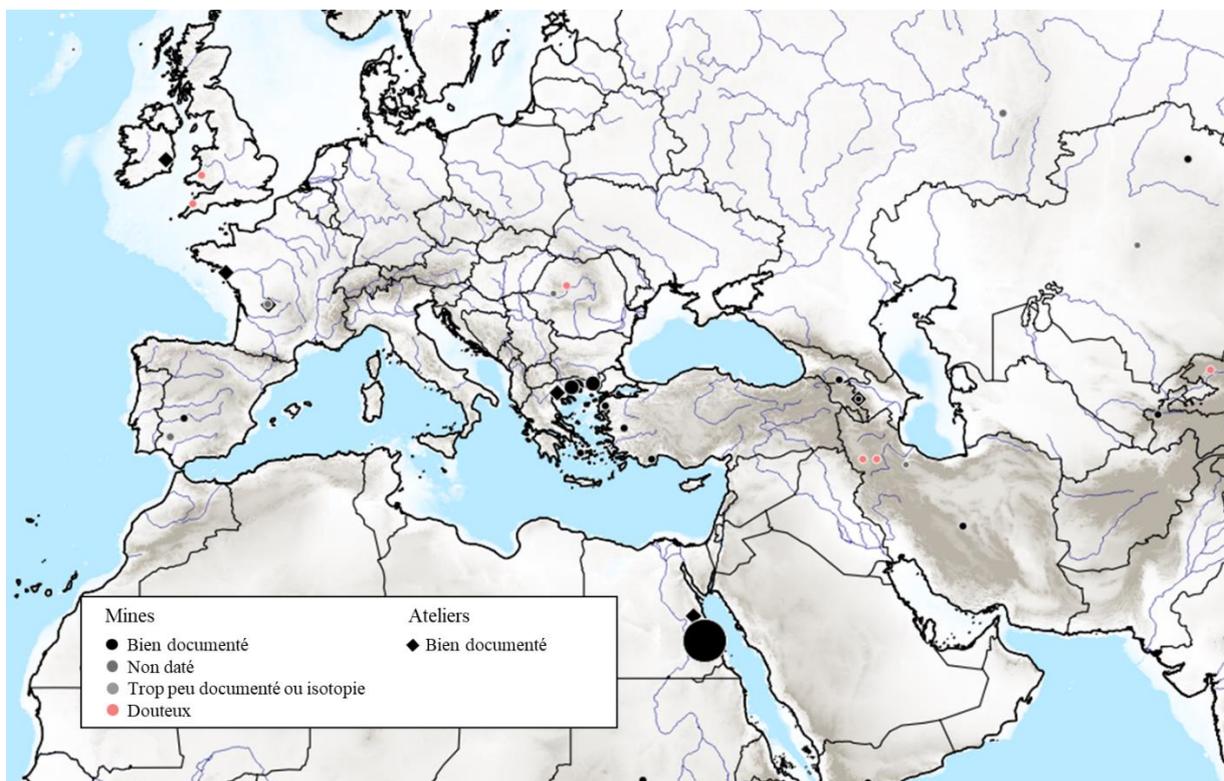


Figure 55 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction de l'or dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).

Un total de 42 mines et 7 ateliers d'extraction a été recensé. Le nombre de sites bien documentés ne s'élève cependant qu'à 23 mines et 2 ateliers. Les deux tiers des sites bien documentés sont localisés en dehors de l'Europe de l'Ouest. Ainsi et contrairement aux exploitations de cuivre, d'étain et de plomb-argent, la très faible quantité de sites découverts ne permet pas de proposer des interprétations solides concernant l'exploitation minière de l'or. Les données recensées figureront donc dans de grandes cartes de localisation mais elles ne pourront pas faire l'objet de commentaires poussés.

IV/ Dynamique d'exploitation minière au cours de la Protohistoire

Les données que nous venons de présenter sont, pour la majorité d'entre elles, associées à une période d'activité. La datation des exploitations nous permet de définir si le nombre des mines et d'ateliers est relativement constant au cours du temps.

IV/1 Une augmentation du nombre de mines en activité ?

IV/1.a Évolution du nombre de mines en activité

Des histogrammes ont été créés afin d'analyser l'évolution du nombre de mines en activité à travers le temps en Europe de l'Ouest (soit l'ensemble de l'Europe jusqu'aux côtes anatoliennes). Le dénombrement des mines par pas de temps a été réalisé à l'aide de la macro LibreOffice « chronophage » développée par Bruno Desachy (Desachy, 2016 ; <https://abp.hypotheses.org/4284> ; Figure 56). La feuille de calcul « distritemps durées » a été utilisée. Un même poids (1) a été attribué à chacun des sites. Les dates¹⁰² de début ont été rentrées dans la colonne « Dpr » soit début au plus récent et la date de fin dans la colonne « Fpa » soit fin au plus ancien. Le calcul a été configuré pour un pas de 100 ans. Un pas de temps plus resserré pourrait être sélectionné mais sa pertinence n'est pas valide au regard de la précision de la datation des sites.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	Go!	début absolu	-5000	fin absolue	-800	Pas :	100	durées	Ré
2	événement	Dpa	Dpr	Fpa	Fpr	Tpc		poids	
3	All Slade Mine		-2000	-1500					1
4	Allt y Crib		-2000	-1500					1
5	Ambelikou		-1900	-1800					1
6	Baita di Cudona di P		-800	-400					1
7	Balkan Hill		-2000	-1500					1
8	Bwlch y Plwm		-2000	-1500					1
9	Chypre - Kambia (Pit		-900	-410					1
0	Chypre - Larnaca		-700	-600					1
1	Chypre - Skouriotiss		-1100	-700					1
2	Craig y Forwen		-2000	-1500					1
3	Cwm Pennant Valley		-2000	-1500					1
4	Dinas Mawddwy		-2000	-1500					1
5	Dolclettwr		-2000	-1500					1
6	Esgairhir		-2000	-1500					1
7	Esgairlle		-2000	-1500					1
8	Glaslyn		-2000	-1500					1
9	Grogwynion		-2000	-1500					1
0	Gurji		-2300	-2000					1

Figure 56 : Interface de chronophage et configuration utilisée.

Les données obtenues correspondent au taux d'occupation du pas de temps : par exemple, un site daté entre 2350 et 2250 av. J.-C. occupe 50 % des pas de temps 2400-2300 et 2300-2200 av. J.-C. Cependant, pour évaluer l'exploitation effective du site à chaque tranche temporelle, une transformation a été appliquée afin que toute occupation partielle soit considérée comme une occupation totale (dans l'exemple précédent, 0,5 est remplacé par 1).

¹⁰² Les dates doivent être transformées pour être sous forme négative (3000 av. J.-C. devient -3000).

III/1.b Mines et ateliers de métallurgie extractive du cuivre

Le nombre de mines et d'ateliers d'extraction du cuivre recensé varie au cours du temps (Figure 57).

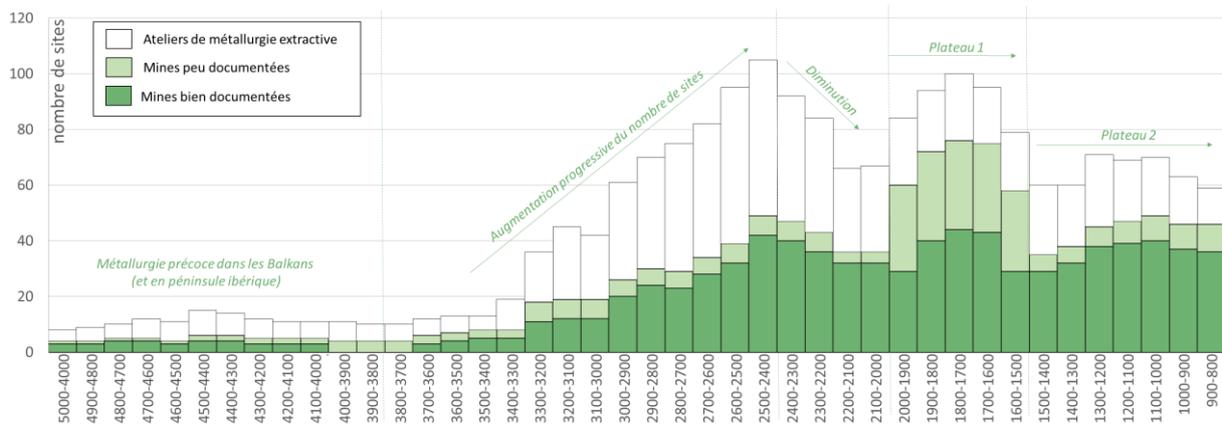


Figure 57 : Nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du cuivre au cours du temps (5000 à 800 av. J.-C.) en Europe de l'Ouest.

Cette augmentation est significative entre 5000 et 800 av. J.-C. mais n'est pas continue : des cycles de croissance, déclin et stagnation du nombre de mines peuvent clairement être identifiés. S'il existe des exploitations précoces entre 5000 et 3900/3800 av. J.-C., ce n'est qu'à partir d'environ 3500/3000 av. J.-C. que le nombre de mines et d'ateliers augmente de manière notable en Europe de l'Ouest pour atteindre environ 20 mines et 26 ateliers. Cette phase de croissance continue atteint son maximum vers 2500/2400 : une centaine de sites seraient alors en exploitation.

Les années 2500/2400 av. J.-C. marquent la fin de cette première période de croissance : elles sont suivies par un léger déclin se poursuivant jusque vers 2000 av. J.-C., année durant laquelle seules une trentaine de mines et une trentaine d'ateliers sont recensés.

La suite de notre interprétation variera alors en fonction que l'on considère ou non les mines peu documentées et donc assez mal datées. En considérant ces dernières, le nombre de mines augmenterait très brusquement vers 2000 av. J.-C. (sans entraîner une hausse importante du nombre d'ateliers découverts) pour se stabiliser entre 2000 et 1500 av. J.-C. autour de 60-75 mines et seulement 20-24 ateliers. Ce nombre chuterait à nouveau vers 1500 av. J.-C. pour se stabiliser à nouveau à environ 40 mines et 20 ateliers découverts jusque 800 av. J.-C.

Cependant, en ne considérant que les mines bien documentées, la hausse observée vers 2000 av. J.-C. n'est que peu marquée. Le nombre de sites en activité serait stable depuis 2000 av. J.-C. soit le début de l'âge du Bronze occidental jusqu'à sa fin vers 800 av. J.-C. : 26-35 mines bien documentées et 20-25 ateliers sont simultanément en activité durant toute cette période.

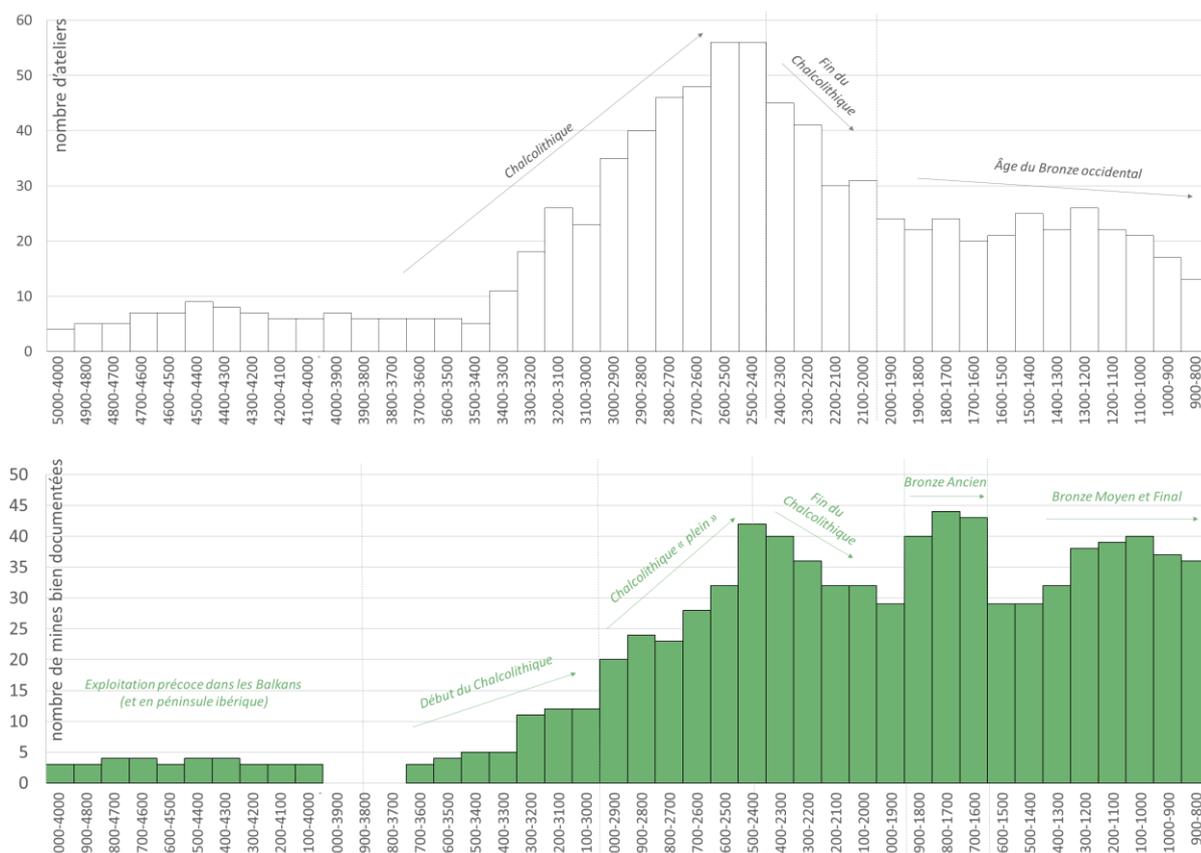


Figure 58 : Évolution du nombre d'ateliers de métallurgie extractive du cuivre découverts (histogramme du haut) et du nombre de mines bien documentées (histogramme du bas).

Le nombre d'ateliers ne se corrèle pas directement au nombre de mines découvertes (Figure 58) : à ce jour, il a été découvert beaucoup plus d'ateliers datés du Chalcolithique (soit vers 3100-2500 av. J.-C.) que de l'âge du Bronze. Cette constatation est d'autant plus surprenante que les ateliers chalcolithiques qui produisaient peu de scories sont plus complexes à retrouver que les ateliers de l'âge du Bronze exploitant des sulfures de cuivre et produisant de nombreux déchets métallurgiques (cf II/1.c). Une hypothèse peut alors être émise (cette dernière sera testée en V/5 Degrés de spécialisation de la production de c) : beaucoup plus d'ateliers seraient recensés car les activités de métallurgie extractives seraient moins organisées au Chalcolithique qu'à l'âge du Bronze où les ateliers d'extraction seraient moins nombreux mais de dimension plus importante.

III/1.c Mines et ateliers de métallurgie extractive de l'étain

Peu d'exploitations connues

Si l'exploitation du cuivre remonte à 5000 av. J.-C. en Europe de l'Ouest, les premiers sites documentés avec un niveau de confiance suffisant ne témoignent de la présence d'exploitations d'étain que dès 2500 av. J.-C. Tout comme dans le cas du cuivre, le nombre de sites n'est pas stable (Figure 59).

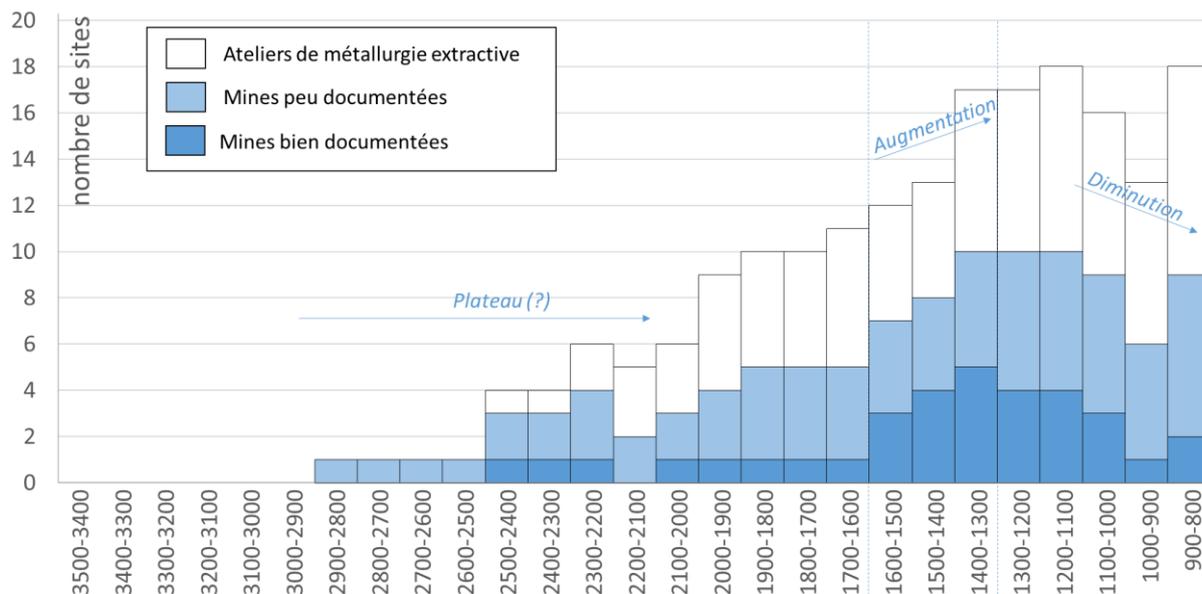


Figure 59 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive de l'étain au cours du temps en Europe de l'Ouest.

Le nombre de mines d'étain bien documentées (en bleu foncé sur la Figure 59) est multiplié par 5 entre 1600 et 1300 av. J.-C. et atteint un maximum entre 1400 et 1100 av. J.-C. avant de diminuer à nouveau.

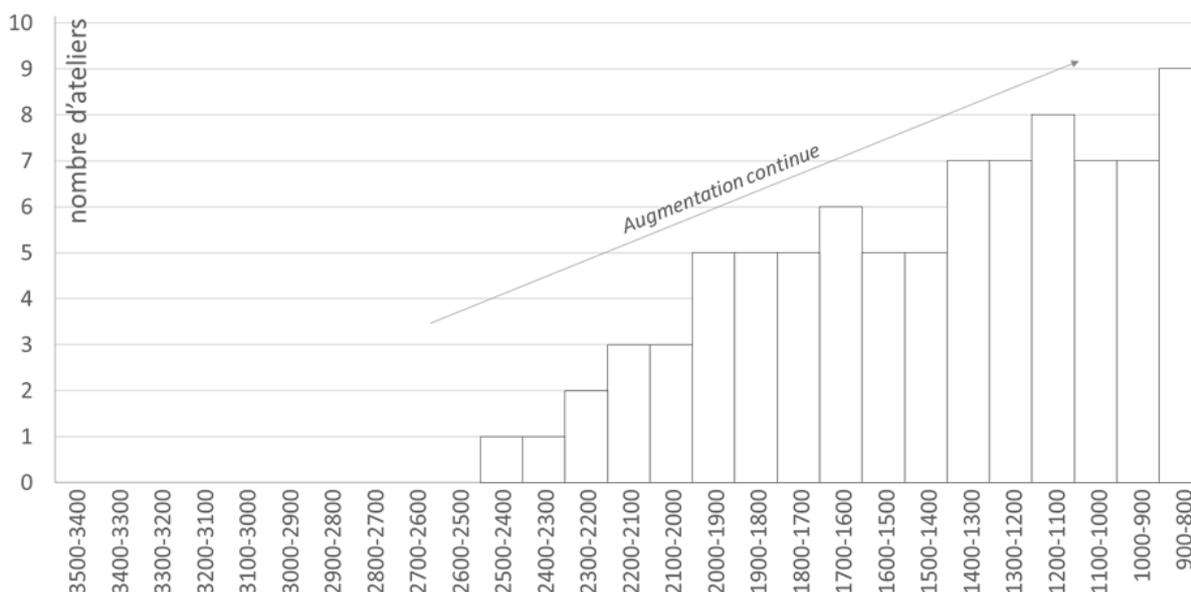


Figure 60 : Répartition du nombre d'ateliers de métallurgie extractive de l'étain au cours du temps en Europe de l'Ouest.

Le nombre de sites mis au jour demeure encore très faible et il faut donc rester prudent quant aux interprétations quantitatives. On peut toutefois noter que le nombre d'ateliers découverts (Figure 60) augmente de manière croissante et continue à partir d'environ 2500 jusqu'à 800 av. J.-C. avec un taux moyen constant passant de 1 en 2400 à 9 vers 800 av. J.-C.

Le faible nombre de mines référencées pourrait être lié à la difficulté de localiser les mines alluvionnaires. Le nombre d'ateliers serait donc plus représentatif de la réelle augmentation du nombre d'exploitations en activité.

Des mines d'étain très complexes à identifier

Mis en place dans des environnements granitiques, les gisements d'étain ne peuvent que très difficilement être exploités en mine en « roche » car les granites sont des roches très résistantes, difficiles à attaquer même à l'aide d'abattage par le feu¹⁰³. Toutefois, les granites peuvent être affectés par une altération de surface qui transforme la roche très résistante en une roche plus friable, appelée greisen. Les greisens contenant de l'étain sont rares en Europe mais ont été clairement exploités en roche l'âge du Bronze comme le témoigne la découverte de trois mines fouillées et de six autres ayant fait l'objet de reprises minières, notamment dans les années 1930 à 1960 mais présentant des signes d'exploitation protohistoriques (Figure 61).

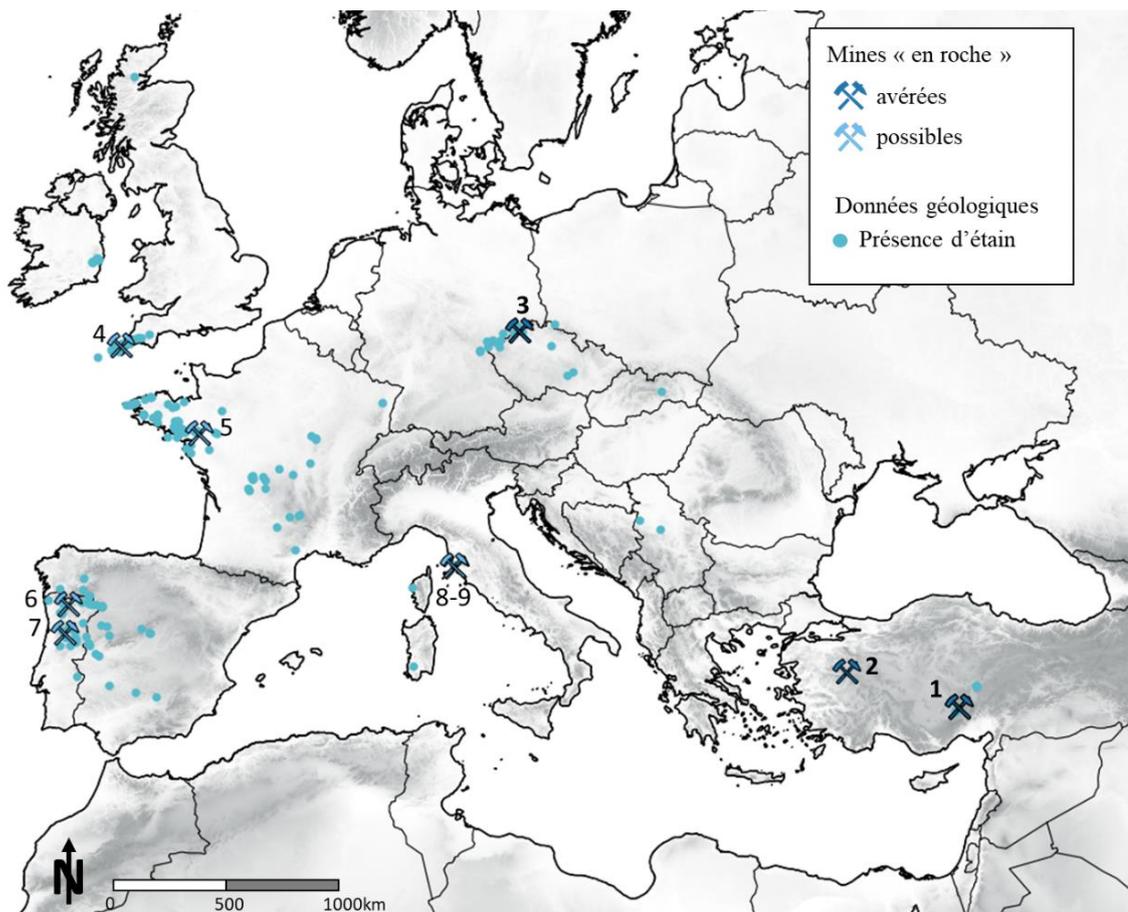


Figure 61 : Mines d'étain en roche connues et supposées : 1 Kestel, 2 Kültepe, 3 Schellerhau, 4 Wheal Coates, 5 Abbaretz-Nozay, 6 Carvalhelhos, 7 Tuela, 8-9 : Monte Valerio et Monte Rombolo. Une dixième mine aurait pu être ajoutée à cette compilation : la mine de São Martinho de Orgens (Portugal) où une dague du Bronze final a été trouvée dans le comblement d'un puits d'extraction lors de l'exploitation de cette dernière pendant la Seconde Guerre mondiale (Comendador Rey et al., 2017). Cette découverte n'étant reliée à aucun contexte stratigraphique, le choix de ne pas l'afficher a été fait. Source de la carte : Tomczyk, 2024.

Si les mines d'étain en roche semblent rares, les exploitations d'étain alluvionnaire (piégé dans des cours d'eau) clairement datées de l'âge du Bronze le sont tout autant et seules sept exploitations alluvionnaires ont été clairement identifiées et fouillées pour toute la durée de l'âge du Bronze (Figure 62).

¹⁰³ L'exploitation d'un granite peu altéré n'apparaît pas impossible pour des mineurs de l'âge du Bronze comme en témoigne la présence d'abattage par le feu identifié dans la mine de Kestel en Anatolie (Yener, 1997), de Karnab (Ouzbékistan) et de Mushiston (Tadjikistan) (Garner, 2015).

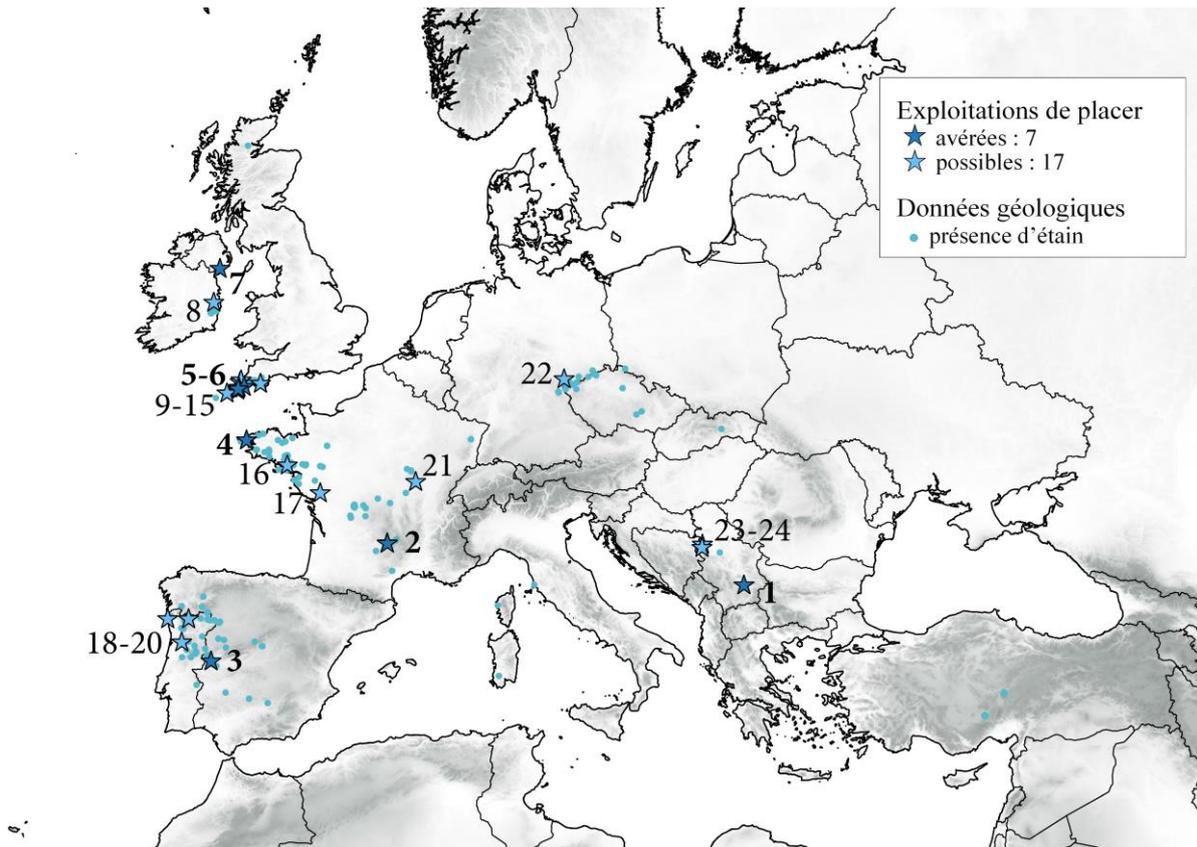


Figure 62 : Mines d'étain alluvionnaires connues et supposées : 1 Spasovine, 2 Montpeyroux et Le Faltre, 3 El Cerro de San Cristobal, 4 Saint-Renan, 5-6 : St Austell et Carnon, 7 montagnes de Mourne, 8 Montagnes de Wicklow, 9-15 : Perran-ar-Worthal, vallée de la Lanherne, Truro, Tremough, rivière Erme, St Eval et Sennen, 16 Mor Braz, 17 Mervent, 18-20 : Folgadoura, Carvalhelhos et Baiões, 21 Autun, 22 vallée de l'Elster (monts Métallifères), 23-24 : Mont Cer et Cigankulja. Les données géologiques sont issues de la base de données ProMine. Source de la carte : Tomczyk, 2024.

Plusieurs facteurs expliquent ce faible nombre de découvertes. Tout d'abord, les structures alluvionnaires sont facilement détruites par des phases de reprise d'exploitations¹⁰⁴. Cependant, même lorsqu'elles ne sont pas détruites, les exploitations de placers et paléo-placers sont difficiles à identifier et nous ne pouvons souvent supposer la présence d'exploitations que de par la présence d'ateliers de minéralurgie et de métallurgie, destinés à la réduction de cassitérites¹⁰⁵ ou encore de fortifications et/ou des concentrations importantes d'habitations dans des zones de placers très riches en étain. Le faible que le nombre d'ateliers soit largement supérieur au nombre de mines s'expliquerait donc par ce biais de découvertes.

¹⁰⁴ Par exemple, dans le Massif armoricain, des prospecteurs décrivent de nombreuses traces d'anciens travaux aujourd'hui détruits et impossibles à dater (Le Carlier de Veslud *et al.*, 2017) et l'exploitation des alluvions de Mor Braz en Bretagne est quasi-certaine, mais les vestiges ne sont plus accessibles (Chauris, 2011).

¹⁰⁵ Les découvertes réalisées sur le site du Faltre (Massif central) montreraient que ces étapes de la chaîne opératoire minière auraient lieu à proximité immédiate des sites d'extractions (Cauuet, 2013). De même, à Kestel (Turquie) la cassitérite est traitée directement en contrebas de la mine (Yener et Vandiver, 1993). Des outils d'extraction dans les alluvions, ou encore des broyeurs, ont également été retrouvés aux abords directs de placers dans les Cornouailles à Tremough (Jones *et al.*, 2016), Sennen (Carey *et al.*, 2019), et dans la vallée de la Lanherne (Todd, 2014 p. 109). Toujours dans les Cornouailles, de la cassitérite a été trouvée dans des habitats à St Eval (Timberlake, 2007).

III/1.d Mines et ateliers de métallurgie extractive du plomb/plomb-argent

L'évolution du nombre de mines et d'ateliers d'extraction de plomb et plomb-argent montre quatre principales périodes d'activités (Figure 63). Entre 5000 et 3300 av. J.-C., l'exploitation du plomb(-argent) semble très peu développée. Elle ne débute réellement qu'entre 3300 et 2600/2500 av. J.-C. où un premier plateau haut (environ 2 mines et 8 ateliers) est observé. Cette période de stagnation du nombre de mines est suivie d'un second plateau entre 2600/2500 av. J.-C. et 1500 av. J.-C. où le nombre de mines et d'ateliers est très faible (moins de trois sites sont recensés). Le nombre de sites augmente ensuite en deux étapes : légèrement entre 1500 et 1300 av. J.-C., puis rapidement après 1300 av. J.-C. pour atteindre environ 5 mines et jusqu'à 19 ateliers¹⁰⁶.

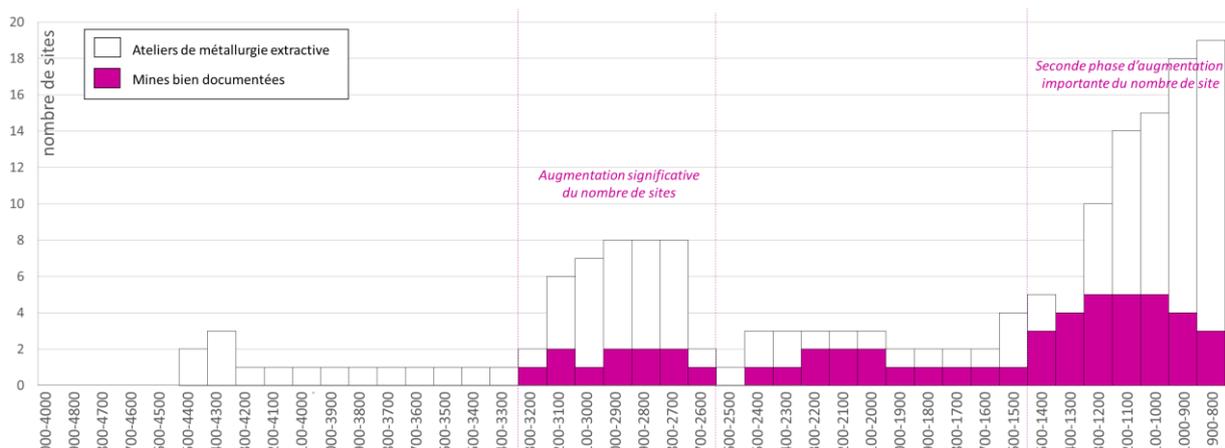


Figure 63 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du plomb et du plomb-argent au cours du temps en Europe de l'Ouest.

Une fois encore, le nombre de mines et d'ateliers ne se corrèle pas pour les périodes récentes (Figure 64) : l'augmentation du nombre de sites après 1300 av. J.-C. est portée par le nombre d'ateliers (en augmentation) alors que le nombre de mines diminue après 1000 av. J.-C. Néanmoins, dans ce cas précis, cette hausse est liée au nombre d'ateliers découverts dans les régions de Cartagena et du Rio Tinto (péninsule Ibérique), deux secteurs miniers connus pour leur exploitation très intense aux périodes romaines et contemporaines (Rico *et al.*, 2009 ; Anguilano *et al.*, 2010).

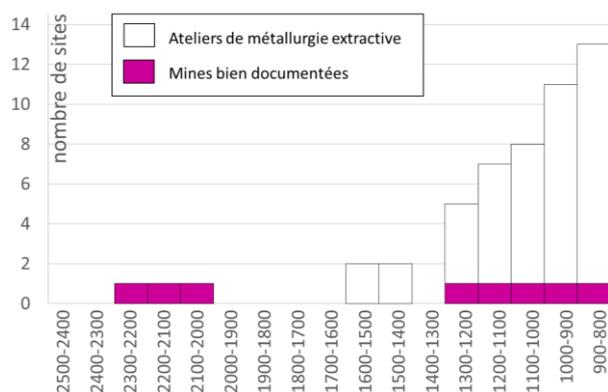


Figure 64 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du plomb et du plomb-argent en péninsule Ibérique.

¹⁰⁶ La présence de deux périodes de forte activité (3300-2600 puis après 1500 av. J.-C.) se corrèle bien avec les découvertes d'artefacts. Si ces derniers sont rares au IV^e millénaire (Primas, 1995), de nombreux artefacts en argent datés du III^e millénaire ont été découverts en Egée (Wagner *et al.*, 1980) et dans le sud de la péninsule Ibérique (Bartelheim *et al.*, 2012). Cette première période de production et de consommation d'argent ne se poursuit pas nettement et il faudra attendre à la fin du deuxième et le début du premier millénaire av. J.-C. pour que de nombreux artefacts en argent circulent dans l'ensemble de la Méditerranée (Murillo-Barroso *et al.*, 2016 ; Eshel *et al.*, 2019 ; Wood *et al.*, 2019 ; Matta et Vandkilde, 2023).

Le faible nombre de mines découvertes par rapport aux nombreux ateliers pourrait donc s'expliquer par la reprise minière très intense ayant très probablement détruit en grande partie les chantiers miniers anciens, conduit à la destruction des haldes et potentiellement à la refonte des scories anciennes¹⁰⁷. La dimension importante que devait atteindre ces mines aujourd'hui disparues ne fait pourtant aucun doute : la production de plomb entre 1100 et 800 av. J.-C. dans le sud-est de la péninsule Ibérique est telle que sa signature isotopique a été identifiée dans les glaces du Groenland (McConnell *et al.*, 2018).

III/1.e Découpages chronologiques retenus

Les histogrammes précédemment tracés montrent des similitudes dans les dynamiques minières du cuivre, de l'étain et du plomb-argent à l'âge du Bronze (Figure 65) :

- De 2000 à 1600 av. J.-C., nous observons un nombre stable d'exploitations de cuivre et de plomb-argent et une faible croissance du nombre de mines d'étain ;
- De 1600 à 1300 av. J.-C., nous constatons une phase de croissance du nombre de mines d'étain et de plomb-argent et une stabilité du nombre de mines de cuivre ;
- De 1300 à 800 av. J.-C. nous identifions, un nombre stable d'exploitations de cuivre et une croissance du nombre de mines d'étain et de plomb-argent)¹⁰⁸.

En fonction des données récoltées, nous avons donc choisi de scinder l'âge du Bronze en trois périodes, correspondant aux trois phases clairement identifiées.

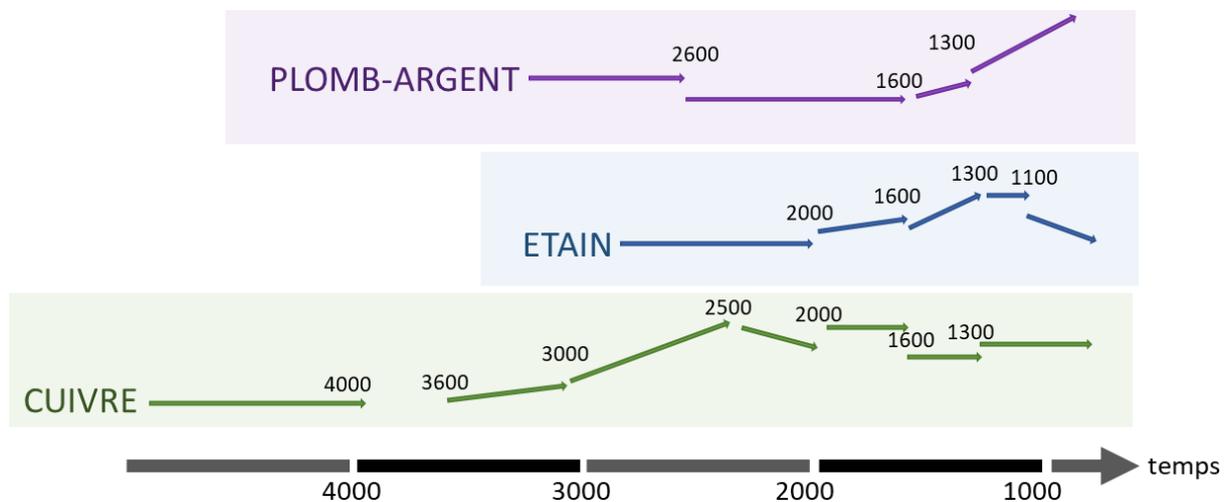


Figure 65 : Variation simplifiée du nombre d'exploitations de cuivre, étain et plomb-argent.

Proposer un découpage pour le Chalcolithique/Néolithique s'est avéré plus complexe :

- Des productions très précoces de cuivre ont lieu au V^e millénaire. Il n'y a quasiment aucun site exploitant le cuivre entre 4000 et 3600 av. J.-C. et nous avons donc décidé de placer une rupture en 3800 av. J.-C. (soit au cœur de cette période de très faible activité). La première période d'exploitation étudiée sera donc bornée entre 5000 et 3800 av. J.-C. ;

¹⁰⁷ Des centaines de milliers de tonnes de scories, encore riches en plomb et en argent, ont été entièrement exploitées et traitées entre 1858 et 1872 au Laurion (Hopper, 1968) mais aussi en Sardaigne (Lo Schiavo *et al.*, 2005 p.85) sous la direction d'Enrico Serpieri.

¹⁰⁸ Cette phase de croissance pourrait être interrompue par une courte rupture vers 1100/1000 av. J.-C. dans le cas de l'étain et peut-être du plomb-argent.

- Une période de croissance des exploitations de cuivre s'observe ensuite entre 3800 et 3000 av. J.-C., elle constitue une seconde période ;
- Entre 3000 et 2600/2500 av. J.-C., le nombre de sites de cuivre est en forte augmentation et les mines de plomb-argent connaissent une production stable et forte : nous avons donc distingué cette période ;
- Entre ~2500 et 2000 av. J.-C., le nombre d'exploitations plomb-argent est fixe mais les premières exploitations d'étain apparaissent et le nombre de mines et d'ateliers de cuivre diminue. Nous avons décidé d'identifier clairement cette période afin d'observer les changements concernant les mines de cuivre et l'apparition des premières exploitations d'étain.

Les sept périodes retenues sont donc : 5000 à 3800, 3800 à 3000, 3000 à 2500, 2500 à 2000, 2000 à 1600, 1600 à 1300 et 1300 à 800 av. J.-C. Ces découpages permettent de visualiser efficacement les dynamiques minières à travers l'Europe, bien que quelques ajustements auraient pu être faits pour mieux correspondre aux dynamiques spécifiques de certaines régions. Une division à 1200 av. J.-C. (plutôt qu'à 1300 av. J.-C.) aurait par exemple permis une meilleure synchronisation avec les découpages de l'Europe du sud-est et du Proche-Orient. Cependant, l'éventualité d'une période de rupture de l'exploitation minière vers 1200 av. J.-C. sera discutée plus en détail ultérieurement (cf V/3.a).

IV/2 Zones de production de métaux entre 5000 et 400 av. J.-C.

IV/2.a Entre 5000 et 3800 av. J.-C., peu de régions productrices de métaux

La localisation des mines (cercles) et des ateliers (losanges) de cuivre (figurés verts), de plomb-argent (figurés mauves) et d'or (figuré ocre)¹⁰⁹ recensées pour la période 5000-3800 av. J.-C. montre que les métaux précieux sont exploités dans les Carpates et que le cuivre n'est extrait et fondu que dans de rares régions en Europe (Figure 66).

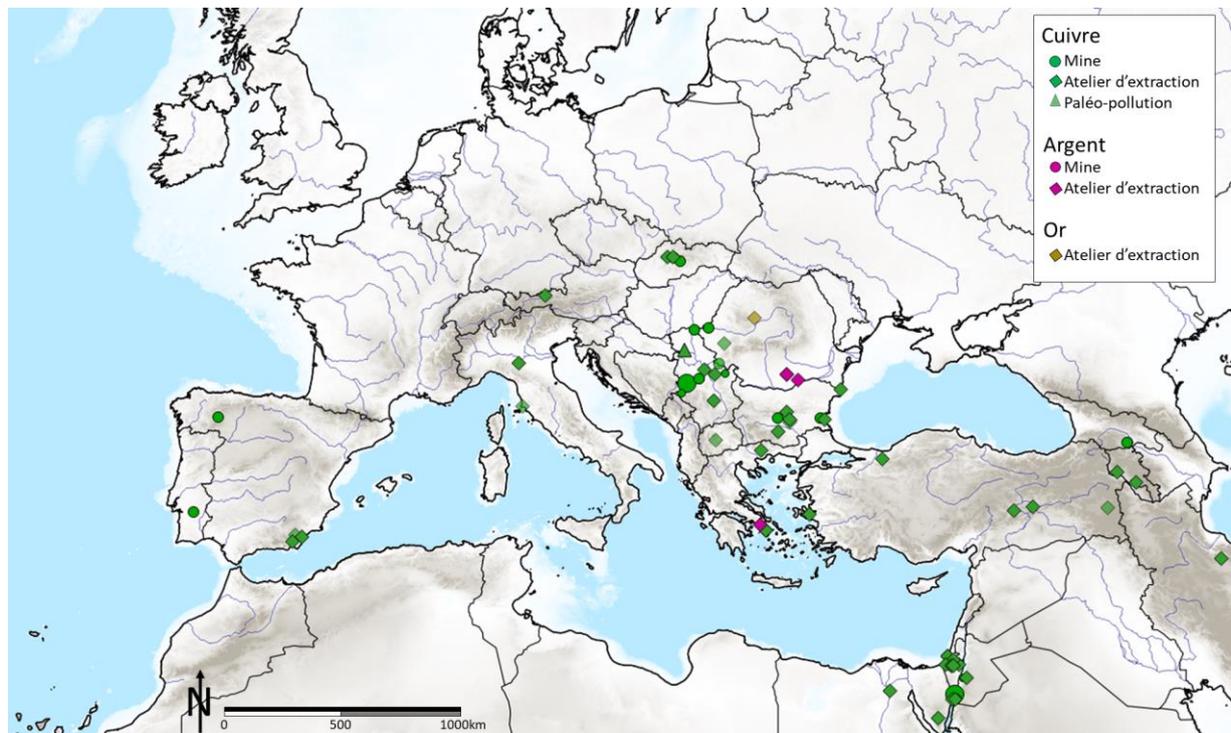


Figure 66 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 5000-3800 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

¹⁰⁹ À cette période l'étain n'est pas encore exploité.

De nombreux métaux extraits de mines de taille importante dans les Balkans

En Europe centrale, les Balkans concentrent la majorité des sites en exploitation. Des mines de cuivre et des ateliers d'extraction d'argent y ont été découverts. Si de l'or y circule déjà (Radivojević et Roberts, 2021), les mines et ateliers l'ayant produit sont encore à découvrir : seul le site de Peștera Ungurului (Roumanie) laisse supposer une exploitation alluvionnaire de l'or suite à la découverte de petites billes et de petites plaques en or (Lazarovici et Lazarovici, 2013) mais la provenance locale de ces dernières demande à être clairement confirmée. Les mines de cuivre exploitées dans les Balkans sont de morphologies variées : tranchées à ciel ouvert (à Ai Bunar), puits verticaux (à Rudna Glava) et mines creusées en souterrain (à Mali Sturac). Ces exploitations correspondent majoritairement à des sites d'extraction de taille importante : 50 chantiers ont été découverts à Ai Bunar (dont une tranchée profonde de près de 30 m !) et 40 puits creusés par abattage par le feu à Rudna Glava (certains atteignent 20 m de profondeur).

Cette apparition précoce des métaux dans les Balkans est associée à la culture de Vinča (5300 à 4500 av. J.-C., Roberts *et al.*, 2021) ayant produit les plus anciennes traces de métallurgie du cuivre en Europe (Radivojević *et al.*, 2010).

Des exploitations précoces en péninsule Ibérique

De rares sites d'extraction ont été découverts en péninsule Ibérique. Ils sont contemporains d'une activité métallurgique également précoce (V^e millénaire av. J.-C.) identifiée depuis longtemps par Ruiz Taboada et Montero Ruiz (1999).

Si la mine découverte dans le sud-ouest de la péninsule (Monte da Angerinha) n'a fait l'objet que d'une brève citation dans Gauss *et al.* (2004), la mine située dans le nord de la péninsule (El Aramo) s'est implantée dans une cavité karstique. Tout comme les mines des Balkans, cette mine présente une extension importante et une maîtrise avancée des techniques d'extraction minières : elle comprend plus de 800 mètres de travaux souterrains dont l'accès se fait via des puits verticaux de 30 m de profondeur (Figure 67). Une partie des galeries sont ouvertes par abattage par le feu (de Blas Cortina, 2005). La mine est interprétée comme exportatrice : sa production pourrait dépasser la simple demande locale (de Blas Cortina, 2014).

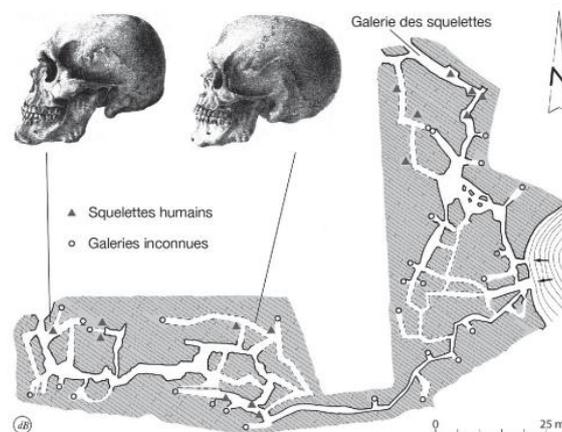


Figure 67 : Plan partiel des galeries préhistoriques et distribution des squelettes humains de la mine d'El Aramo. Source : de Blas Cortina, 2005. Les 16 squelettes inhumés dans des galeries contemporaines de l'exploitation sont interprétés par Gimbutas (2005) en lien avec des croyances chalcolithiques¹¹⁰.

¹¹⁰ Selon l'auteure, il pourrait s'agir d'une forme de demande de pardon pour l'extraction et d'une forme d'offrande à la terre visant à remettre des symboles de la vie dans les tranchées vidées de leur « vie minérale ».

Une troisième zone d'extraction minière peut être supposée dans la province d'Almería dans le sud-ouest de la péninsule ; cette région présente des ateliers de métallurgie extractive dont celui de Cerro Virtud de Herrerias qui a livré le plus ancien vase à réduire le minerai de cuivre actuellement connu (Rovira et Ambert, 2002).

De rares découvertes dans les Alpes

Dans les Alpes, de petits ateliers ont été découverts dans le Tyrol (à Mariahilfberg) et en Lombardie (à Botteghino et probablement à Orti Bottagone). Ce sont les seuls indices d'exploitation du cuivre local sans qu'il soit possible d'en estimer l'importance.

Conclusion concernant la répartition des mines de cuivre

Si le nombre de mines découvertes en Europe de l'Ouest est assez limité, la taille très importante de certaines exploitations suggère de possibles exportations de surplus. Cette conclusion est à contre-courant de nombreux écrits supposant que l'activité minière chalcolithique serait dédiée aux seuls besoins locaux (Hanks et Doonan, 2009 ; Stöllner, 2012 ; Vandkilde, 2019 ; Caraglio, 2020 ; Norgaard et Reiter, 2020). En effet, dans les Balkans comme à El Aramo, les mines étaient déjà de taille impressionnante : dans les Balkans, les mines d'Ai Bunar et de Mali Sturac possèdent un volume respectif de 2200 m³ et 6000 m³. Le volume de la mine d'El Aramo serait de 4670 m³. De tels volumes ne sont que très rarement atteints par la suite à l'âge du Bronze (et ce alors que les exploitations sont qualifiées d'exploitations de masse). Extraire de tels volumes de roche nécessitait une maîtrise importante des techniques d'extraction minière :

- De l'abattage par le feu a été reconnu en Espagne tout comme dans les Balkans ;
- Les techniques d'approfondissement sont complètement maîtrisées et les exploitations se font sous forme de tranchées, en puits, mais aussi en souterrain.

Des minéraux différents mais fondus par réduction à faible température

La carte de localisation (Figure 66) montre que les mines et les ateliers d'extraction du cuivre sont majoritairement présents le long du pourtour méditerranéen. Cette répartition a été expliquée il y a déjà longtemps comme le résultat d'une diffusion précoce de la métallurgie en Méditerranée (Furon, 1966). Sans que les deux hypothèses soient antinomiques, nous pensons que c'est la nature géologique des roches qui présentent de nombreux gisements de carbonates de cuivre qui détermine cette répartition.

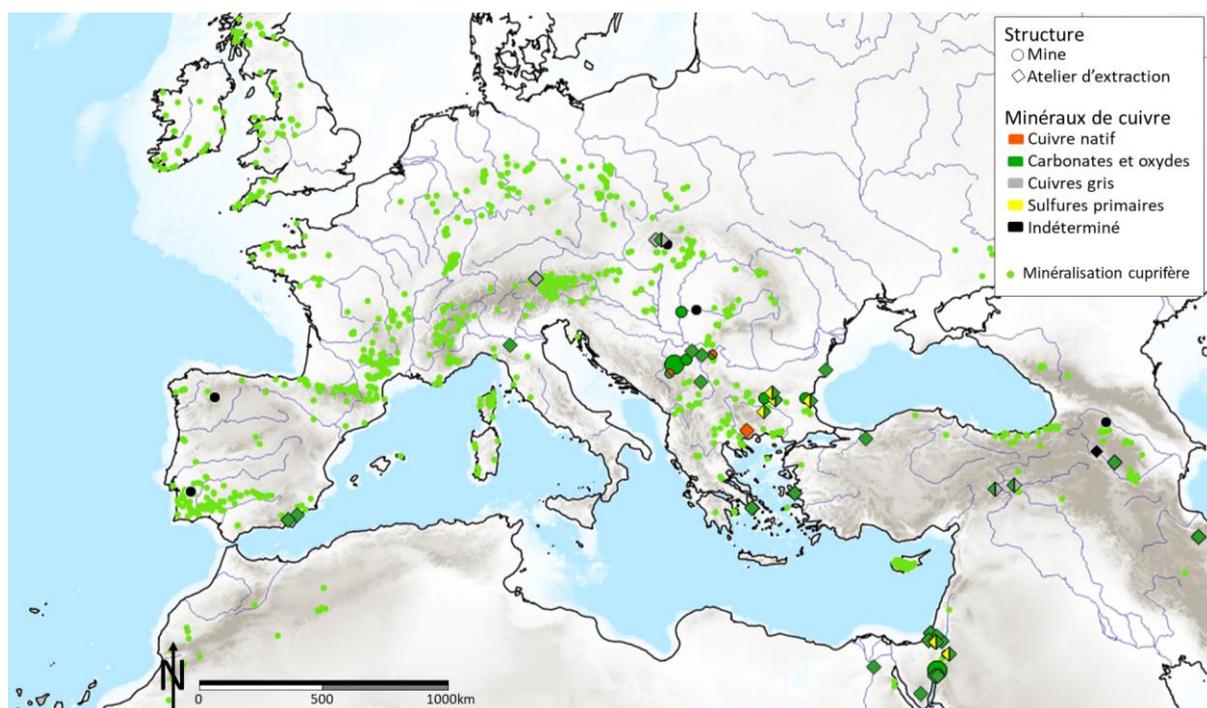


Figure 68 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 5000 et 3800 av. J.-C. ; la taille des figurés est proportionnelle à la taille des exploitations. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent la fonte de deux types de minerais.

Le détail des types de minéraux de cuivre extraits et/ou fondus dans les sites recensés (les sites douteux n'ont pas été pris en compte), indique que le cuivre natif semble rarement exploité contrairement à ce qu'il a été fréquemment écrit (Bertholon et Relier, 1990 ; David, 2001 p.17). Au contraire, chaque région semble exploiter un type de minerai différent (Figure 68). Ainsi, des carbonates de cuivre sont extraits dans le sud de la péninsule Ibérique, dans le pourtour égéen et dans le nord des Balkans (actuelle Serbie) ; des carbonates accompagnés de chalcopyrates sont fondus dans le sud des Balkans (actuelle Bulgarie) ; des cuivres gris sont travaillés dans les Alpes et en Slovaquie.

Pour autant, bien que la forme des réacteurs diffère selon les régions, l'ensemble de ces minéraux peuvent être fondus par réduction seule à « faible » température.

L'enrichissement supergène : une limite géographique à l'exploitation ?

Entre 5000 et 3800 av. J.-C., mines et ateliers se répartissent probablement le long du pourtour méditerranéen car les oxydes et carbonates de cuivre y sont abondants du fait de la présence de zones d'enrichissement supergène.

Les cuivres gris peuvent être fondus seuls, sans apport de carbonates de cuivre en employant des processus similaires à celui employé lorsque des carbonates de cuivre sont impliqués. Ces minéraux peuvent être exploités dans les régions ne présentant pas d'épaisses couches de carbonates de cuivre telles que les Alpes et les Carpates. La fonte de cuivres gris permet alors d'obtenir des cuivres riches en arsenic qui deviendront courants au début du III^e millénaire av. J.-C.

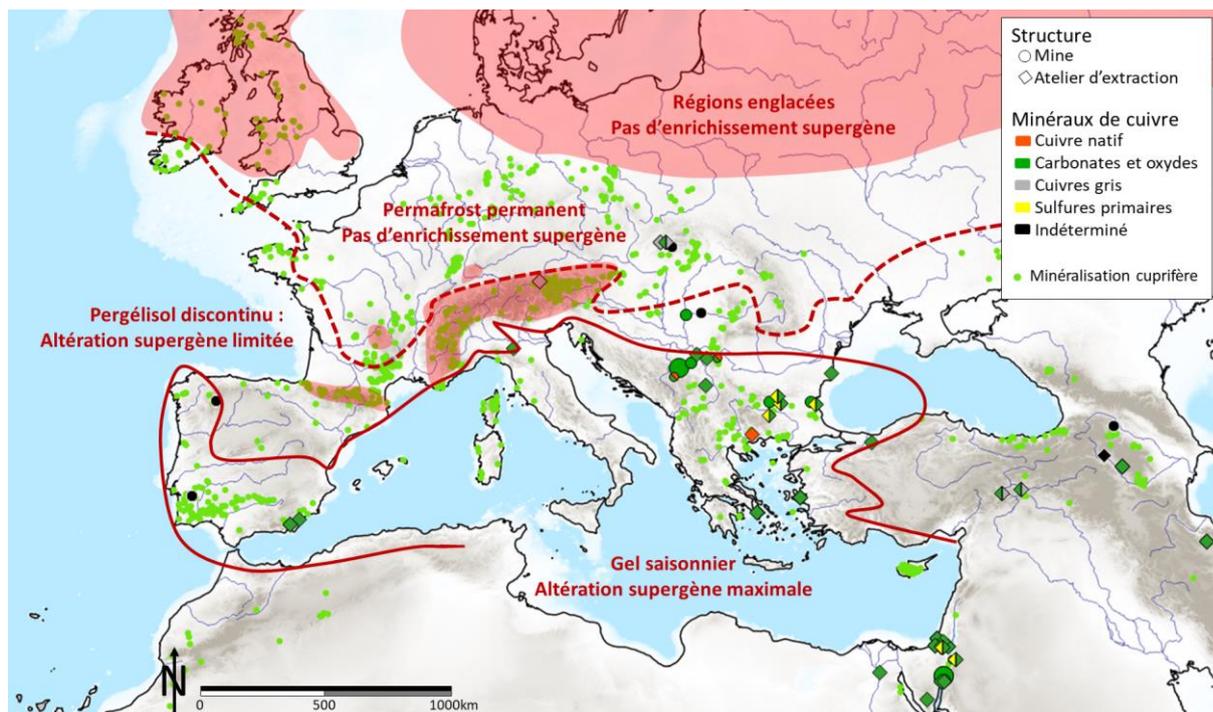


Figure 69 : Sites en lien avec l'extraction du cuivre pour la période 5000 - 3800 av. J.-C. et limites de la dernière glaciation quaternaire (Weichsélien) d'après Van Vliet-Lanoë, 1996 et Vandenberghe et al., 2014. La plupart des mines sont localisées dans les zones correspondant au permafrost quaternaire. Les gisements riches en carbonates de cuivre sont très rares dans les zones ayant connu des glaciations récentes mais les zones d'enrichissement sont relativement fréquentes en dessus des limites du permafrost quaternaire (soit hors de la zone de pergélisol permanent et donc dans des secteurs au climat plus chaud, atlantique et méditerranéen).

Plus précisément, les sulfures primaires de cuivre peuvent être fondus parce qu'ils sont associés à des carbonates de cuivre (on parle de fusion par *cosmelting*, cf II/1.c). Nous proposons donc que la présence de carbonates de cuivre puisse contraindre l'extension de la métallurgie du cuivre en Europe (Tomczyk, 2017).

IV/2.b Entre 3800 et 3000 av. J.-C., de nombreuses régions exploitées pour le cuivre

Durant la période 5000-3800 comme durant la période 3800-3000 av. J.-C., les mines sont encore majoritairement localisées dans le pourtour méditerranéen (Figure 70). De premières mines d'étain apparaissent en Mésopotamie (De Ryck *et al.*, 2005) et en Anatolie (Muhly, 1993) en lien avec l'émergence locale du bronze.

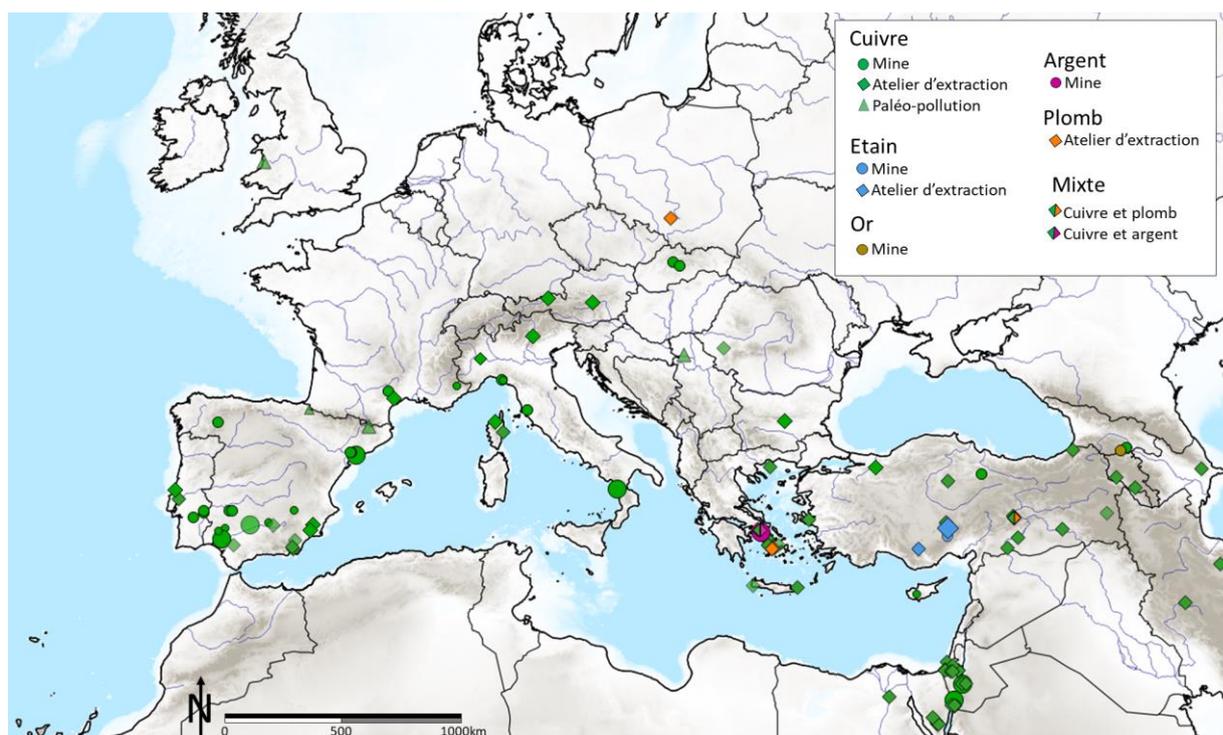


Figure 70 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 3800-3000 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

De nombreuses mines des Balkans ont cessé leur activité mais cette période peut être considérée comme une période d'accroissement pour les autres régions précédemment exploitées. Le nombre de sites liés à l'exploitation du cuivre augmente très fortement dans le sud de péninsule Ibérique, dans le Levant et dans le pourtour égéen où l'augmentation du nombre de mines concerne également les exploitations de plomb et d'argent.

De nouvelles zones de production de cuivre apparaissent dans l'ouest de la Méditerranée. Des mines sont désormais connues en Catalogne et dans le sud du Massif central et des exploitations pourraient avoir lieu dans les Pyrénées. Des mines de cuivre sont également présentes en Calabre mais le devenir du cuivre produit pose question (Dolfini, 2013 p. 134 ; Caricola *et al.*, 2020). En effet, la malachite extraite de la Grotta de la Monaca et de la Grotta del Tesauo pourrait être utilisée comme pigment et non pas être destinée à être fondue¹¹¹ (Breglia *et al.*, 2016).

Des ateliers ont été découverts dans les Alpes et en Corse.

Une augmentation de la quantité de sulfures de cuivre extraits ?

La répartition des mines de cuivre semble encore contrainte par la présence d'altération supergène mais la quantité de sulfures de cuivre extraits et fondus semble augmenter (Figure 71).

¹¹¹ L'hypothèse de l'exploitation de pigments pourrait être privilégiée du fait de l'absence de structures pyrométallurgiques aux abords de ces deux mines.

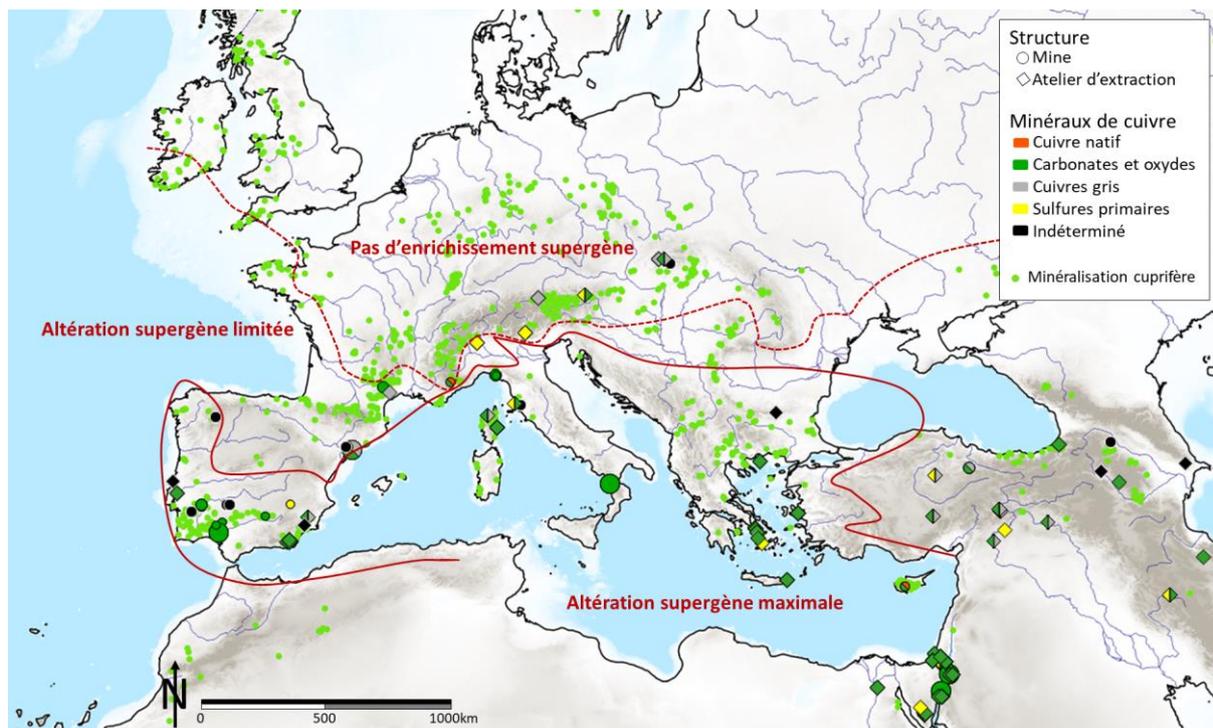


Figure 71 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 3800 et 3000 av. J.-C. et tracé simplifié des limites des secteurs présentant potentiellement des zones d'enrichissement supergène.

De nombreux sites exploitent des minéraux de cuivre riches en arsenic et/ou antimoine en Catalogne, dans le sud du Massif central, en Corse, mais aussi dans les Alpes orientales et les Carpates. Les métallurgies employées pour fondre ces minerais consistaient encore en une réduction seule, permettant de conserver l'arsenic présent dans les minerais fondus dans le métal produit.

La fusion réductrice de ces minerais permet d'obtenir un alliage naturel de cuivre-arsenic, et ce, sans perte d'arsenic (Lechtman, 1996 ; McKerrell et Tylecote, 1972). La présence de mines et d'ateliers exploitant les minéraux de cuivre riches en arsenic est cohérente l'apparition de ce type d'alliage en Europe.

Des chalcopyrites seraient également extraites et fondues dans de nombreuses régions de l'est de la Méditerranée mais aussi dans les Alpes. La fonte de sulfures de cuivre y est confirmée dans deux ateliers (Orti Bottagone et San Carlo en Toscane) par l'étude des scories découvertes sur site (Artioli *et al.*, 2007 ; Dolfini, 2014 p. 484). Ces découvertes peuvent paraître anecdotiques mais elles questionnent notre connaissance de la diffusion de la métallurgie du cuivre. Les hypothèses anciennes de l'existence de plusieurs axes de diffusions entre les IV^e et III^e millénaires av. J.-C. (Furon, 1966) peuvent être remises en cause tant les minerais fondus varient d'une région à l'autre et, plus encore, du fait de l'apparition de ce type de métallurgie de manière visiblement déconnectée d'échanges avec le Proche-Orient où de rares sites de fonte de minerais primaires ont également été découverts.

IV/2.c Entre 3000 et 2500 av. J.-C., des minéraux de cuivre riche en As et/ou Sb exploités

Si le nombre d'exploitations de (plomb)argent est stable et que la localisation des zones minières ne varie pas, le nombre de sites recensés pour le cuivre est en forte augmentation entre 3000 et 2500 av. J.-C (Figure 72).

Le nombre d'exploitations double dans les Alpes¹¹² et dans le monde égéen¹¹³ et est multiplié par 3,75 en péninsule Ibérique et dans le Massif central par rapport à la période 3800-3000 av. J.-C.¹¹⁴. Péninsule Ibérique et Massif central présentent alors 63,9 % des sites connus en activité en Europe de l'Ouest. Cette croissance rapide pourrait s'expliquer par la richesse en cuivre gris de ces gisements.

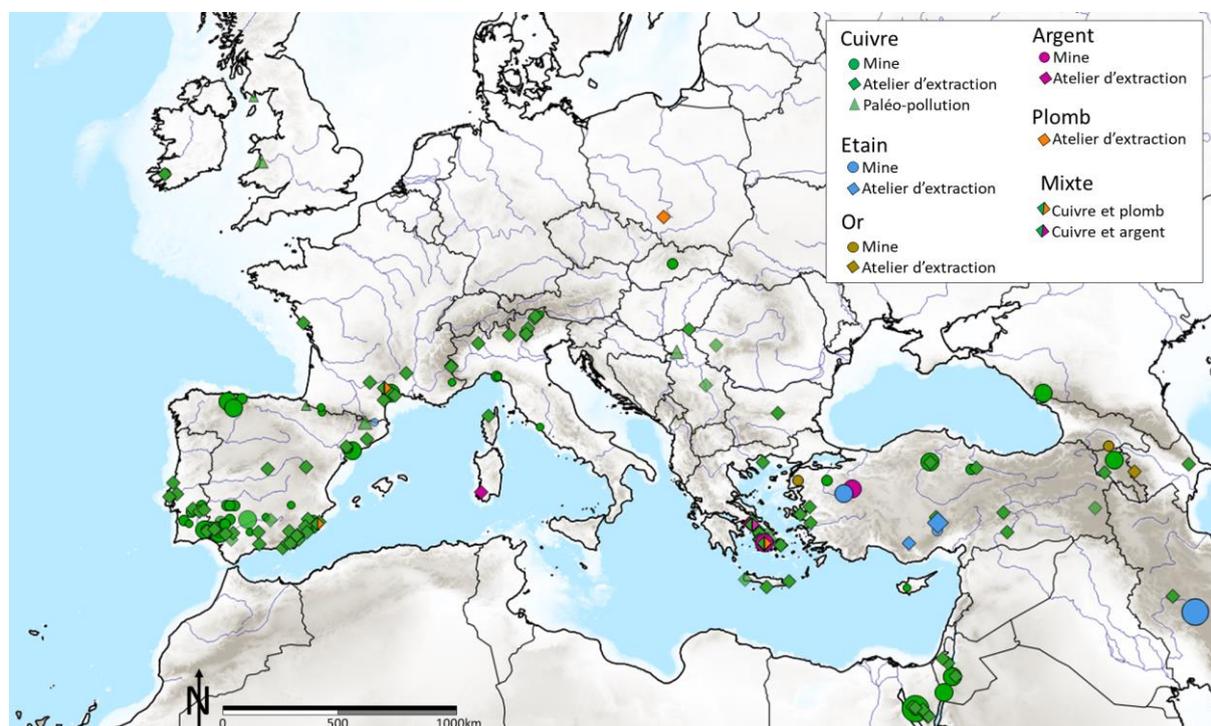


Figure 72 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 3000-2500 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

Des zones d'enrichissement supergène à arsenic exploitées en péninsule Ibérique

Les mines du sud-est de la péninsule Ibérique figurent parmi les mieux documentées. Elles sont principalement implantées dans une grande région très richement minéralisée en cuivre, argent, et plomb : la *Pyrite Belt*¹¹⁵ ibérique qui constitue l'une des grandes provinces métallogéniques d'Europe. Elle s'étend sur plus de 250 km de long et 40 km de large, selon un axe est-ouest le long de la côte sud de la péninsule Ibérique (Figure 73).

Les minéralisations sont de type Sulfures Massifs Volcanogènes (SMV¹¹⁶), et peuvent prendre la forme de grandes lentilles massives (partie supérieure du SMV) ou de *stockwork*¹¹⁷ (partie inférieure du SMV) (Leistel *et al.*, 1997 ; Carvalho *et al.*, 1997). L'altération supergène est très intense dans ce secteur ; les portions enrichies dépassent parfois les 70 m d'épaisseur dans cette région (García Palomero *et al.*, 1986) et contiennent de l'arsenic et de l'antimoine¹¹⁸ (García Palomero *et al.*, 1986 ; Viallefond, 1994). C'est cette zone supérieure des gisements, enrichie en cuivre (cf I/2.a), que les

¹¹² Le nombre de mines découvertes est fixe (3) mais le nombre d'ateliers passe de 4 à 10.

¹¹³ Le nombre d'ateliers passe de 9 à 17 (aucune mine de cuivre n'est recensée) pour les deux périodes considérées.

¹¹⁴ Entre 3800 et 3000 av. J.-C. le nombre de mines était de 16, il est de 38 entre 3000 et 2500 av. J.-C. ; le nombre d'ateliers passe de 3 à 33.

¹¹⁵ Le terme *Pyrite Belt* désigne une région géologique riche en gisements de pyrite, un sulfure de fer commun, souvent associé à d'autres minerais métalliques de cuivre, de plomb mais aussi de zinc.

¹¹⁶ Elles correspondent à d'anciens volcans (fumeurs noirs) sous-marins.

¹¹⁷ Soit des enchevêtrements denses et complexes de petits filons entrecroisés.

¹¹⁸ Ainsi que du Pb, Bi, Sn, Hg, Ag et Au. Ces zones d'altération ont par la suite été exploitées massivement pour l'argent et l'or encore exploité de nos jours.

mineurs chalcolithiques exploitent. Les zones d'altération supergène présentent un intérêt pour l'exploitation du cuivre : elles sont plus riches en cuivre, en arsenic et en antimoine que les gisements primaires sous-jacents, non altérés.

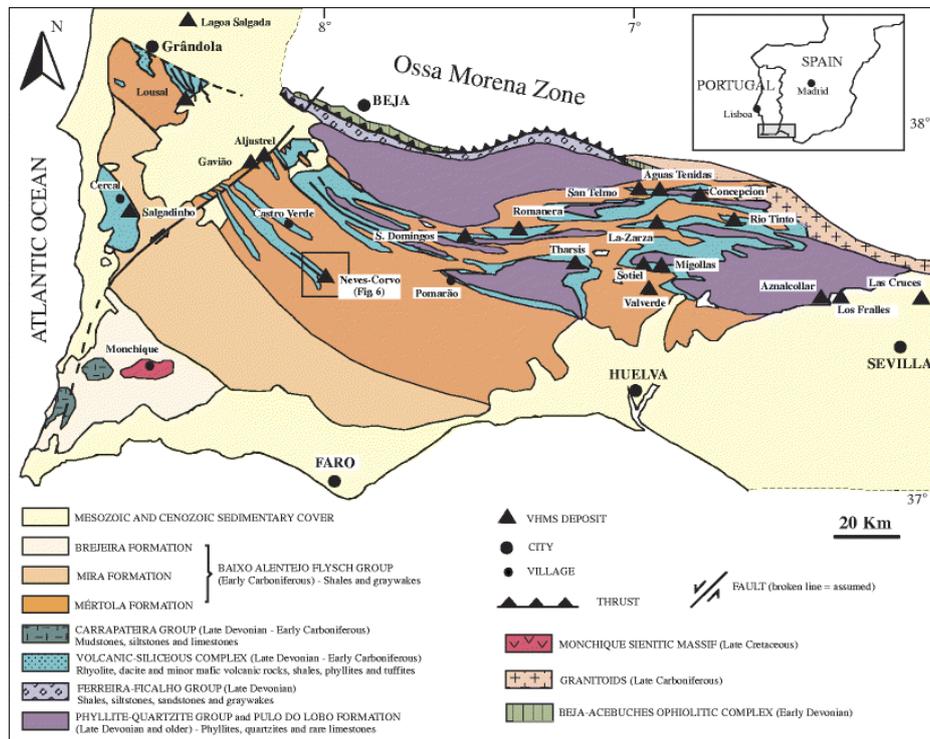


Figure 73 : Carte géologique de la Pyrite Belt et de ses gisements de VMS. Source : Huston et al., 2011.

Une exploitation sélective des gisements de cuivre en fonction de leur richesse et de leur contenu en arsenic/antimoine a également été démontrée par Escanilla Artigas et Delgado-Raack (2014) un peu plus loin, dans le sud-est de la péninsule Ibérique (présentant elle aussi de nombreuses exploitations) où les filons exploités contenaient entre 2 % et 7 % d'arsenic¹¹⁹.

Du cuivre riche en antimoine extrait dans le Massif central

Dans le Massif central, les travaux conduits par Paul Ambert et son équipe (Carozza et Ambert, 1995 ; Ambert, 1999 ; Rovira et Ambert, 2002) dans le district minier de Cabrières (Hérault) ont mis en évidence un ensemble d'activités minières et de métallurgie extractive. Le district est riche en cuivres gris souvent altérés avec des concentrations moyennes de 3,93 % de cuivre et de 2,40 % d'antimoine (Rapport Infoterre de 1997 sur la Concession de Cabrières). Les minerais extraits à Cabrières auraient permis la production d'un cuivre contenant entre 1,5 et 4 % d'antimoine et 2 à 4 % d'argent (Carozza et Mille, 2007).

Il est supposé que les mineurs ont d'abord exploité la mince portion supergène disponible (et donc des carbonates de cuivre, très riches en antimoine) (Ambert, 1999) mais que, cette portion de faible épaisseur n'aurait alimenté la production que durant une très courte période. Le minerai a ensuite été majoritairement exploité dans des roches résistantes via des puits et des galeries souterraines ouvertes

¹¹⁹ Ces résultats pourraient être discutés : en effet, il s'agit de restes non exploités et épargnés par les mineurs et donc de minerais qu'ils ont peut-être jugés de moins bonne qualité. Néanmoins, la démarche est intéressante et semble présenter un résultat clair.

par abattage par le feu (Castaing *et al.*, 2005). L'examen des galeries fait apparaître un réseau complexe, traduisant un mode d'exploitation raisonné et cohérent, étroitement lié au tracé des minéralisations en tétraédrite (Ambert, 1999).

Les mines découvertes dans le district de Fayet (à d'environ 60 km des mines de Cabrières) sont encore en cours d'étude mais nos premières observations semblent indiquer que de très nombreux sites présentant des marteaux en pierre sont liés à l'exploitation des minéralisations de cuivre riches en antimoine (des tétraédrites partiellement altérées semblent également avoir été exploitées).

Des productions néanmoins variées

Entre 3000 et 2500 av. J.-C. le nombre de sites liés à l'extraction du cuivre double en Europe occidentale. Cet accroissement est accompagné d'une diversification du type de minerais de cuivre exploités.

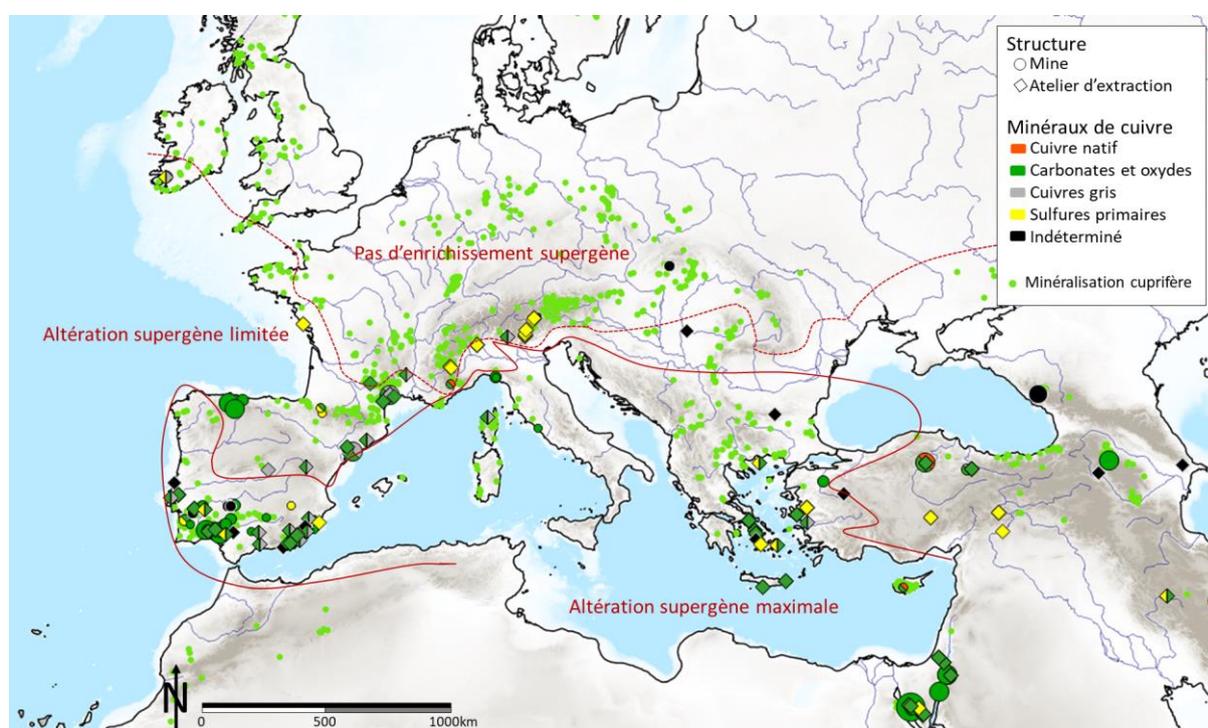


Figure 74 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 3000 et 2500 av. J.-C. et tracé simplifié des limites des secteurs présentant potentiellement des zones d'enrichissement supergène.

Des gisements de cuivre sont exploités au nord de la zone d'altération supergène maximale (Figure 74). La majorité du cuivre serait issu de carbonates de cuivre mêlés à des altérations de cuivres gris ou de la fonte de carbonates de cuivre mêlés à des cuivres gris peu altérés.

De plus rares sulfures primaires sont également exploités seuls, notamment dans les Alpes. Le nombre de sites exploitant ce type de minéraux est en forte augmentation : il a été multiplié par trois. Des minerais très différents sont donc exploités dans les grandes régions productrices de cuivre. Ce fait est très marqué en péninsule Ibérique et en Égée où des carbonates de cuivre riches en arsenic/antimoine sont fondus à seulement quelques centaines de kilomètres de sulfures primaires.

Des spécificités régionales semblent se dessiner : dans les Alpes la majorité des sites concernent l'extraction et la fonte de chalcopyrites¹²⁰ alors que dans le Massif central et en péninsule Ibérique l'extraction de carbonates de cuivre riches en arsenic/antimoine est dominante.

IV/2.d Entre 2500 et 2000 av. J.-C., une persistance des districts miniers

L'augmentation rapide du nombre de mines et d'ateliers d'extraction du cuivre précédemment reconnue ne se poursuit pas entre 2500 et 2000 av. J.-C. Au contraire, le nombre de sites diminue très légèrement en Europe de l'Ouest. Spatialement, les régions productrices de cuivre restent les mêmes que celles identifiées précédemment, mais les îles Britanniques et la façade littorale du Massif armoricain deviennent également productrices de cuivre.

Les régions précédemment productrices de plomb-argent voient, pour la plupart, la taille de leurs exploitations augmenter sensiblement ; en revanche, les mines de cuivre restent de faible dimension.

La principale nouveauté est l'apparition rapide de nombreuses exploitations d'étain dans des régions distantes : le nord de l'Irlande, les Comouailles, le sud du Massif central, les monts Métallifères et probablement la Toscane (mais la datation de cette exploitation est imprécise). La date de l'apparition d'exploitations d'étain semble coïncider avec l'entrée de nombreuses régions dans l'âge du Bronze (dès 2500/2300 av. J.-C.¹²¹). Pour autant, au tout début du II^e millénaire, les artefacts en bronze sont encore très rares (Merkl, 2010) en comparaison des artefacts en alliages de cuivre-arsenic/antimoine. Il n'est donc pas surprenant que des exploitations de cuivres gris se poursuivent¹²².

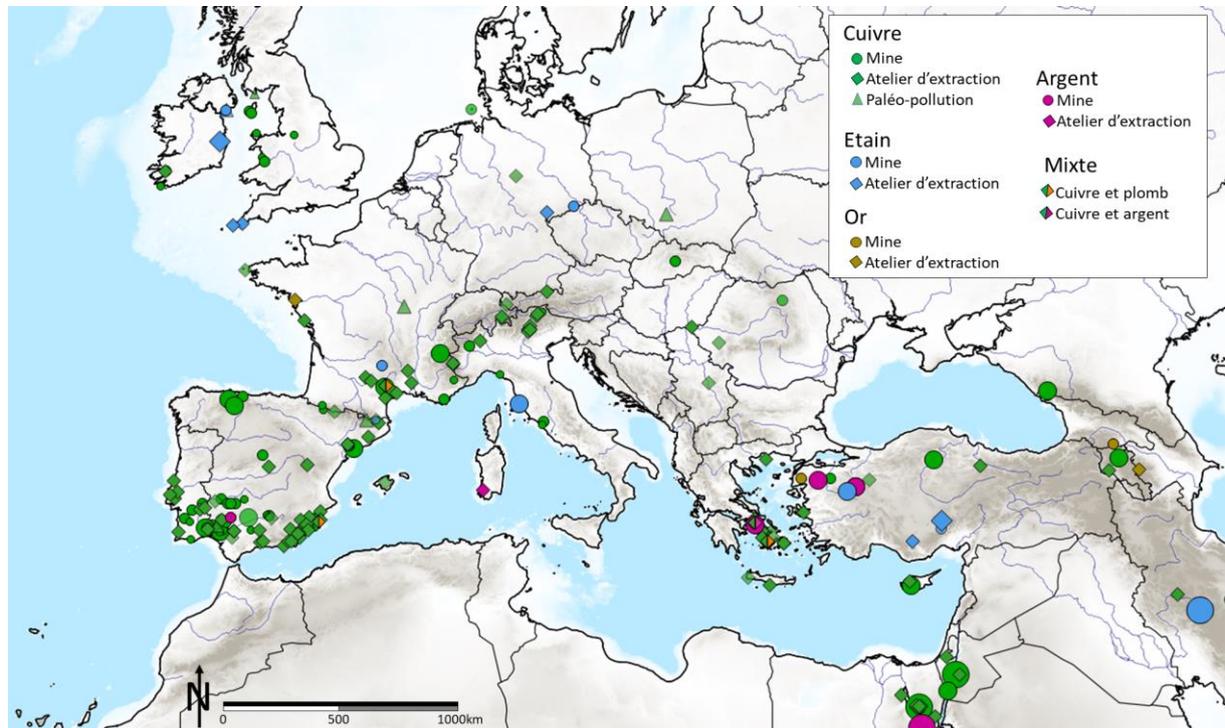


Figure 75 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 2500-2000 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

¹²⁰ Le site de Saint-Véran dans les Alpes occidentales diffère des autres sites alpins du fait que de la bornite y est extraite et non de la chalcopyrite (Carozza *et al.*, 2008 ; Bourgarit *et al.*, 2010).

¹²¹ Notamment les îles Britanniques et la péninsule Ibérique.

¹²² Et ce, parfois dans des régions où de l'étain commence à être produit (par exemple dans le Massif central).

Ainsi, la division de la période 3000-2000 av. J.-C. en deux sous-périodes (3000-2500 et 2500-2000 av. J.-C.) n'a que peu d'intérêt si ce n'est d'étudier l'apparition de l'étain : les mines de cuivre et d'argent sont localisées dans les mêmes régions et des minéraux similaires y sont exploités.

L'adoption progressive des sulfures de cuivre

Des sulfures de cuivre primaires ont été fondus en Europe dès le IV^e millénaire mais c'est au cours de la longue période ayant débuté vers 3000 et se finissant vers 2000 av. J.-C. que la maîtrise du couplage grillage-réduction des sulfures fait lentement son apparition.

Ce changement de pratiques pyrométallurgiques a deux conséquences. La première, et la plus évidente, est que le fait de pouvoir fondre des sulfures de cuivre primaires non accompagnés de carbonates de cuivre a conduit à l'ouverture de nouveaux complexes miniers. Des exploitations de cuivre pouvaient désormais prendre place dans des secteurs où ces minéraux sont majoritairement présents dans les minéralisations (soit dans les régions englacées durant le Quaternaire) et de nombreuses mines apparaissent progressivement entre 3000 et 2000 av. J.-C. au nord de la zone d'altération supergène maximale¹²³ notamment dans les Alpes et en Grande-Bretagne (Figure 76).

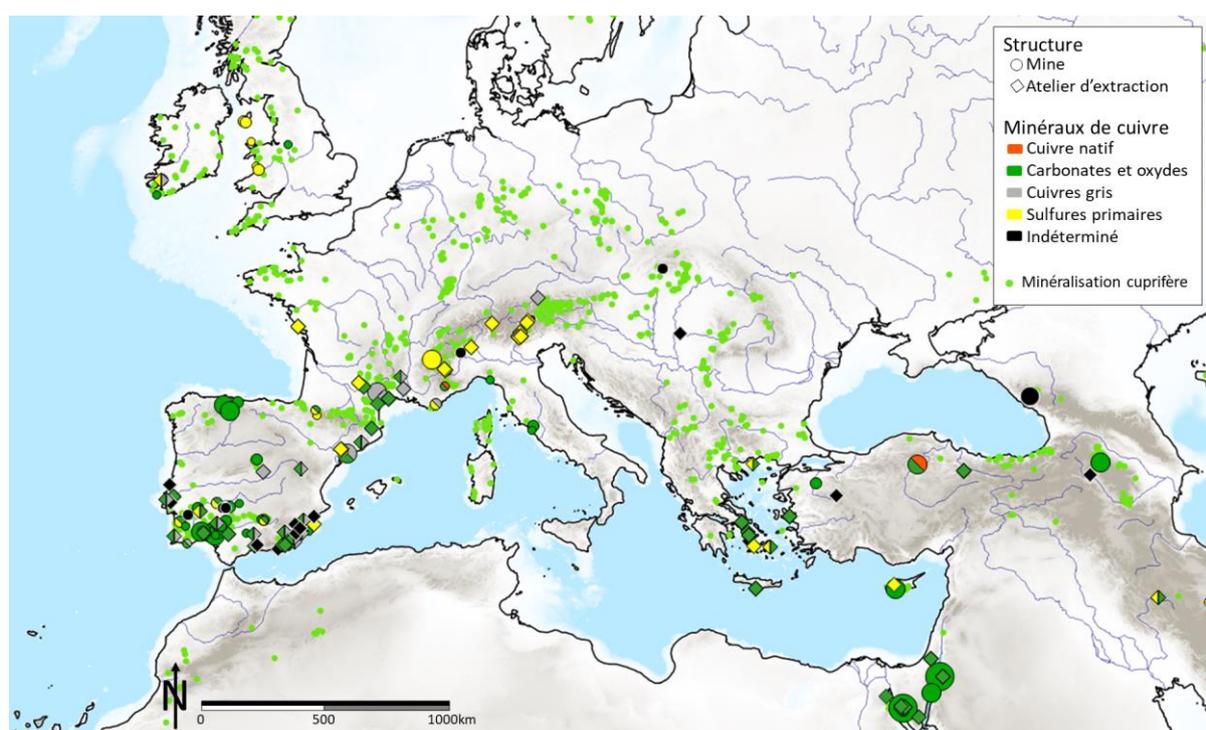


Figure 76 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 2500 et 2000 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières.

La deuxième conséquence de ce changement de pratiques pyrométallurgiques concerne le cuivre produit : le fait de griller puis de réduire des chalcopyrites produit un cuivre pauvre en impuretés alors que la fusion réductrice à ~ 700 °C de cuivres gris conduisant à la production de cuivres riches en arsenic et/ou antimoine.

¹²³ Dans certains sites au nord de cette limite, les carbonates de cuivre sont néanmoins abondants. Par exemple, des carbonates de cuivre sont exploités dans les mines d'El Aramo, El Milagro et de la Profunda en Asturies, car il s'agit de cavités karstiques. Dans ces gisements (situés au-dessus de la limite maximale de la zone d'altération supergène), les carbonates de cuivre sont abondants.

IV/2.e Des changements entre 2000 et 1600 av. J.-C.

Extraction et fonte de sulfures de cuivre primaires

Le changement marqué du type de minerai de cuivre exploité que nous venons d'identifier se produit au début de l'âge du Bronze : des sulfures de cuivre primaires sont exploités et fondus dans la majorité des régions (Figure 77) et en particulier dans les Alpes (orientales et occidentales) et dans le Pays de Galles. À l'inverse, de nombreuses mines ferment dans les régions qui exploitaient auparavant des gisements de cuivre gris : l'exploitation du cuivre décline en péninsule Ibérique, dans le sud du Massif central et dans les Cyclades. Ce déclin pourrait être attribué à un changement dans les alliages utilisés : le cuivre arsénié n'est plus dominant mais est progressivement remplacé par le bronze à l'étain, désormais largement répandu en Europe de l'Ouest.

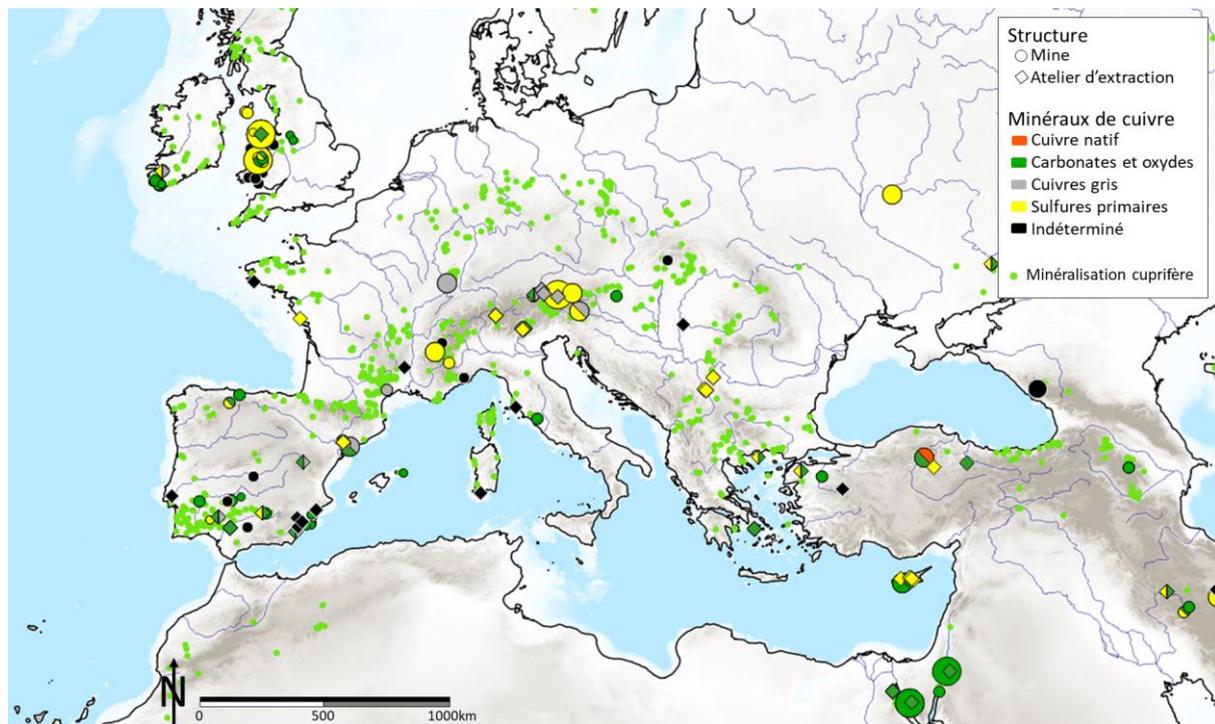


Figure 77 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 2000 et 1600 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières.

Un second élément marquant une rupture avec la période précédente concerne la dimension des mines de cuivre : elle est faible dans le sud-ouest de l'Europe dont l'exploitation décline mais elle est forte dans les Alpes et les îles Britanniques.

Une période d'exploitation intense du cuivre ?

Nous avons noté qu'entre 5000 et 3800 av. J.-C., les toutes premières mines chalcolithiques des Balkans et d'Asturies (district d'El Aramo, El Milagro et La Profunda)¹²⁴ étaient de taille très importante cf VI/2.a), et que les très grandes mines étaient rares entre 3800 et 2000 av. J.-C.¹²⁵. Tout cela change et la taille des mines et des ateliers nouvellement apparus dans les îles Britanniques et les Alpes est très importante.

¹²⁴ Dans les Asturies l'exploitation des mines s'étend sur presque tout le III^e millénaire av. J.-C.

¹²⁵ Quelques exceptions existent dans le Massif central à Bouche Payrol (Bouco-Payrol) et Cabrières et dans la *Pyrite Belt* ibérique à La Sierrecilla (Huelva).

Cette activité minière intense n'est pas toutefois pérenne dans les îles Britanniques et elle est de très courte durée en Irlande où elle ne dure que jusque qu'environ 1500 av. J.-C. (O'Brien, 2015 et 2022 ; Figure 78).

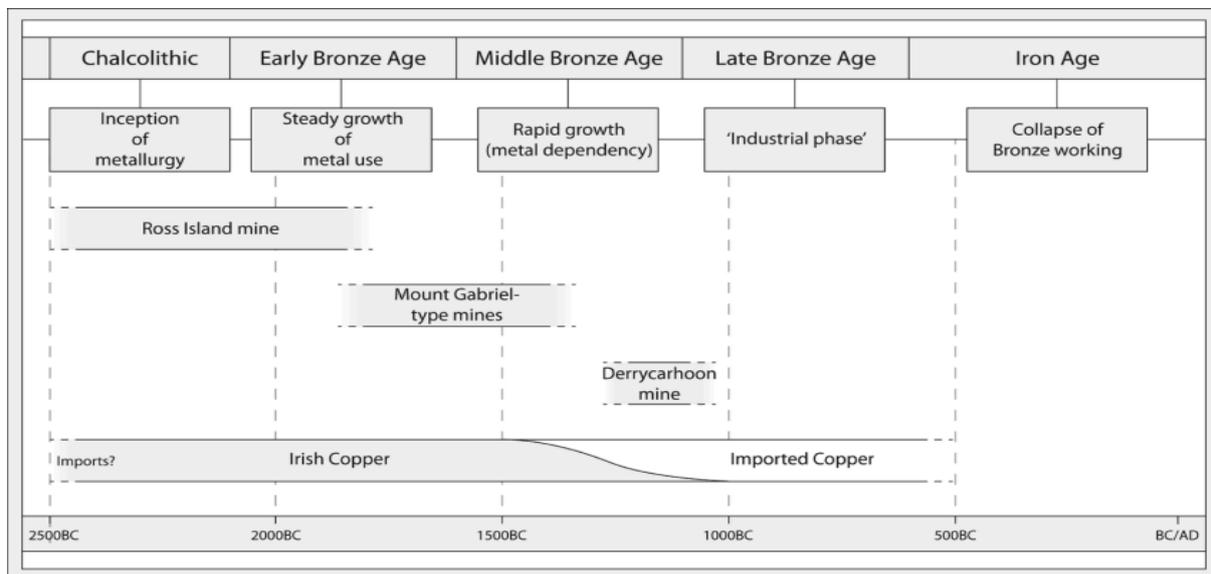


Figure 78 : Évolution de la production supposée de cuivre en Irlande : l'augmentation de la production de cuivre serait suivie d'une baisse brutale. Source : O'Brien, 2015, p. 299

De même, on assiste à une série d'ouverture de mines et à une exploitation du cuivre à échelle « industrielle » dans de grands districts, alignés selon un axe est-ouest (Tropper et Vavtar, 2009) dans le Tyrol autrichien (Höppner *et al.*, 2005 ; Figure 79). Les filons sont exploités au sein de grandes exploitations souterraines ouvertes par abattage par le feu à l'exception du secteur de Mitterberg où l'encaissant est schisteux (Oeggel *et al.*, 2008).

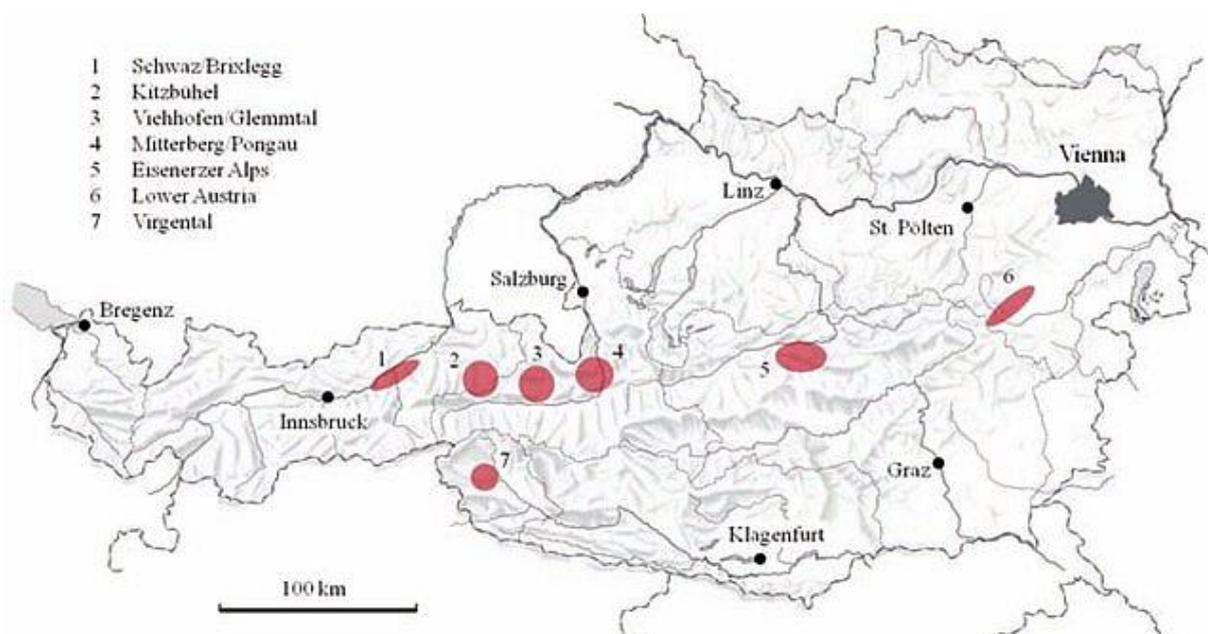


Figure 79 : Carte de localisation des districts miniers cuprifères du Chalcolithique et de l'âge du Bronze dans l'est des Alpes. Source : Lutz et Pernicka, 2013. Les gisements les plus à l'ouest sont riches en cuivres gris alors que ceux à l'est contiennent majoritairement des chalcopyrites (Koch Waldner, 2019).

Le début de l'âge du Bronze d'Europe de l'Ouest est donc une période de transition où de petites exploitations côtoient des exploitations de taille remarquable. Nous ne sommes pas certains de connaître toutes les grandes zones de production mais il est clair que les petites zones de production sont encore plus complexes à retrouver. C'est notamment le cas des sites de production de cuivre des côtes armoricaines.

Des mines de cuivre dans le Massif armoricain ?

La question de la production de cuivre breton est problématique à bien des égards. En France, chacune des grandes régions cuprifères a montré une exploitation des filons de cuivre au Chalcolithique et/ou à l'âge du Bronze : des mines ont été trouvées dans le Massif central (Cabrières, Bouco Payrol), dans les Alpes (Saint-Véran, les Grandes Rousses, Roua), dans les Pyrénées (vallée d'Aspe) et plus récemment dans les Vosges (Grande Montagne). En Bretagne, les gisements n'ont, pour le moment, pas révélé d'exploitations protohistoriques mais la présence de nombreux ateliers de travail du cuivre au début du second millénaire av. J.-C. semble indiquer leur exploitation (Pailler *et al.*, 2016). Parmi les ateliers découverts (Figure 80), deux concernent le façonnage d'outils (ZAC de Kerisac (3) et Bel Air (5)) alors que cinq autres semblent directement en lien avec l'extraction du cuivre :

- Du minerai et des lingotières trouvés à Beg ar Loued (2) ;
- Un percuteur ayant concassé du minerai de cuivre et un creuset scoriacé à Kersulec (1) ;
- Des lingotières à Rondossec (6), à la ZAC du Pont-aux-Chèvre (7) et à Crec'h Choupo (4).

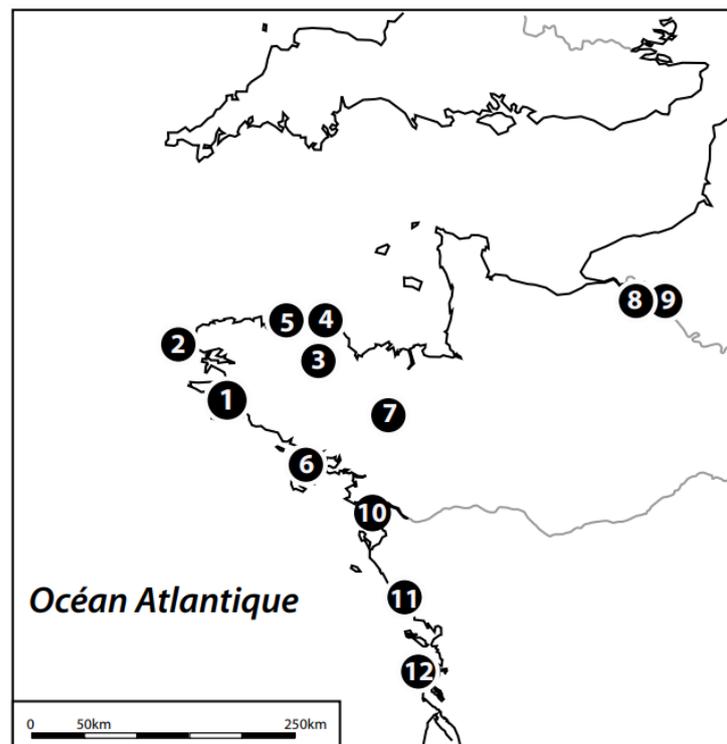


Figure 80 : Carte des indices de métallurgie pour la fin du III^e millénaire et le début du II^e millénaire du Grand-Ouest de la France. Les points numérotés de 8 à 12 correspondent à des sites de métallurgie d'élaboration et non de métallurgie extractive. Source : T. Nicolas, Inrap dans Pailler *et al.*, 2016.

À ces découvertes s'ajoutent celles de fragments de vase-four sur l'île d'Oléron à l'Ecuisnières (Gandois *et al.*, 2021) et de scories au lieu-dit la République à Talmont-Saint-Hilaire en Vendée

(Poissonnier et Rousseau, 2013 ; Rousseau *et al.*, 2020). Ces sites sont localisés en bordure littorale et certains ont été en partie détruits par l'érosion comme c'est le cas au lieu-dit la République¹²⁶.

Les nombreux indices d'une métallurgie d'extraction indiquent une possible exploitation locale du cuivre au tout début de l'âge du Bronze. Cette hypothèse n'est pas nouvelle et avait d'ailleurs déjà été formulée, notamment par Jacques Briard (1995) qui supposait de possibles exploitations locales de faibles envergures du fait de l'absence de grands gisements dans la région. Un transport de minerais sur de grandes distances est peu probable mais il n'est pas impossible de l'envisager¹²⁷.

De nombreux sites de métallurgie d'extraction en bordure littorale ?

Le fait que de nombreuses mines de cuivre et plus encore, de nombreux ateliers de métallurgie extractive soient localisés en façade littorale pourrait s'expliquer par les facilités d'export offertes par le transport maritime (et fluvial).

Le transport maritime serait légèrement plus rapide que le transport terrestre : la vitesse des navires phéniciens a été estimée entre 20 à 30 miles nautiques soit 37 à 55 km par jour (Cintas, 1949) et la réplique de l'épave découverte à Hjørtsspring (400-300 av. J.-C.) a permis de naviguer à une vitesse de 4 nœuds (7,4 km/h) et parcourir jusqu'à 100 km par jour avec une cargaison de plus de 700 kg (Crumlin-Pedersen et Trakadas, 2003). Les bateaux seraient donc plus rapides que le transport terrestre, les distances journalières terrestres ne dépassant théoriquement pas 20 km (Brodie, 2008).

	Charge typique (en kg)	Vitesse moyenne (en km/h)	Distance journalière parcourue (en km)
Portage humain	30	4 à 5	15-20
Âne chargé	50-80	4 à 5	20
Deux bœufs avec traîneau	250	2 à 3	15
Un âne avec chariot	300	3 à 4	20
Deux bœufs avec chariot	900	3 à 4	20

Tableau 11 : Performance des moyens de transports terrestres à la Protohistoire. Traduit de Brodie, 2008.

De plus, les moyens de transport terrestres ne peuvent transporter que quelques centaines de kilogrammes de matériaux alors que les navires peuvent en transporter plusieurs milliers¹²⁸. Implanter des ateliers avec un accès proche à la mer devait donc constituer un avantage dans les échanges à grande distance. Ces échanges par voies maritimes pourraient être hérités des implantations déjà en place au milieu du III^e millénaire av. J.-C.¹²⁹ mais cette information demande d'être vérifiée.

¹²⁶ Le trait de côte était localisé plus loin qu'il ne l'est aujourd'hui. L'érosion de sites est forte sur la côte atlantique, comme dans l'ensemble de l'Europe y compris dans le nord de la Méditerranée (Fontana *et al.*, 2017).

¹²⁷ Retenir cette hypothèse signifierait toutefois que le Massif armoricain serait alors une région où des minerais extérieurs seraient fondus et non une région productrice alors même qu'elle disposait localement de gisements.

¹²⁸ Des navires phéniciens échoués au large de la région d'Alicante contenaient 1 à 3 tonnes de chargement (Negueruela *et al.*, 2004 ; Polzer, 2014). L'épave de l'Uluburun (~1300 av. J.-C.) en contenait 10 tonnes (Hauptmann *et al.*, 2002).

¹²⁹ La répartition des établissements le long des voies navigables européennes, indique que les circuits d'échange maritimes dateraient du Campaniforme (Prieto-Martinez, 2008) : des bateaux devaient permettre d'établir des liaisons interrégionales régulières en mer du Nord et au-delà (Cunliffe, 2008 ; Needham *et al.*, 2013). Des embarcations capables d'effectuer des voyages en mer sur de longues distances ont été découvertes au dans les îles britanniques (McGrail, 1993 ; Clark *et al.*, 2004 ; Needham *et al.*, 2013).

Un possible lien entre la fonte de sulfures primaires et la production de bronze ?

Le travail métallurgique des chalcopirites semble bien coïncider avec l'apparition du bronze dans les différentes zones étudiées (son apparition plus précoce dans le Pays de Galles peut être mise en parallèle d'une arrivée plus précoce des premiers bronzes dans cette région). L'apparition des premiers bronzes coïncide avec l'augmentation progressive des exploitations de sulfures simples : bien que plus complexe à extraire (car lié au fer), le cuivre issu de la chalcopirite est généralement pauvre en impuretés¹³⁰. Il pourrait donc constituer une ressource de choix pour la production de lingots de cuivre très purs pouvant être utilisés pour à la production de bronzes de qualité.

Peu de changement concernant l'exploitation de l'étain et de l'argent

Nous n'avons constaté que peu de changements concernant la production de cuivre (dimension des exploitations et types de minerais fondus) et le nombre de mines et d'ateliers dédiés à l'extraction de l'étain n'augmente que légèrement.

La localisation de ces sites est assez stable : l'ensemble des grandes régions stannifères continuent à être exploitées à l'exception des gisements irlandais dont l'exploitation pourrait avoir cessé. L'exploitation des gisements d'étain ibériques semble débiter. Il est cependant important de rappeler que la reconstitution de l'histoire minière et métallurgique l'étain s'appuie sur peu de données et reste donc fragile.

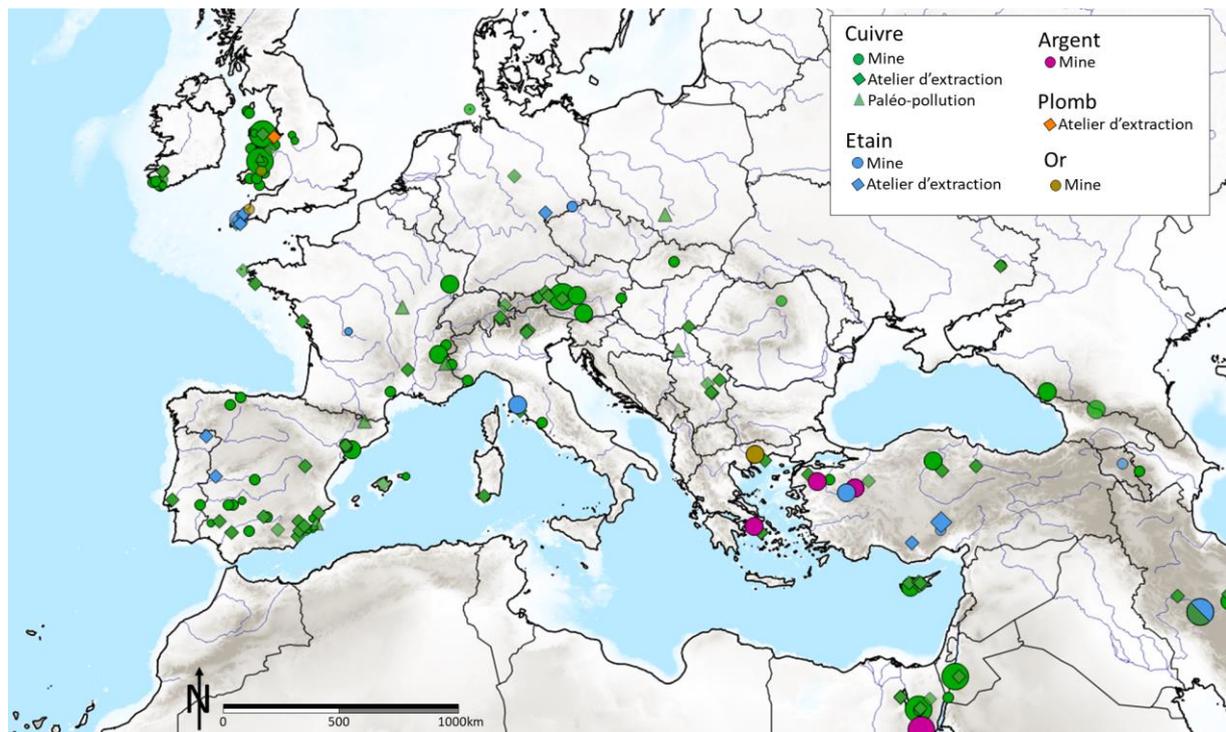


Figure 81 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 2000-1600 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

Les mines d'argent de plomb égéennes continuent leur exploitation, ce qui ne semble pas être le cas des rares exploitations de l'ouest méditerranéen.

¹³⁰ Ceci est une remarque d'ordre général : Chypre possède des gisements de chalcopirite de pureté variable (Fasnacht, 2002) ; des gisements des carbonates de cuivre peuvent être pauvres en impuretés.

IV/2.f Entre 1600 et 1300 av. J.-C., de grandes zones dédiées à l'exploitation d'un métal

La première des grandes différences entre cette période et la précédente est l'apparition d'exploitations d'étain dans le Massif armoricain ainsi que dans le nord-ouest des Balkans. L'étain était alors exploité dans l'ensemble des 5 grands domaines stannifères européens : des exploitations d'étain se sont développées quasiment partout où ce dernier est disponible. Ceci s'explique, à n'en pas douter par la forte demande en étain pour obtenir du bronze, alliage composant la majorité des objets alors produits en Europe.

L'augmentation du nombre de sites est particulièrement marquée dans les Cornouailles où le nombre d'exploitations connues passe de 2 mines (mal datées) à 4 ce qui témoignerait de l'importance de cette zone de production¹³¹.

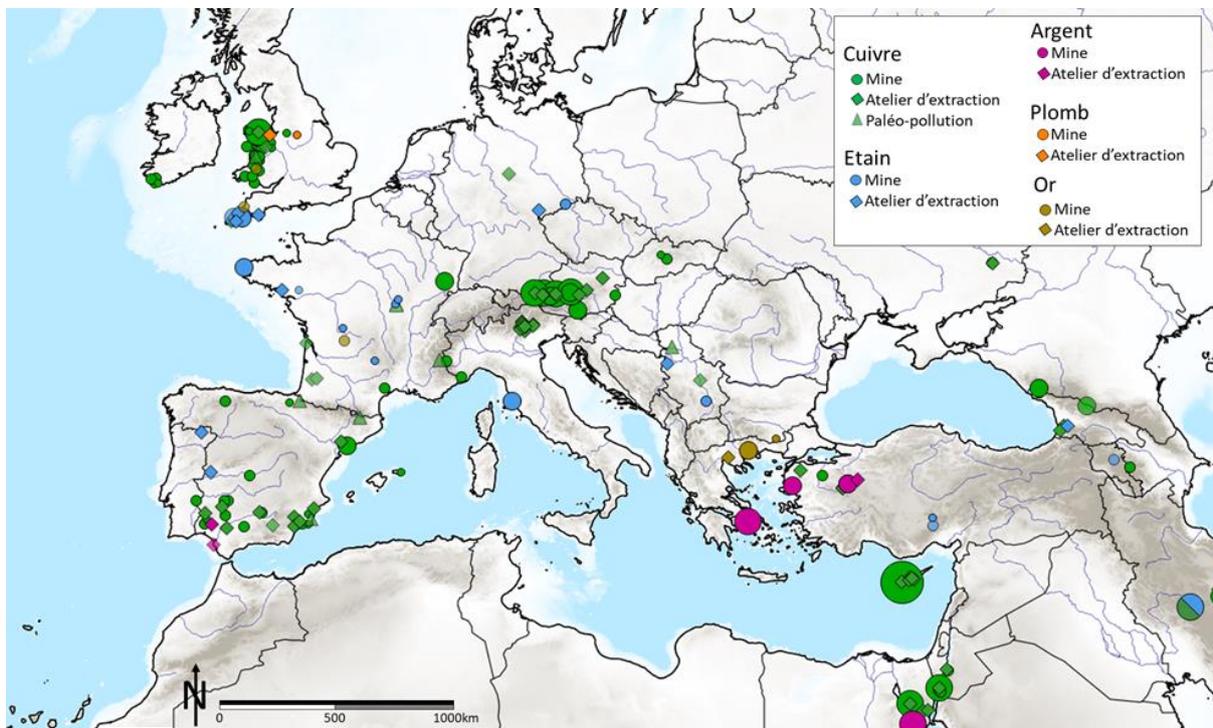


Figure 82 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 1600-1300 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

Concernant le cuivre, on observe des changements importants de localisation des zones productrices qui se traduisent par :

- L'émergence de deux grands pôles de production : les Alpes centrales et de l'est mais aussi Chypre (dans le cas de Chypre, les mines ont été détruites par la reprise minière et l'exploitation intense des gisements de cuivre est surtout supposée par la présence d'amoncellements de plusieurs tonnes de scories (Knapp, 2003 ; Ben-Yosef *et al.*, 2011 ; Kassianidou, 2013b)) ;
- La diminution du nombre et de la dimension des exploitations de cuivre en Irlande, au Pays de Galles, dans le Massif armoricain, dans l'ouest des Alpes, en péninsule Ibérique et en Égée.

¹³¹ Les recherches en archéologie minière ont été particulièrement intenses dans les Cornouailles et la concentration importante de sites pourrait traduire la forte activité de recherche dans cette région. De nombreux sites, à ce jour non découverts, pourraient également exister dans d'autres régions.

Une transition semble débiter et la diminution du nombre d'exploitations de cuivre serait concomitante avec une augmentation du nombre de mines d'autres métaux :

- Des exploitations d'argent dans le sud de la péninsule Ibérique ;
- Des exploitations d'argent et d'or dans le monde égéen ;
- Des exploitations d'étain (et possiblement d'or) dans le Massif armoricain et le Massif central ;
- Dans une moindre mesure, des exploitations de plomb au Pays de Galles.

Vers une organisation en grands pôles de production dédiés à un métal ?

Il est surprenant de constater qu'une région disposant de nombreuses ressources métalliques ne les exploite pas conjointement en particulier lorsqu'elle dispose des techniques permettant d'extraire le métal. Deux cas d'étude, l'un en Bretagne, l'autre dans le Massif central, illustrent notre propos.

Un cas particulièrement explicite est le site de Kersulec en Plonéour-Lanvern dans le Finistère où des galets à cupules servant à écraser du minerai ont été trouvés avec des creusets montrant un mélange de minerais de cuivre et de cassitérite (Pailler *et al.*, 2016). Les populations armoricaines étaient donc capables de réaliser au Bronze ancien (~1800 av. J.-C.), l'ensemble de la chaîne opératoire de la minéralurgie des minerais de cuivre et d'étain à la métallurgie extractive et d'élaboration. L'absence de découvertes de sites de réduction du cuivre après le Bronze ancien s'explique mal par l'absence de fouilles (la recherche archéologique est active dans cette région) et semble traduire un abandon des exploitations de cuivre.

Dans le Massif central l'exploitation intense du cuivre au Néolithique semble s'arrêter à l'âge du Bronze et, des prospections menées dans le cadre du PCR Mines et Métallurgie protohistoriques en Occitanie souligne que les minéralisations aux abords desquelles des maillets en pierre ont été découverts, contiennent encore beaucoup de cuivre. L'abandon des sites ne peut alors pas être lié à l'absence de minerais.

Dans ces deux cas, l'hypothèse d'un abandon des exploitations de cuivre au profit de l'exploitation de l'étain irait dans le sens des hypothèses émises par Earle *et al.* (2015) selon lesquelles les populations se spécialiseraient dans l'exploitation de la ressource de laquelle elles peuvent tirer le plus de profit. Ce scénario pourrait également expliquer le démarrage de l'exploitation de l'argent ibérique et égéen et l'abandon progressif des mines de cuivre local.

Si cette hypothèse de spécialisation demeure complexe à valider (et sera discutée par suite, cf V/5), il est en revanche certain que les échanges à longue distance impliquent des changements dans la localisation des mines. Comme déjà mentionné par O'Brien (2015) dans le cas de l'Angleterre et de l'Irlande, l'explosion de l'exploitation minière du Bronze ancien et la chute brutale des exploitations locales à la fin du Bronze moyen (aux alentours de 1400 av. J.-C.) seraient liées à l'émergence de routes d'échanges et aux contextes socio-politiques complexes qui en découleraient. L'apparition de nouvelles routes commerciales n'entraînerait pas nécessairement un déclin de la richesse de la région ; dans le cas du Massif armoricain, le nombre d'artefacts retrouvés en contexte non funéraire augmente fortement entre 1500 et 1350 av. J.-C. (Blitte, 2016) c'est-à-dire au moment de l'abandon probable de l'exploitation du cuivre pour celle de l'étain.

Outre l'hypothèse d'une spécialisation, dans le contexte d'une Europe désormais interconnectée, des phénomènes de concurrence pourraient conduire au fait que seules les mines présentant la meilleure productivité continueraient d'être exploitées. L'abandon des exploitations de cuivre au profit d'autres substances ne refléterait alors pas un choix délibéré mais traduirait une

adaptation forcée aux conditions d'exploitation et de commerce. Il n'est enfin pas à exclure que seules les mines pouvant fournir un cuivre respectant un certain seuil d'impuretés soient exploitées.

L'exploitation de sulfures de cuivre ?

Jusqu'à récemment, dans une approche évolutionniste de l'histoire (Tomczyk *et al.*, 2021a), le traitement des sulfures primaires de cuivre était attribué à l'âge du Bronze dont il était supposé constituer un marqueur. Bien que des chalcopyrites aient été fondues dès le IV^e millénaire en Toscane, le Bronze moyen se situe dans la continuité du changement amorcé au Bronze ancien au cours duquel on constate une augmentation du nombre de sites d'exploitation de sulfures de cuivre primaires au point que ces exploitations constituent près de la moitié des sites d'extraction découverts dès la seconde moitié du II^e millénaire av. J.-C. (Figure 83).

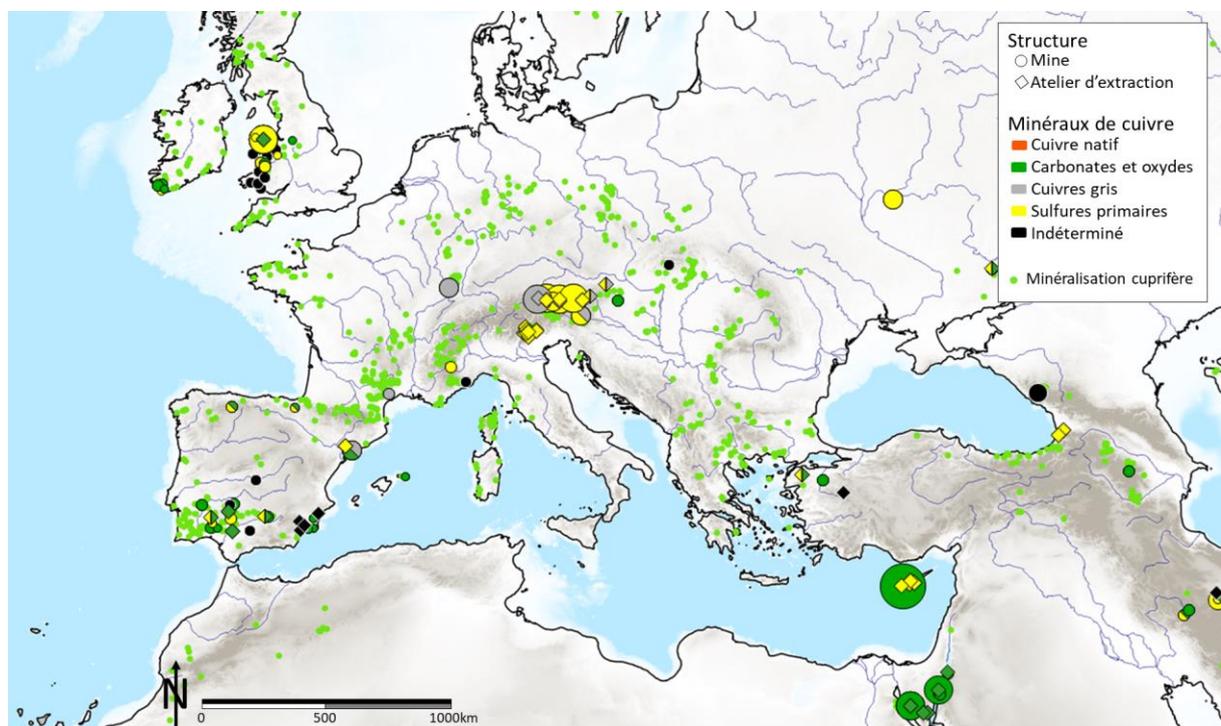


Figure 83 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 1600 et 1300 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent de que deux types de minerais y sont fondus.

Ces minéraux pourraient être ciblés pour leur « pureté » : ils ne sont associés à aucun autre constituant majeur que le fer qu'il est possible de séparer du cuivre par un processus métallurgique couplant grillage et réduction. Ce renouveau dans le choix des minerais exploités est particulièrement notable dans le Tyrol autrichien, où les cuivres gris (en anglais *fahlores*) sont à nouveau ciblés et extraits. L'hypothèse de la production d'un cuivre très pur y est validée par l'étude des artefacts tyroliens en bronze. Ces derniers sont clairement très pauvres en impuretés au Bronze moyen (Pernicka *et al.*, 2016 ; Figure 84).

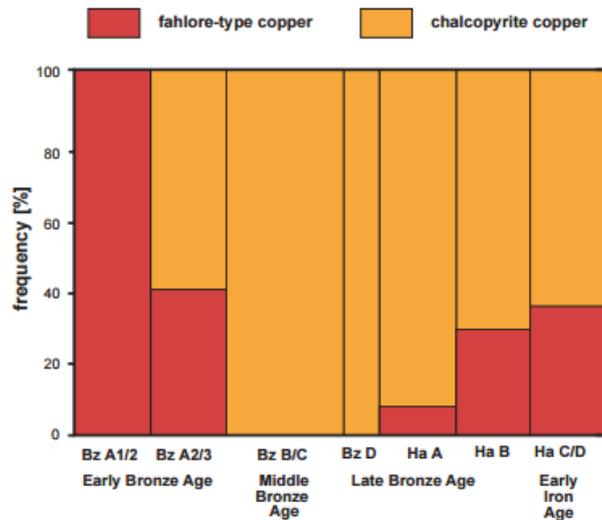


Figure 84 : Minerai exploité dans les Alpes Tyroliennes supposé par l'étude des signatures chimiques de 1200 artefacts locaux. Source : Pernicka et al., 2016.

IV/2.g Entre 1300 et 800 av. J.-C., des régions productrices de dimension variable

L'organisation de l'extraction des métaux en grandes zones de productions se poursuit durant la période 1300-800 av. J.-C. Les mines sont alors regroupées dans de grandes régions productrices et sont de taille variable (Figure 85).

Les petites structures d'exploitation du cuivre disparaissent progressivement dans le Tyrol et à Chypre (et probablement au Pays de Galles) au profit de mines de grande taille où une main-d'œuvre abondante devait certainement être mobilisée, potentiellement au détriment d'autres activités (Keswani, 1993 ; Hadjisavvas, 2002 ; Schibler et al., 2011 ; Tisdell et Svizzero, 2019). Pour autant, des mines de dimension plus restreintes sont abondantes en péninsule Ibérique, ce qui pourrait traduire des stratégies d'exploitation différentes.

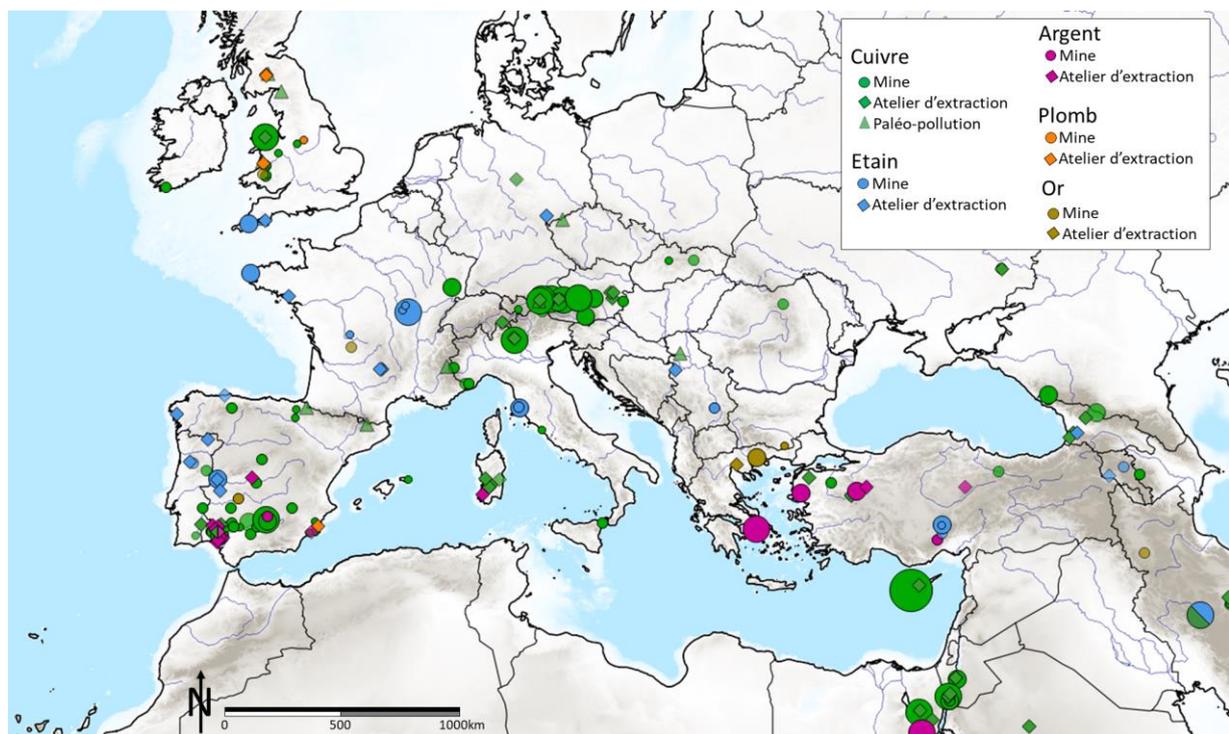


Figure 85 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 1300-800 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

Concernant l'étain, si un biais d'interprétation n'est pas à exclure du fait de la difficulté à localiser les sites, il semble que la production des mines des Cornouailles décline (le nombre de sites y est divisé par deux¹³²) alors que le nombre de sites de production croît rapidement dans la péninsule Ibérique (il n'y avait que deux ateliers connus entre 1600 et 1300 av. J.-C. et y a désormais 5 ateliers et une mine formellement identifiés¹³³).

La production d'argent/de plomb semble également se concentrer dans certaines régions minières : la Grande-Bretagne, le sud de la péninsule Ibérique et le monde égéen. Peu d'exploitations sont actuellement connues dans le sud de la Sardaigne (la forte reprise minière fait que les ateliers anciens y sont difficilement retrouvés) et l'Anatolie continentale. Le nombre d'exploitations connues est 5 fois plus important que pour la période précédente (il passe de 4 à 19). Cela pourrait en partie être lié au fait que le plomb est désormais un élément d'alliage assez commun des bronzes à étain.

Du plomb dans les bronzes mais en provenance d'où ?

Les alliages ternaires de cuivre, étain et plomb ne sont pas répandus dans toutes les régions (Figure 86).

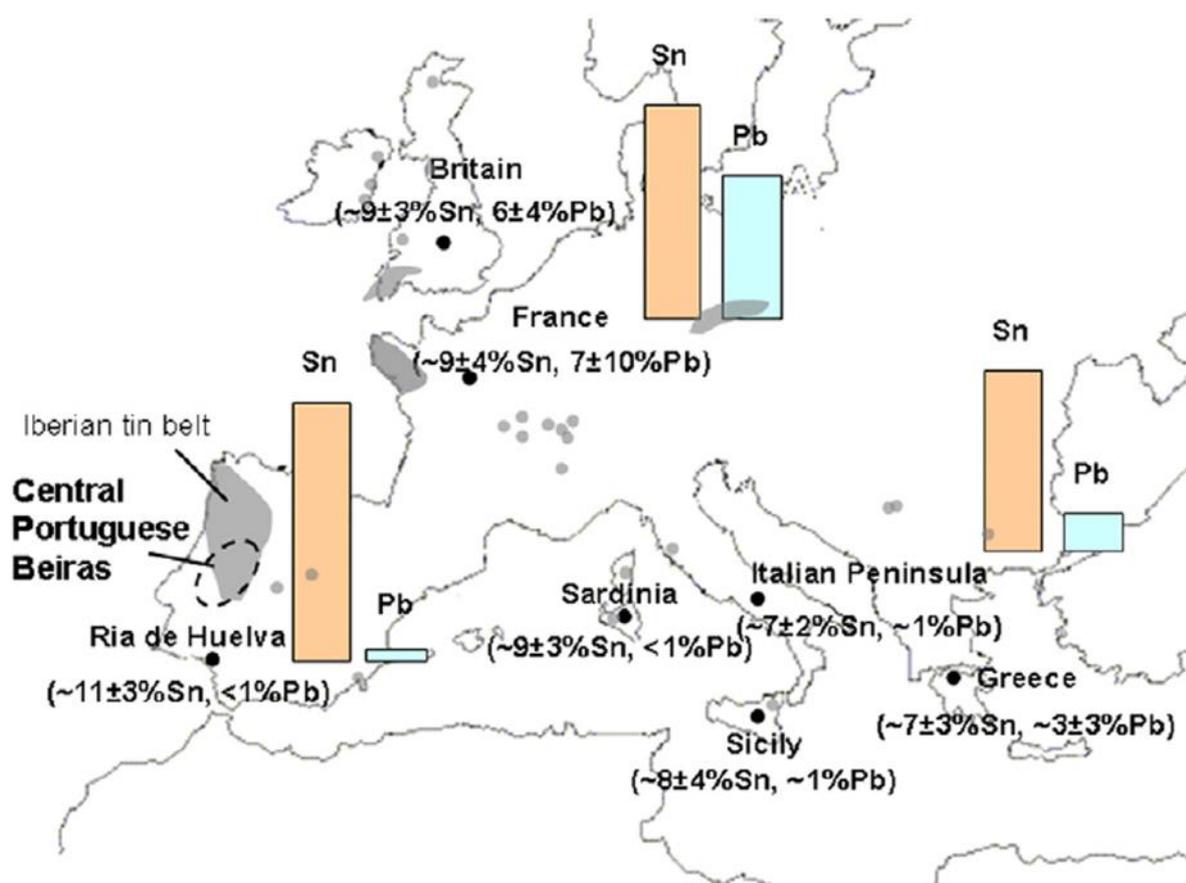


Figure 86 : Composition moyenne (tendance générale) en étain et plomb des bronzes de différentes régions d'Europe. Source : Figueiredo et al., 2010.

¹³² Deux mines et deux ateliers cessent leur activité et seuls une mine et un atelier (dont l'activité cessera rapidement) subsistent

¹³³ Les exploitations minières d'étain y sont cependant filoniennes et non alluvionnaires.

Des spécificités régionales, déduites de la quantité de plomb dans les artefacts en cuivre, ont été mises en avant par Figueiredo *et al.* (2010). Ces auteurs suggèrent que les régions où le plomb était abondant dans les bronzes correspondaient aux régions éloignées des sources d'étain. Cette hypothèse se confirme si l'on superpose la localisation des mines d'étain aux régions où les bronzes présentent de fortes teneurs en étain :

- Les fortes teneurs observées dans les bronzes atlantiques (environ 9-11 %) s'expliqueraient par la présence d'exploitations d'étain le long de la façade atlantique ;
- Les teneurs plus faibles en étain des bronzes grecs (~7 %) s'expliqueraient par leur distance importante aux mines d'étain situées dans le nord des Balkans.
- Les faibles teneurs en étain des bronzes découverts dans l'actuelle Italie (~9-7 %) sont difficiles à interpréter, car la datation des travaux anciens découverts dans la mine de Monte Rombolo n'est pas précisément établie puisque l'exploitation pourrait être postérieure à l'âge du Bronze. Dans le cas où ce gisement ne serait pas exploité, les teneurs de 7 % d'étain s'expliqueraient par un apport de plomb pour compenser la difficulté de se procurer de l'étain.

La présence de plomb dans les bronzes ne semble en revanche pas corrélée à la localisation des mines de plomb-argent : la très forte activité des mines grecques et (sud)ibériques n'explique pas les faibles teneurs en plomb des bronzes locaux¹³⁴.

Une autre hypothèse envisage que le plomb possédait une valeur plus faible que l'étain et que la présence de ce dernier en faible quantité permettrait de réduire le coût de production des bronzes. Cette hypothèse s'appuie essentiellement sur des textes égyptiens, assyriens et hittites qui mentionnent clairement que le plomb était moins cher que le cuivre, l'étain, le bronze, l'argent et l'or (Yahalom-Mack *et al.*, 2022). Toutefois, sa valeur variait selon les régions, allant d'un prix relativement bas en Anatolie (Erol, 2019) à un prix assez élevé¹³⁵ en Égypte (Rossi, 2009) et il n'est pas possible de déterminer sa valeur en Europe de l'Ouest.

L'hypothèse émise que le plomb remplacerait l'étain dans les régions qui en sont démunies est difficile à confirmer car du plomb est produit dans des régions proches des régions stannifères, en péninsule Ibérique et en Angleterre.

La présence de traditions métallurgiques différentes (visant à ajouter ou non du plomb dans les alliages cuivreux¹³⁶) semble beaucoup plus plausible que des difficultés éventuelles d'approvisionnement en étain pour expliquer les variations de teneurs en plomb et étain à échelle régionale. Ces traditions expliqueraient la présence de mines de plomb seul du Pays de Galles, permettant de fournir du plomb en quantité importante aux bronziers du complexe atlantique. En France, la présence de lingots-barres très riches en plomb dans des dépôts du Bronze final 2 du domaine atlantique semble indiquer l'importation de plomb. La présence en grande quantité de ces lingots riches en plomb, dans les ateliers (notamment de Fort-Harrouard, Eure-et-Loir ; Mohen *et al.*, 1989) confirmerait l'utilisation volontaire et la consommation importante de ce type d'alliage dans le complexe atlantique.

¹³⁴ Pourtant, du plomb issu de la métallurgie de l'argent est clairement échangé sous forme de lingot ou de litharge en péninsule Ibérique (Renzi *et al.*, 2009 ; Tejedor, 2018) comme en Égée (Gale et Stos-Gale, 1981 ; Rehren *et al.*, 1999 ; Gale *et al.*, 2009).

¹³⁵ Un quart du prix de l'or.

¹³⁶ Que cela soit pour économiser de l'étain possiblement plus onéreux que le plomb ou pour une autre raison d'ordre technique (par exemple pour jouer sur la coulabilité de l'alliage).

Des productions de cuivre variées ?

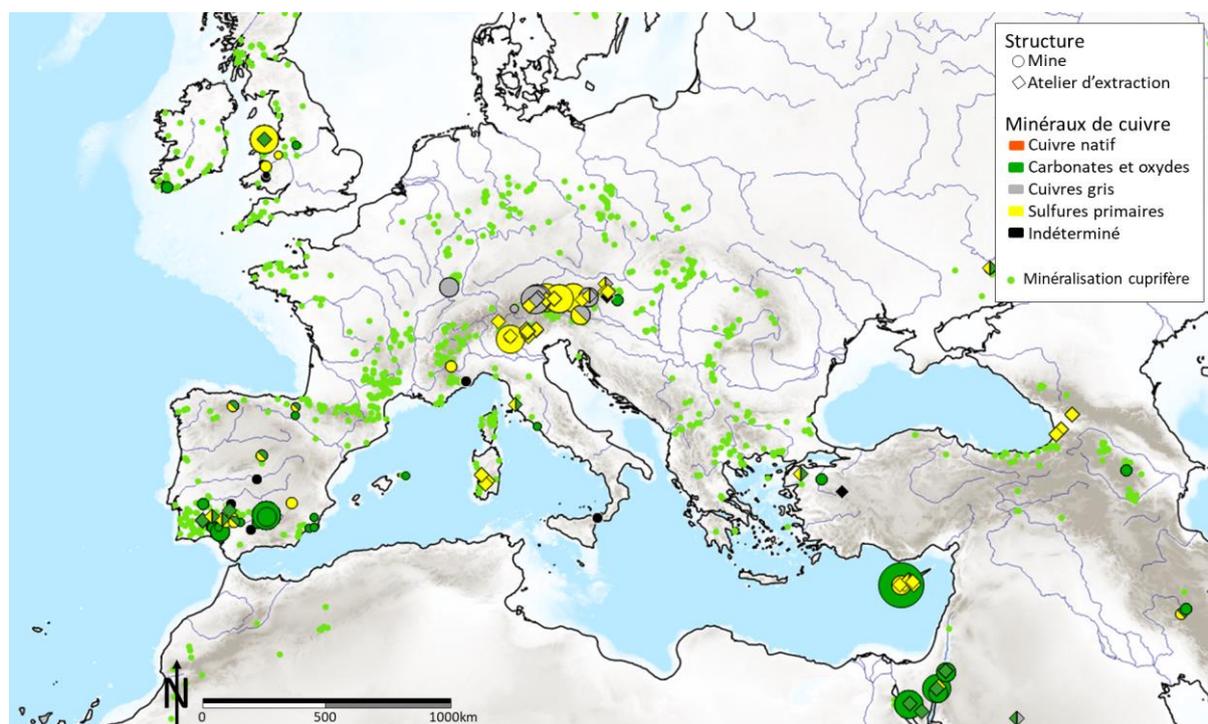


Figure 87 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 1300 et 800 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent de que deux types de minerais y sont fondus.

Comme évoqué précédemment, la production de cuivre semble divisée en grandes zones de production incluant la péninsule Ibérique, les îles Britanniques, les Alpes centrales et de l'est, Chypre et le Levant. Contrairement au Bronze moyen, où principalement des sulfures primaires (chalcopyrites) étaient ciblés, les minéraux de cuivre extraits seraient alors plus variés. Le cas du Tyrol illustre parfaitement ce fait : si des chalcopyrites continuent d'y être extraites, des cuivres gris le sont désormais également. Les cuivres gris peuvent servir à produire des cuivres arséniés que l'on retrouve dans de très belles pièces d'orfèvrerie à la toute fin de la période et plus encore, au début de l'âge du Fer (Giumli-Mair *et al.*, 2010) mais la découverte d'aires de grillages dans beaucoup de ces ateliers (Schibler *et al.*, 2011 ; Tropper *et al.*, 2017) indique une volonté de vaporiser l'arsenic sous forme de gaz et donc d'obtenir, un cuivre non allié à l'arsenic.

Les différences de minéraux de cuivre exploités dans les différentes régions minières (dans des sites souvent distants de moins de 100 km) nécessitent des savoir-faire différents. Cela soulève la question de la sélection des minerais selon des critères complexes, ainsi que celle des différences potentielles dans les stratégies d'exploitation et donc dans la spécialisation des tâches. Ces aspects seront examinés plus en détail dans la discussion dédiée à ce chapitre (cf V/5). L'hypothèse d'une production de cuivres plus ou moins purs sera quant à elle abordée lors de la discussion finale.

IV/2.f Entre 800 et 400 av. J.-C., des zones de production héritées de la fin l'âge du Bronze

Sans qu'il soit encore possible d'en déterminer précisément la cause, il semble que les mines de cuivre des îles Britanniques cessent complètement leur activité à la fin de l'âge du Bronze (O'Brien, 2015 et 2022 ; Williams et Le Carlier de Veslud, 2019). Notre inventaire indique toutefois que des exploitations de plomb demeurent au Pays de Galles.

Mis à part le cas particulier du cuivre des îles Britanniques, la localisation des grandes zones minières n'évolue que peu entre la fin de l'âge du Bronze et le début de l'âge du Fer et ce, quel que soit le métal étudié. L'apparition de la métallurgie du fer au début de cette période ne modifierait donc pas la géographie des grandes zones de production.

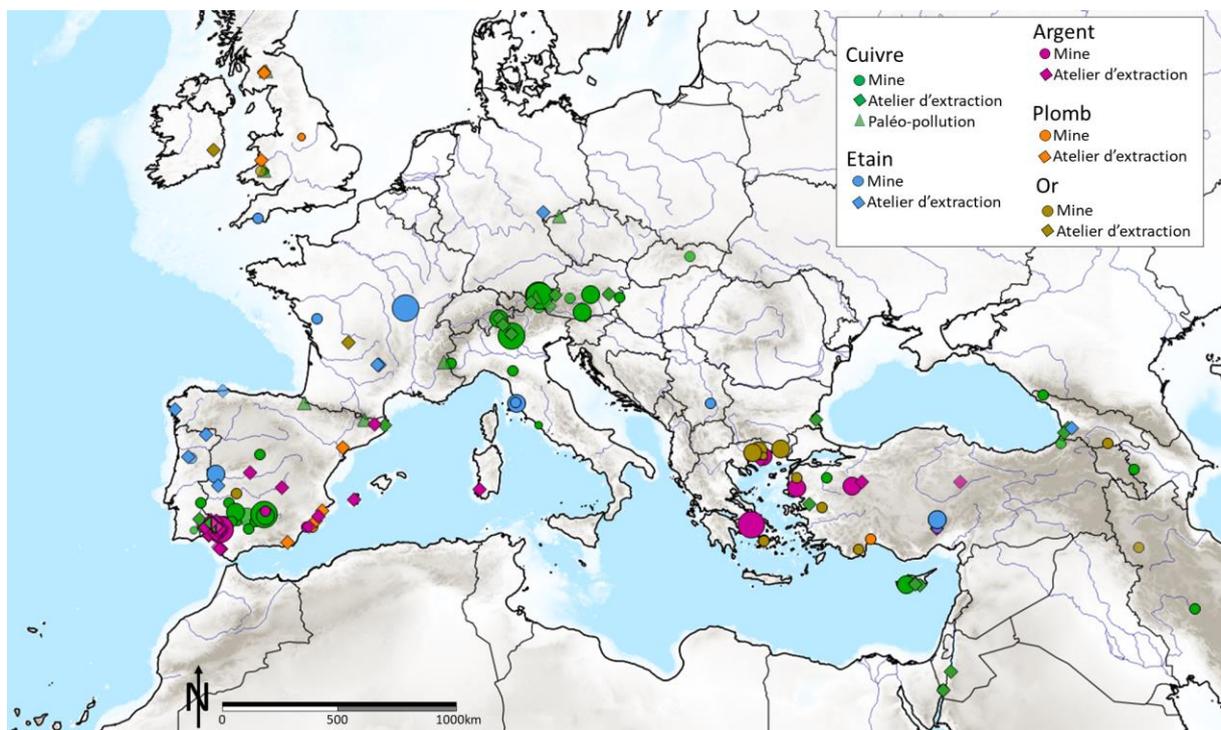


Figure 88 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 800-400 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.

Le nombre plus faible d'exploitations de cuivre, étain et plomb-argent (Figure 88) s'explique en grande partie par une documentation moins abondante mais surtout, à une attention plus faible portée à cette période dans le cadre de ce travail de thèse centré sur l'âge du Bronze.

Les types de minéraux de cuivre exploités sont très divers : carbonates de cuivre, sulfures de cuivre et cuivres gris sont exploités (Figure 89). Ils ne semblent pas avoir changé substantiellement depuis la fin de l'âge du Bronze d'Europe de l'Ouest.

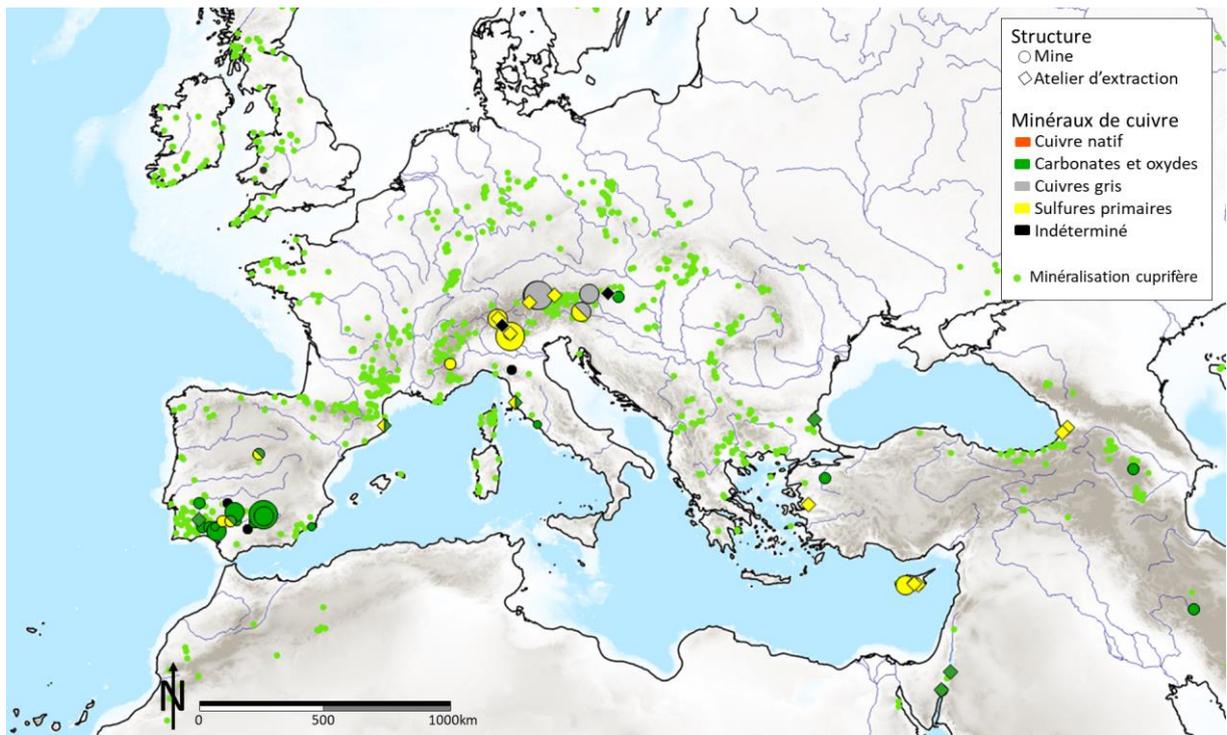


Figure 89 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 800 et 400 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent que deux types de minerais y sont fondus.

V/ Discussion de la première partie

Avant toute discussion, il convient de souligner à nouveau que, si le corpus sur lequel s'appuient ces discussions est conséquent, il ne représente certainement qu'une faible proportion des sites d'extractions ayant réellement été en exploitation. De plus, la précision des informations diffère selon les sites¹³⁷ et certains questionnements qui vont suivre ne peuvent reposer que sur les mieux documentés d'entre eux.

V/1 Questions émergeant de la localisation des exploitations

V.1.a Court résumé de l'étude des zones minières

Des périodes d'ouverture et de fermeture de mines

Il ressort qu'au cours de la période étudiée, soit entre 5000 et 800 av. J.-C., les zones de production de cuivre, de plomb(-argent) et d'étain changent progressivement : le nombre de mines et d'ateliers en activité n'est pas constant, leur localisation varie et, dans le cas du cuivre, les minéraux exploités et fondus ne sont pas les mêmes dans toutes les régions.

Six grandes phases de dynamiques minières peuvent être distinguées alternant des périodes de création de mines et de fermeture d'exploitations (Tableau 12). La rupture la plus marquée est toutefois celle ayant lieu vers 1600 av. J.-C.

Période	Durée	Commentaire
5000-3800 av. J.-C.	1 200 ans	Métallurgie précoce dans les Balkans, en péninsule Ibérique et en Égée (et potentiellement dans les Alpes)
3800-3000 av. J.-C.	800 ans	Accroissement rapide du nombre de mines dans le pourtour méditerranéen
3000-2000 av. J.-C.	1 000 ans	Mines présentes dans de très nombreuses régions, grande variabilité des types de minerais exploités
2000-1600 av. J.-C.	400 ans	Stabilisation du nombre de mines de cuivre, apparition des premières mines d'étain
1600-1300 av. J.-C.	300 ans	Début d'organisation en grandes zones minières, extraction majoritaire de chalcopyrites
1300-800 av. J.-C.	500 ans	Organisation en grandes zones minières

Tableau 12 : Découpage chronologique basé sur l'étude des zones minières précédemment menée.

Entre 3800 et 1600 av. J.-C., soit à la fin du Néolithique et au début du Bronze ancien d'Europe occidentale, le cuivre est exploité dans de nombreuses régions, et ce même lorsque ce dernier est présent dans des gisements de très faible extension spatiale et probablement de faible teneur. Plusieurs exemples, dont celui de la Bretagne et de l'île de Majorque, illustrent ce propos. Tout d'abord, dans le Massif armoricain, la présence de nombreuses aires de métallurgie laisse supposer une possible exploitation locale du cuivre au tout début de l'âge du Bronze¹³⁸. Un autre exemple concerne l'île de Majorque dans

¹³⁷ Difficulté de datation, difficulté d'estimer les volumes, difficulté de définir précisément le minerai extrait...

¹³⁸ Cette hypothèse n'est pas nouvelle et avait d'ailleurs déjà été formulée, notamment par Jacques Briard (1995) qui supposait de possibles exploitations locales de faible envergure du fait de l'absence de grands gisements dans la région (les exploitations bretonnes du début du II^e millénaire av. J.-C. correspondraient donc à de faibles productions).

les Baléares (Ramis *et al.*, 2005). Les scories découvertes dans les ateliers de l'île confirment leur origine locale malgré la faible richesse cuprifère de l'île¹³⁹.

Cette configuration change et l'organisation des productions se structure progressivement en grandes zones de production à partir du Bronze moyen (~1600/1500 av. J.-C.) pour atteindre son paroxysme au Bronze final, soit lorsque le bronze est utilisé pour la confection des outils. Peu de sites d'extraction de faible envergure subsistent alors et, si les échanges à grande distance et l'amélioration du rendement de la métallurgie d'extraction peuvent expliquer ce phénomène, il est certain que de nombreux autres facteurs peuvent influencer sur l'emplacement des zones de production.

Une organisation en grandes zones de production à partir de 1600 av. J.-C.

Ces grandes zones de production ne sont parfois dédiées qu'à l'exploitation d'un seul métal quand d'autres concernent plusieurs métaux (Figure 90 Figure 85).

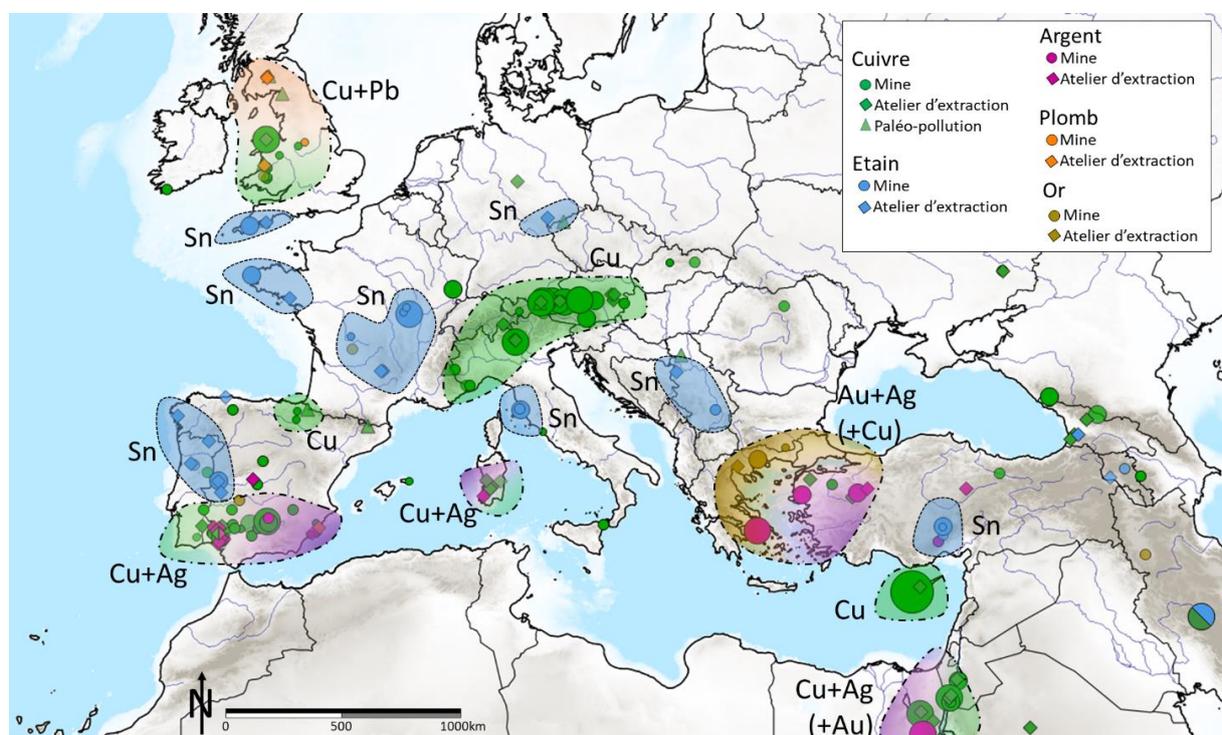


Figure 90 : Définition des grandes zones de production de cuivre, étain, plomb-argent, plomb et or pour la période 1300-800 av. J.-C.

Les régions extrayant du cuivre et d'autres ressources métalliques semblaient plus nombreuses que celles spécialisées uniquement dans le cuivre (Tableau 13). Seules les Pyrénées, les Alpes et Chypre se consacraient exclusivement à l'extraction du cuivre. En Angleterre, le cuivre était extrait avec le plomb. Il était extrait avec l'argent dans le sud de la péninsule Ibérique, en Sardaigne, en Égée, et au Levant.

L'étain était probablement le seul métal exploité en Cornouailles, dans le Massif armoricain, les monts Métallifères et les Balkans. Il était peut-être extrait en même temps que le cuivre en

¹³⁹ Les inclusions de cuprite (Cu_2O) et de sulfures de cuivre (digénite (Cu_9S_5) et bornite (Cu_5FeS_4)) dans les scories trouvées sur l'île sont compatibles avec la nature du minerai local (ils possèdent la même composition). De plus, le calcaire ajouté pour la fonte semble correspondre aux calcaires locaux (des échantillons de malachite avec des épontes de calcaire permettent de supposer que le minerai provient de minéralisations intercalées dans ces roches dans les montagnes du nord de l'île).

Toscane/Ligurie et dans l'ouest de la péninsule Ibérique (mais que la présence de mines de cuivre dans ces régions reste à confirmer). Des exploitations d'or se trouveraient à quelques kilomètres de celles d'étain dans le Massif central, et le plomb-argent était extrait à proximité des gisements d'étain dans les monts Taurus.

Métaux exploités	Zone(s) de production
Cuivre	Pyrénées, Alpes et Chypre
Cuivre et Plomb	Iles britanniques
Cuivre et Plomb-Argent	Sud de la péninsule Ibérique, Sardaigne, Levant
Étain	Cornouailles, Massif armoricain, monts Métallifères, Balkans
Étain (et Or ?)	Massif central
Étain (et Cuivre ?)	Ouest de la péninsule Ibérique, Ligurie
Étain (et Plomb-Argent ?)	Monts Taurus
Or et Plomb-Argent (et Cuivre ?)	Égée

Tableau 13 : Métaux exploités dans les grandes zones de production entre 1300 et 800 av. J.-C.

Cette répartition des mines en grandes zones de production ouvre de nombreuses hypothèses que nous allons confronter aux informations dont nous disposons. Ces hypothèses sont d'ordre technique mais aussi économique, et nous allons d'abord les énumérer.

V/1.b Le métal produit régionalement est-il celui à plus forte valeur d'échange ?

Bien que toutes les régions présentant des minéralisations en cuivre ne soient pas exploitées, l'étain a été extrait de toutes les régions possédant des gisements (Figure 91).

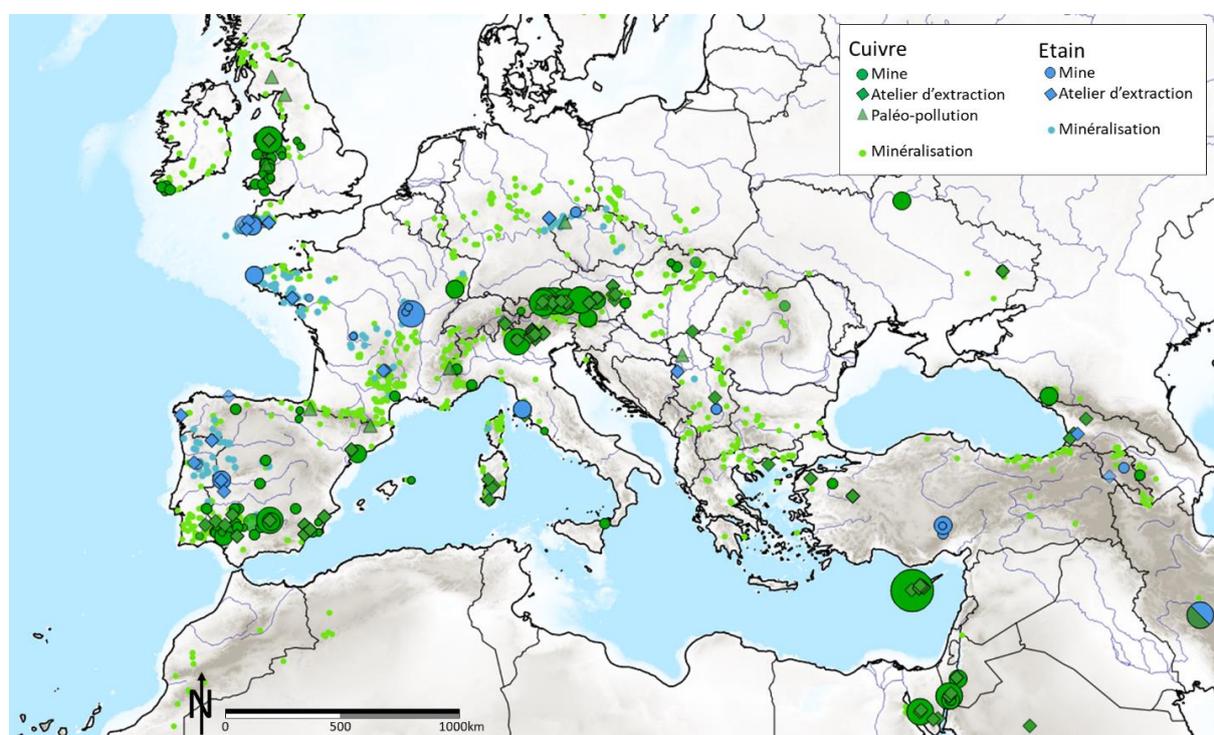


Figure 91 : Répartition des mines et ateliers d'extraction du cuivre et de l'étain recensés pour la période 1600-800 av. J.-C. et indices minéralisés en cuivre et en étain (données ProMine et USGS).

L'hypothèse émise par Earle *et al.* (2015) selon laquelle les productions d'une région se concentreraient sur les matériaux présentant les plus fortes valeurs d'échange semble se confirmer à l'échelle de l'Europe. En effet, les régions présentant des ressources en cuivre et en étain semblent plutôt se spécialiser dans l'extraction de l'étain à partir du Bronze moyen (~1600 av. J.-C.). Ceci est bien

visible en France où le cuivre du Massif central et du Massif armoricain était exploité au Chalcolithique puis a été abandonné au profit de l'exploitation de l'étain.

Cette hypothèse ne semble pas se confirmer à plus large échelle (Figure 92). Deux mines ont notamment été identifiées comme produisant simultanément du cuivre et de l'étain à Deh Hosein en Iran (Nezafati *et al.* 2007 et 2009) et à Mushiston au Tadjikistan (Berger *et al.*, 2022). De plus, si l'exploitation de l'étain demande à être confirmée en Arménie¹⁴⁰, il semble possible que de l'étain y soit exploité en plus du cuivre.

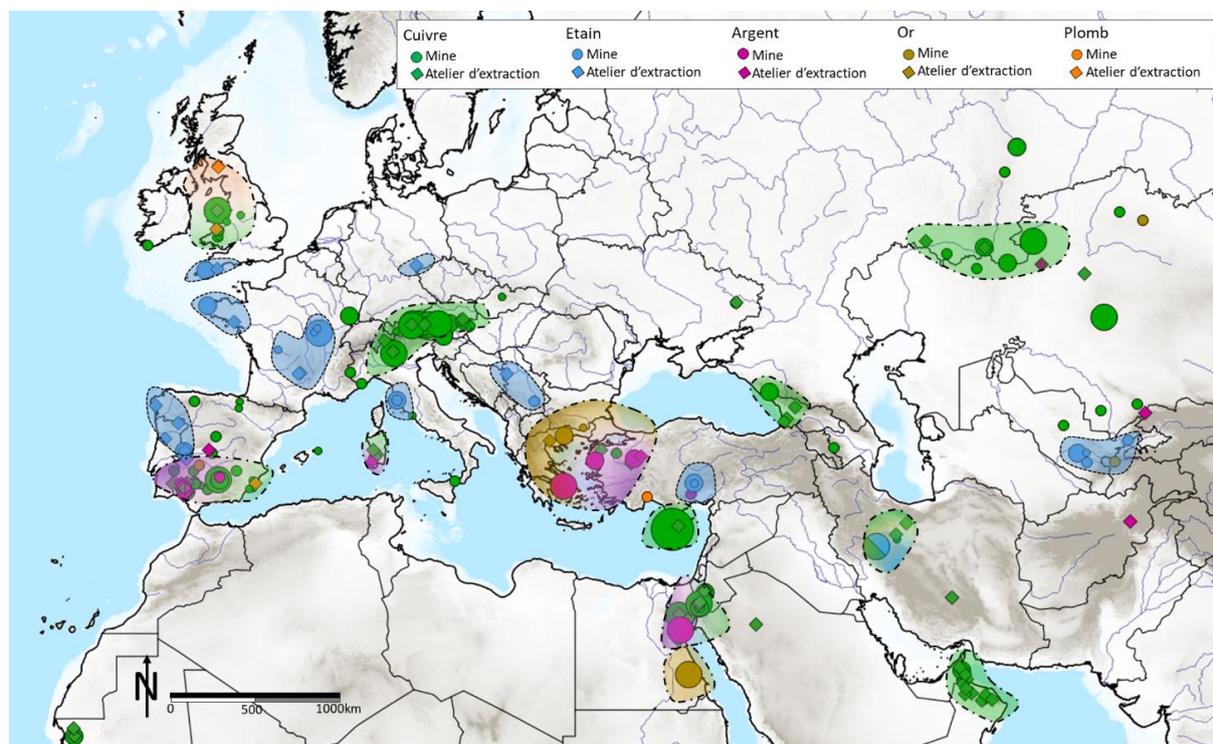


Figure 92 : Carte à large échelle interprétée de la localisation des zones de production de cuivre, étain, plomb-argent, plomb et or pour la période 1300-800 av. J.-C. Vue élargie de la carte en Figure 90.

V/1.c L'implantation des mines est-elle dépendante de facteurs économiques ?

Certains métaux avaient-ils une plus forte valeur d'échange ?

Dans le cas où l'hypothèse d'Earle *et al.* (2015) se confirmerait, définir quels métaux auraient la plus forte valeur d'échange serait complexe mais nécessaire à la discussion. L'exploitation de l'étain pourrait être plus rentable que celle du cuivre dans le Massif central, si l'on tient compte de la proximité géographique entre le Massif central et les Alpes dont le sous-sol ne présente pas de gisement d'étain mais où la production de cuivre s'est faite à échelle semi-industrielle.

Le cuivre pourrait également valoir moins que l'or. Le papyrus de Turin (~1151–1145 av. J.-C. ; Murray, 1941) nous informe que la présence de minéraux de cuivre verdâtres du désert oriental égyptien servait aux prospecteurs à détecter l'or¹⁴¹. Les découvertes archéologiques confirment que de l'or a été extrait (Meyer *et al.*, 2003), mais les recherches très peu nombreuses dans la région ne

¹⁴⁰ À Metsamor des scories ont été découvertes (Rubinstein et Barsky, 2002), mais la très faible quantité d'étain de ces dernières ne permet pas de confirmer clairement qu'il s'agit de scories d'étain (Erb-Satullo *et al.*, 2015). Dans le cimetière de Lchashen, seule la forte quantité d'artefacts en étain permet de supposer l'exploitation des gisements locaux (Crawford, 1974 ; Erb-Satullo *et al.*, 2015) ; cette hypothèse n'est cependant pas étayée par des analyses géochimiques et isotopiques).

¹⁴¹ L'or et le cuivre étant présents dans les mêmes minéralisations (Atef *et al.*, 2023 ; El-Wardany *et al.*, 2023).

permettent pas d'affirmer que le cuivre n'ait pas été extrait en quantité notable (voir Goncalves, 2022). La proximité de ces mines d'or avec les grandes régions où le cuivre était exploité de manière intensive (Timna en Israël, Faynan en Jordanie, et plus encore le Massif du Troodos à Chypre) pourrait expliquer que le cuivre n'était pas extrait (ou du moins pas en quantité importante) dans le désert oriental. Dans une autre configuration géologique, où les sources d'approvisionnement en cuivre seraient très rares, ce cuivre aurait certainement été extrait.

Cette notion de dépendance aux importations de cuivre dans des régions pourtant cuprifères a été largement étudiée et débattue dans le cas de la Scandinavie. Il est quasi-certain que les gisements locaux n'étaient pas exploités ; de nombreux auteurs font l'hypothèse d'importations de cuivre issu de sources distantes en échange avec de l'ambre de la Baltique (Sabatini et Ling, 2013 ; Melheim *et al.*, 2018 ; Nørgaard *et al.*, 2021).

Pourquoi les zones de production de métaux sont-elles réparties de manière si régulière ?

Il est intéressant de constater que les zones minières dédiées à la production de cuivre et d'étain (i) sont approximativement distantes de 1000 km les unes des autres en Europe de l'Ouest et (ii) généralement distantes d'environ 1500-2000 km des zones de production de plomb-argent.

Dans le monde interconnecté qu'est celui de la fin de l'âge du Bronze, il se pourrait que ces distances correspondent à des seuils au-delà desquels établir des connexions d'échange régulières deviendrait complexe (cette hypothèse sera testée par la suite, cf partie 2 VI/3). Ce facteur pourrait être l'un des nombreux entrant en jeu pour expliquer la répartition des zones d'exploitation des différents métaux.

Parmi les autres facteurs économiques possibles, nous pourrions évoquer une possible différence de compétitivité entre les mines. Elle pourrait inclure des éléments tels que la disponibilité des ressources nécessaires à l'extraction ou encore la rentabilité de l'exploitation. Certains gisements seraient plus riches ; une plus grande quantité de cuivre aurait ainsi pu être obtenue avec moins d'effort. En plus de la quantité, la qualité du cuivre produit pourrait ainsi également être un facteur déterminant dans le cadre du commerce du cuivre¹⁴².

Tous ces facteurs peuvent être touchés du doigt par nos données et seront discutés dans ce chapitre.

V/1.d L'implantation des mines est-elle limitée par des critères techniques ?

Lorsque l'on observe la répartition de l'ensemble des mines de cuivre connues entre le Néolithique/Chalcolithique et la fin de l'âge du Bronze, on constate aisément que certaines régions cuprifères semblent ne jamais avoir fait l'objet d'exploitation (Figure 93). Il s'agit des Cornouailles, de l'Écosse, du nord du Massif armoricain, du bouclier scandinave et des grands gisements sédimentaires d'Europe centrale (les *Kupferschiefer*).

¹⁴² Par exemple, dans le cas du Massif central, le cuivre importé pourrait être de meilleure qualité que le cuivre local issu de gisements très polymétalliques.

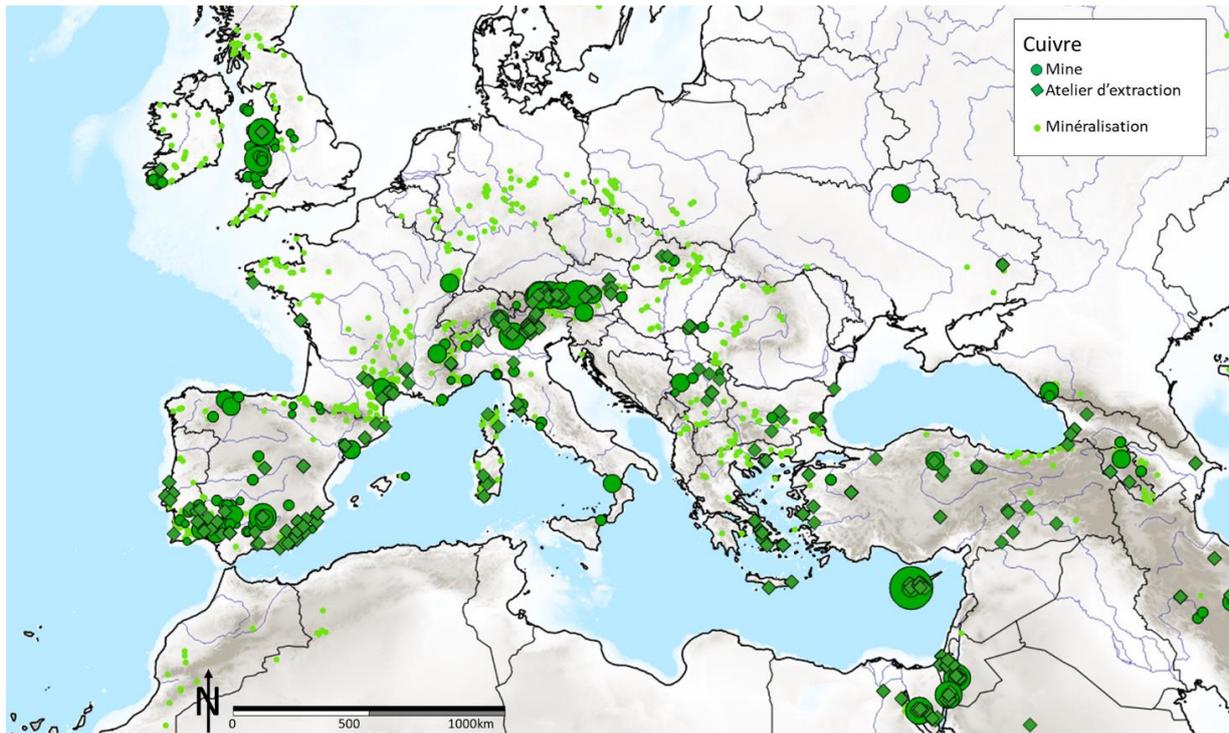


Figure 93 : Répartition des mines et ateliers d'extraction du cuivre (sites douteux exclus) recensés pour la période 5000-800 av. J.-C. et indices minéralisés en cuivre (données ProMine et USGS).

Plusieurs raisons pourraient expliquer cette absence d'exploitation. Premièrement, les mines et les ateliers d'extraction n'ont peut-être pas encore été découverts dans ces régions, faute de recherches archéologiques adaptées. Cette explication pourrait être pertinente pour le nord du Massif central (Petit *et al.*, 2008 ; Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2008) et l'Écosse (Mighall *et al.*, 2009 ; Küttner *et al.*, 2014) où la présence de pollutions de tourbières indiquerait avec de très fortes probabilités que les gisements locaux ont été exploités. Mais l'absence d'exploitation ne trouve pas d'explication claire dans les autres régions.

La recherche de mines de cuivre n'a pas fourni de résultats ni dans les Cornouailles (Jones et Quinnell, 2011 ; Timberlake, 2017) ni dans la grande plaine germano-polonaise dont l'exploitation est encore sujette à débat (Niederschlag *et al.*, 2003 ; Borg, 2017). La non-exploitation des gisements de cuivre du bouclier scandinave est quant à elle confirmée par l'absence de correspondance géochimique entre le cuivre consommé localement et les gisements (citons notamment Prescott, 2006 ; Ling *et al.*, 2013 ; Melheim *et al.*, 2018 ; Nørgaard *et al.*, 2021).

Une seconde explication de l'absence d'exploitations minières résiderait dans le fait que certains types de gisements ne seraient pas exploitables par les mineurs de l'âge du Bronze. Deux raisons pourraient alors expliquer cette absence d'exploitation :

- Des limites d'ordre techniques : les mineurs pourraient ne pas exploiter certains gisements trop complexes à creuser ou présentant des minerais qu'ils ne savent pas fondre ;
- Des limites de rentabilité d'exploitation : les gisements trop peu concentrés en cuivre et/ou en arsenic ne seraient pas assez rentables.

V/2 Des limitations techniques expliquant la localisation des mines ?

Dans le cas du cuivre, la présence de mines dans la quasi-totalité des régions cuprifères attesterait que les mineurs sont capables d'exploiter des types de gisements très différents et de s'adapter aux minéralisations locales, mais il est important de vérifier cela. En effet, l'absence de mines dans

certaines régions telles que les Cornouailles, la Scandinavie ou encore dans la plaine germano-polonaise pourrait être liée à des difficultés d'extraction.

La question d'une éventuelle sélection des types de minerais exploités mérite également d'être approfondie. Il convient de vérifier si tous les minerais peuvent être fondus mais aussi de questionner la présence d'arsenic et d'antimoine dans les gisements (ces métalloïdes entrant dans la composition des cuivres et bronzes arséniés en circulation avant les bronzes à étain).

V/2.a Les mineurs sont-ils capables d'exploiter tous les types de gisements ?

Comme déjà évoquée, l'implantation de mines nécessite de disposer d'outils et plus encore, de compétences techniques. Plus précisément, selon Ixer et Patrick (2003), trois conditions sont requises pour qu'un gisement soit exploité :

- Son exploitation doit être techniquement possible ;
- Le gisement doit posséder un minerai de concentration suffisamment élevée ;
- L'exploitation du gisement doit être génératrice de profits.

Si l'une de ces conditions manque, le gisement ne sera pas exploité. La technicité minière joue donc un rôle primordial dans la sélection des gisements qui ont fait l'objet d'une exploitation minière. Un gisement riche et contenant une substance intéressante ne pourra pas être exploité si les mineurs ne possèdent pas le savoir-faire technique nécessaire à son creusement.

Il est donc intéressant de s'interroger sur la capacité des mineurs à extraire des minerais de contextes géologiques complexes et de déterminer si une sélection des gisements s'est opérée selon des critères de difficulté d'extraction.

Les mineurs peuvent-ils exploiter tous les gisements en roche ? – cas des exploitations de cuivre

Ces informations recensées dans notre corpus permettent de reconstituer les techniques minières employées au Chalcolithique et à l'âge du Bronze. Les mines de cuivre constituent pour cela un très bon cas d'étude.

Les gisements de cuivre peuvent posséder des formes et des tailles différentes (minéralisation massive plurimétrique à veines centimétriques, minéralisations en poches, éparées, en filon ou encore béchiques), mais aussi des orientations variées (de pendage horizontal à vertical). De plus, la morphologie des gisements primaires de cuivre est couramment modifiée par des phénomènes tectoniques (basculement, recoupement par des failles) expliquant les morphologies souvent complexes des gîtes. Le cuivre peut également former des encroûtements dans le cas de gisements affectés par des phénomènes karstiques. Des phénomènes post-dépositionnels tels que l'hydrothermalisme ou encore l'altération supergène peuvent également modifier la richesse en cuivre et en d'autres métaux associés aux gisements (cf I/2.a de l'introduction).

Nous pourrions alors supposer que certains types de gisements de cuivre ne peuvent pas être exploités avec des techniques d'extraction préhistoriques.

Cela ne semble pas être le cas : à l'échelle de l'Europe et sur l'ensemble de la période étudiée, tous les types de gisements ont été exploités à l'exception des gisements de type porphyres¹⁴³ :

- Des gisements mafiques ont été exploités en péninsule d'Oman et dans une partie des Alpes ;
- Des SMV à Chypre et dans la région d'Huelva (Pyrite Belt ibérique) ;
- Des gisements SEDEX-MVT à Saint-Véran (Alpes occidentales) et dans les monts Métallifères ;
- Des skarns à Rudna Glava (Serbie) ;
- Des gisements sédimentaires dans les îles Britanniques (*Red Bed*) et dans le Tyrol autrichien (*Greywacke Zone*) bien que dans ce dernier cas les gisements sont affectés par de nombreux phénomènes hydrothermaux enrichissant les gisements primaires en cuivre.

Les mineurs peuvent exploiter de grandes zones massives (tels que les ophiolites de Chypre ou les sulfures massifs volcanogènes (SMV) de la péninsule Ibérique), mais aussi des gisements aux minéralisations de cuivre très fines et/ou disséminées¹⁴⁴.

De grands filons peuvent être suivis et exploités sur des distances importantes comme à Mocissos (Portugal) où un filon est suivi sur 800 m via des tranchées, puits et ouvrages à ciel ouvert (Hunt Ortiz, 2015 p. 212-213). À l'opposé, des veines d'épaisseur centimétriques sont également exploitées comme c'est le cas dans la mine de Cuchillares (également au sud de la péninsule Ibérique) qui suit une veine de seulement 3 cm d'épaisseur (Rothenberg et Blanco-Freijeiro, 1981 p. 81-84).

Les mineurs sont également capables d'exploiter des gisements polymétalliques (comportant plusieurs métaux) et d'y sélectionner une phase minéralisée en particulier. Ce phénomène a été décrit en péninsule Ibérique (Domergue, 1990 p. 121-122), mais également dans le Pays de Galles dans les mines de Twll y Mwyn et de Great Orme où le cuivre est ciblé par les mineurs qui y délaissent les portions argentifères des gisements (Timberlake, 2008; Ixer et Budd, 1998).

Ce premier constat montre que les mineurs se sont adaptés pour exploiter les gisements locaux et que des types de gisements très différents sont exploités en Europe.

Contraintes induites par les types de gisements sur l'exploitation minière

Morphologie et orientation des gisements constituent des facteurs déterminant le type d'exploitation qui sera mise en œuvre.

Par exemple, un filon affleurant proche de la surface et d'orientation horizontale conduira plutôt à l'ouverture d'exploitations à ciel ouvert ; en revanche, le même filon de pendage vertical sera exploité préférentiellement sous forme de puits et galeries. Le basculement tectonique subi par ce filon détermine donc le type d'exploitation. De même, un corps massif ou des lentilles minéralisées ne seront pas exploités de la même manière selon leur orientation, leur degré de déformation et leur taille.

Le type d'exploitation (en surface ou souterraine) ne constitue cependant pas la seule contrainte à l'exploitation des gisements.

Une dureté importante de la roche contenant le gisement (l'encaissant) complique la progression des mineurs et joue donc également sur la difficulté d'ouverture et d'exploitation d'une mine. La dureté

¹⁴³ Un des 6 types de gisements recensés en Europe (listés dans le Tableau 1).

¹⁴⁴ Ces minéralisations très fines sont par exemple exploitées dans la mine de Mount Gabriel où les minéraux de cuivre les plus fins ne dépassent pas 0,01 mm de diamètre et sont donc en partie invisibles à l'œil nu (Ixer et Budd, 1998).

de cette roche dépend de sa nature mais peut également être augmentée (par dolomitisation ou encore métamorphisme) ou diminuée (par altération supergène par exemple) en fonction de son histoire géologique.

Des facteurs externes aux gisements sont également à prendre en compte dans la difficulté d'extraction. La présence de nappes phréatiques mais aussi les suintements d'eau en milieux souterrains limitent l'exploitation en profondeur d'une mine sans système d'exhaure. Par ailleurs, la rareté des ressources en bois nécessaires pour l'abattage par le feu et le traitement pyrométallurgique peut être un facteur limitant le développement des exploitations.

Nous allons chercher à définir si certains des prérequis permettant de dépasser les difficultés listées n'étaient pas maîtrisés à l'échelle de l'Europe. Pour cela nous nous appuyerons sur un corpus de mines de cuivre bien documentées.

Détail du corpus d'étude

Nous avons sélectionné 92 mines de cuivre où les techniques minières employées ont été détaillées. 57 d'entre elles sont datées par radiocarbone (sur boisements ou charbons de bois retrouvés en contexte d'extraction). Les mines se répartissent de manière chronologique sans lacunes importantes (Figure 94) :

- 42 mines débutent leur exploitation avant 2000 av. J.-C. (c'est-à-dire au Chalcolithique) ;
- 50 mines démarrent leur exploitation après 2000 av. J.-C. (soit à l'âge du Bronze).

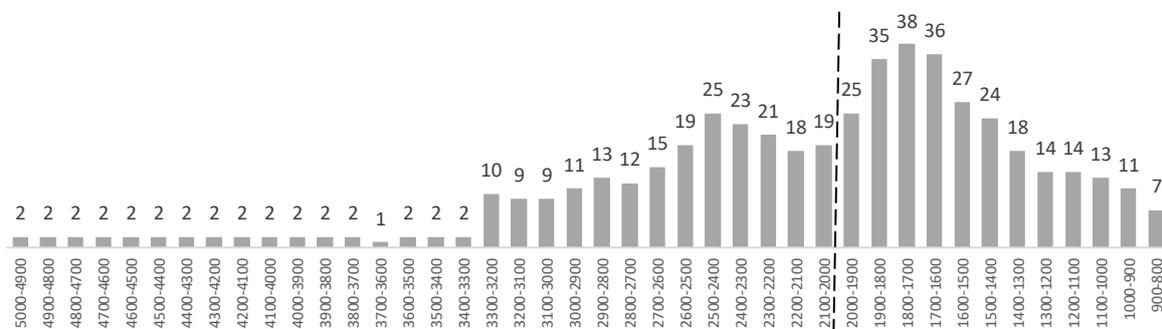


Figure 94 : Répartition chronologique du nombre de mines présentes dans le corpus d'étude retenu.

Le corpus couvre l'ensemble de l'Europe (Figure 95).

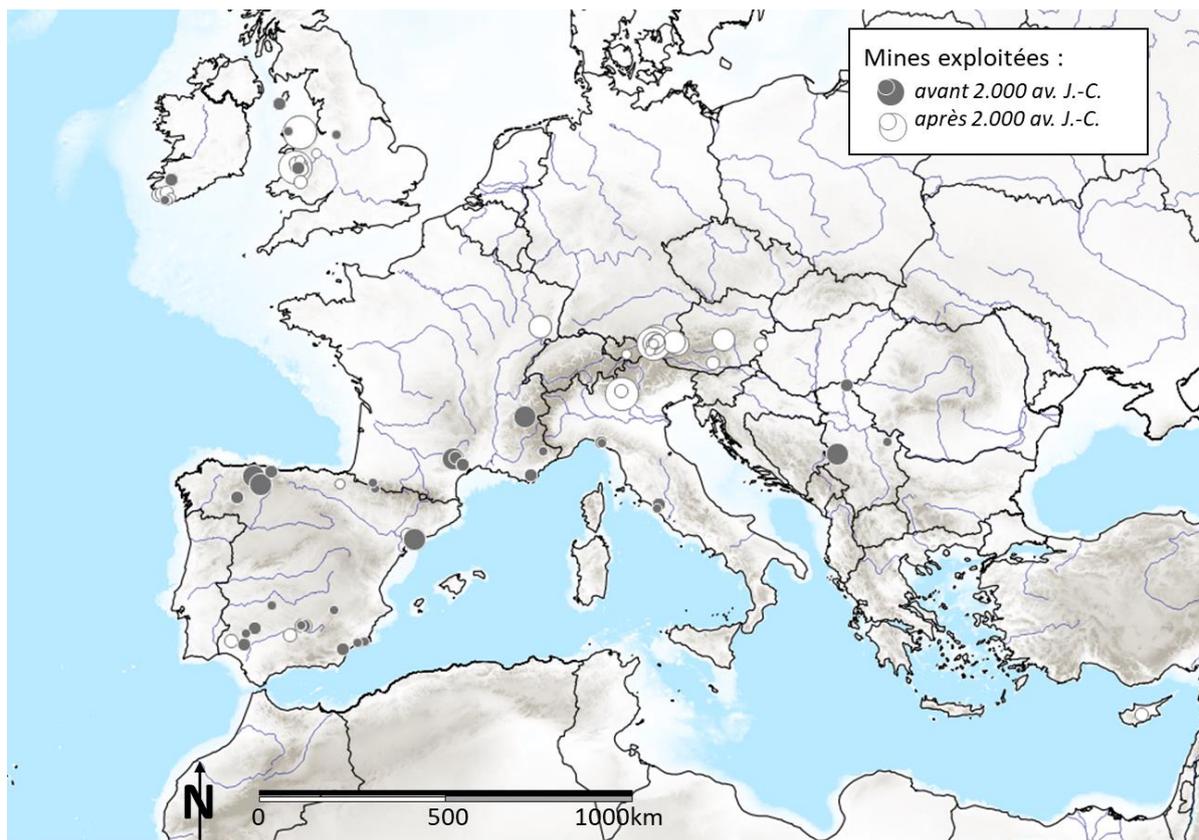


Figure 95 : Localisation des mines retenues pour l'étude des techniques minières : les mines dont l'exploitation débute avant 2000 av. J.-C. sont représentées par des cercles gris, celles dont l'exploitation débute après 2000 av. J.-C. par des cercles blancs.

Étude de différents facteurs influençant l'exploitation des gisements

Formes d'extractions privilégiées

Le type d'extraction employé dépend de la forme des minéralisations (un filon ne sera pas exploité de la même manière qu'un amas) mais peuvent aussi refléter des stratégies d'exploitation.

Une minéralisation se prolongeant en profondeur pourra par exemple être exploitée à l'aide de puits (ce sont des conduits verticaux dont le but est d'atteindre une minéralisation située plus en profondeur) ou via des galeries souterraines (qui suivent la minéralisation au plus proche entraînant souvent une complexité de leurs organisations).

Ces deux formes d'extraction sont supposées plus complexes à mettre en œuvre qu'une exploitation peu profonde à ciel ouvert : techniques d'extraction et le matériel qui doivent mobilisés sont plus nombreux (Tableau 14).

Type de mine		ramassage de surface	placer	ciel ouvert	tranchée	puits	Souterrain
Matière exploitée	Métaux	tous métaux	étain et or	tous métaux	tous métaux	tous métaux	tous métaux
	lithiques	obsidienne et silex	-	toutes sauf évaporites	toutes roches	toutes roches	toutes roches
Techniques minières	détournement de cours d'eau	-	oui	-	-	-	-
	abattage par le feu	-	-	-	parfois	parfois	parfois
	boisage de soutènement	-	-	-	parfois	parfois	parfois
	système d'évacuation de l'eau	-	-	-	-	-	parfois
	Eclairage	-	-	-	-	parfois	oui
	système de ventilation	-	-	-	-	-	oui
Principaux outils et équipement	marteaux (pierre, corne, bois)	parfois	oui	oui	oui	oui	oui
	petites pelles (bois, os)	parfois	oui	oui	oui	oui	oui
	piques (pierre, corne, bois)	-	-	oui	oui	oui	oui
	bacs de lavage (bois)	-	oui	-	-	-	-
	mortiers et pilons (pierre, bois)	-	oui	oui	oui	oui	oui
	paniers (osier, herbe)	-	-	oui	oui	oui	oui
	cordes (fibres, herbe)	-	-	oui	oui	oui	oui
	grandes pelles (bois) « shovel »	-	-	oui	oui	oui	oui
	burins (os, pierre, bois)	-	-	oui	oui	oui	oui
	râteaux (os, corne, bois)	-	-	oui	oui	oui	oui
	lampes (pierre, poterie)	-	-	-	parfois	oui	oui
	torches (bois, copeaux de bois)	-	-	-	parfois	oui	oui
échelles (bois)	-	-	-	parfois	oui	oui	

Tableau 14 : Techniques et outils miniers à mobiliser selon le type d'exploitation pour la période 5 000-800 av. J.-C. (inspiré de De Jesus, 1980 p. 360).

Une même zone d'extraction peut comporter plusieurs types de structures. Elles peuvent correspondre au prolongement en souterrain de tranchées à ciel ouvert ou encore à la présence de puits et de souterrains dans une même zone d'exploitation.

Nos résultats montrent que ces exploitations mixtes sont courantes (elles concernent près d'un quart des mines Néolithiques et 12% des mines de l'âge du Bronze). Les mineurs étaient donc capables d'exploiter un gisement de plusieurs manières sur un même site.

Les exploitations souterraines sont courantes dès le Néolithique où elles représentent un tiers des exploitations. Leur nombre augmente légèrement à l'âge du Bronze mais cela peut être dû à la prise en compte des mines du Tryol autrichien.

Durant la Protohistoire, les types d'extraction employés sont donc divers, et aucun type d'exploitation n'est majoritaire durant le Néolithique et à l'âge du Bronze (Tableau 15).

	5000-2000 av. J.-C.	2000-800 av. J.-C.
Ciel ouvert et tranchées	9 (23%)	14 (29%)
Souterrain	14 (35%)	21 (43%)
Puits	6 (25%)	8 (16%)
Souterrain et tranchées	6 (15%)	5 (10%)
Souterrain et puits	4 (10%)	1 (2%)
Puits et tranchées	1 (3%)	0 (0%)
TOTAL	40	49

Tableau 15 : Répartition des mines par forme d'exploitation.

Le problème des nappes phréatiques

Le fait de creuser des mines entraîne cependant un risque connu et récurrent dans les travaux miniers : celui de l'ennoyage.

Il peut provenir de suintements d'eau dans les galeries souterraines ou du fait que le creusement des galeries atteint le niveau de la nappe phréatique. La mise en évidence d'un arrêt de l'exploitation minière en lien avec la présence d'eau n'est cependant pas courante et elle n'est citée que dans de rares travaux :

- Dans les Balkans, à Ai Bunar, des tranchées et travaux souterrains de plus de 30 m de profondeur représentant un défi technique de stabilité et la seule limite à l'approfondissement y aura été la nappe phréatique (O'Brien, 2015 p. 47-53) ;
- Dans les mines de Berrocal, Las Navas et la Caba en péninsule Ibérique, neuf puits sont décrits comme limités en approfondissement par le niveau de la nappe phréatique soit dans ce cas, 15 m de profondeur (Hunt Ortiz, 2003 p. 76-78) ;
- À Mount Gabriel l'approfondissement des travaux serait également limité par la présence de la nappe phréatique (O'Brien, 2015 p. 2014) ;
- À Copa Hill l'exploitation semble s'arrêter du fait de problèmes d'évacuation d'eau (Timberlake et Marshall, 2018).

Une seule installation de lutte contre les inondations en contexte minier est citée dans la bibliographie. Il s'agit d'aménagements faits de bois et d'argile, interprétés comme des barrages servant à éviter que les travaux miniers soient inondés dans les mines du Mitterberg (Zschocke et Preuschen, 1932 ; repris par Morteani et Northover, 2013 p. 170)¹⁴⁵.

Le travers-banc d'exhaure¹⁴⁶ le plus ancien retrouvé en Europe est situé dans la mine de Campolungo (Italie), mais ce dernier date de 900 av. J.-C. soit à la limite du Bronze final et du premier âge du Fer (Morin et Tizzoni, 2009). Avant cette date, aucun indice ne permet de mettre en évidence un traitement efficace de l'eau en contexte minier souterrain.

Le problème de l'eau pourrait donc être un facteur complexifiant l'exploitation minière au Néolithique et à l'âge du Bronze mais il ne devient limitant que lorsque l'exploitation atteint une certaine taille (il ne constitue pas une limite à l'implantation de la mine, mais seulement à son développement en profondeur).

¹⁴⁵ De nombreux seaux ont été retrouvés en profondeur. Ils auraient servi à évacuer l'eau, ce qui laisse supposer qu'elle gênait l'exploitation malgré les techniques de barrage mises en place.

¹⁴⁶ Galerie creusée à travers la roche pour permettre l'évacuation de l'eau présente dans les galeries.

Dureté de l'encaissant

Les roches exploitées peuvent présenter des duretés différentes, nécessitant l'emploi de techniques et d'outils différents :

- Les mineurs utilisaient des outils en pierre, en bois ou en os pour creuser les roches tendres et/ou friables (zones d'enrichissement supergène, calcaires, schistes, etc.). Dans le cas d'encaissants schisteux, des boisages de soutènement permettant de maintenir la roche friable ont été retrouvés dans le Tyrol au Mitterberg et à Kechalm (Goldenberg, 1998) ;
- Dans des roches plus résistantes (dolomies, roches plutoniques...), la technique dite de l'abattage par le feu était employée en complément des outils précédemment cités (Willies et Weisgerber, 2000 ; Dubois, 1996).

Les données de notre inventaire concernant les types d'encaissants ne montrent pas de sélection particulière en fonction de la dureté des roches. Les mineurs exploitent des roches dures comme tendres et les encaissants résistants sont même majoritaires dans le corpus d'étude au Néolithique comme à l'âge du Bronze (Tableau 16).

	5000-2000 av. J.-C.	2000-800 av. J.-C.
Encaissant dur	29 (73%)	31 (70%)
Encaissant tendre	7 (17%)	3 (7%)
Encaissant friable	4 (10%)	10 (23%)
TOTAL	40	44

Tableau 16 : Nombre de mines par dureté d'encaissant.

Maîtrise de l'abattage par le feu

L'abattage par le feu consiste à allumer de grands brasiers au contact des roches (cf II/1.a). Le choc thermique les fracture et délite les parois en écailles. Les roches exposées au feu sont ensuite attaquées à coups de maillets et de pics en pierre (régulièrement retrouvés dans les mines).

Cette technique est employée lorsque les roches encaissantes sont très résistantes et ne peuvent être détruites à l'aide de maillets seuls¹⁴⁷. Elle peut néanmoins être utilisée dans des mines où l'encaissant est tendre pour atteindre des zones présentant une dureté plus importante comme cela a été décrit dans les mines de cuivre en contexte karstique de Great Orme au Pays de Galles (Lewis, 1990) et d'El Aramo en Espagne (Domergue, 1990). Les portions les moins altérées (et donc les plus résistantes) de la dolomie de ces deux exploitations ont été abattues par le feu. Cependant, si l'abattage par le feu permet de progresser dans des encaissants très résistants, l'utilisation de cette technique demande la maîtrise de plusieurs paramètres :

- Une vision claire de la géométrie des minéralisations ;
- Une bonne gestion des ressources en bois soit un approvisionnement continu et important¹⁴⁸, et une bonne hygrométrie du bois (Py, 2009, p.1146 et p.1207 démontre expérimentalement que l'utilisation de bois sec permet d'obtenir de meilleurs rendements) ;

¹⁴⁷ La température à laquelle la roche se fracture dépend du type de roche : environ 550 °C pour un basalte, 360 °C pour un gabbro, 260 °C pour un granite (Willies et Weisgerber, 2000).

¹⁴⁸ La présence de champignons saprophytes retrouvés dans des charbons d'abattages par le feu dans des mines de cuivre alpines du Bronze final montre que le bois a été parfois stocké avant utilisation (Heiss et Oeggel, 2008), ce qui corroborerait cette hypothèse.

- Un système performant de ventilation des galeries pour évacuer les fumées (cette ventilation ne concerne que les mines les plus profondes¹⁴⁹).

Cependant, et malgré toutes ces difficultés, l'abattage par le feu est employé dès le Néolithique pour l'extraction du cuivre¹⁵⁰ (Dubois, 1996). Sa première utilisation connue dans une mine de cuivre a eu lieu à Rudna Glava (Serbie), au V^e millénaire av. J.-C. Elle a permis d'exploiter un skarn sous forme de puits (Willies et Weisgerber, 2000).

Les données du corpus confirment que cette pratique était déjà répandue en Europe au Néolithique (Figure 96). En prenant en compte les mines bien documentées de notre inventaire, le recours à cette technique semble quasi systématique : 90% des mines présentent des traces d'abattage par le feu (soit 94 entrées sur les 104 pour lesquelles cette donnée est renseignée).

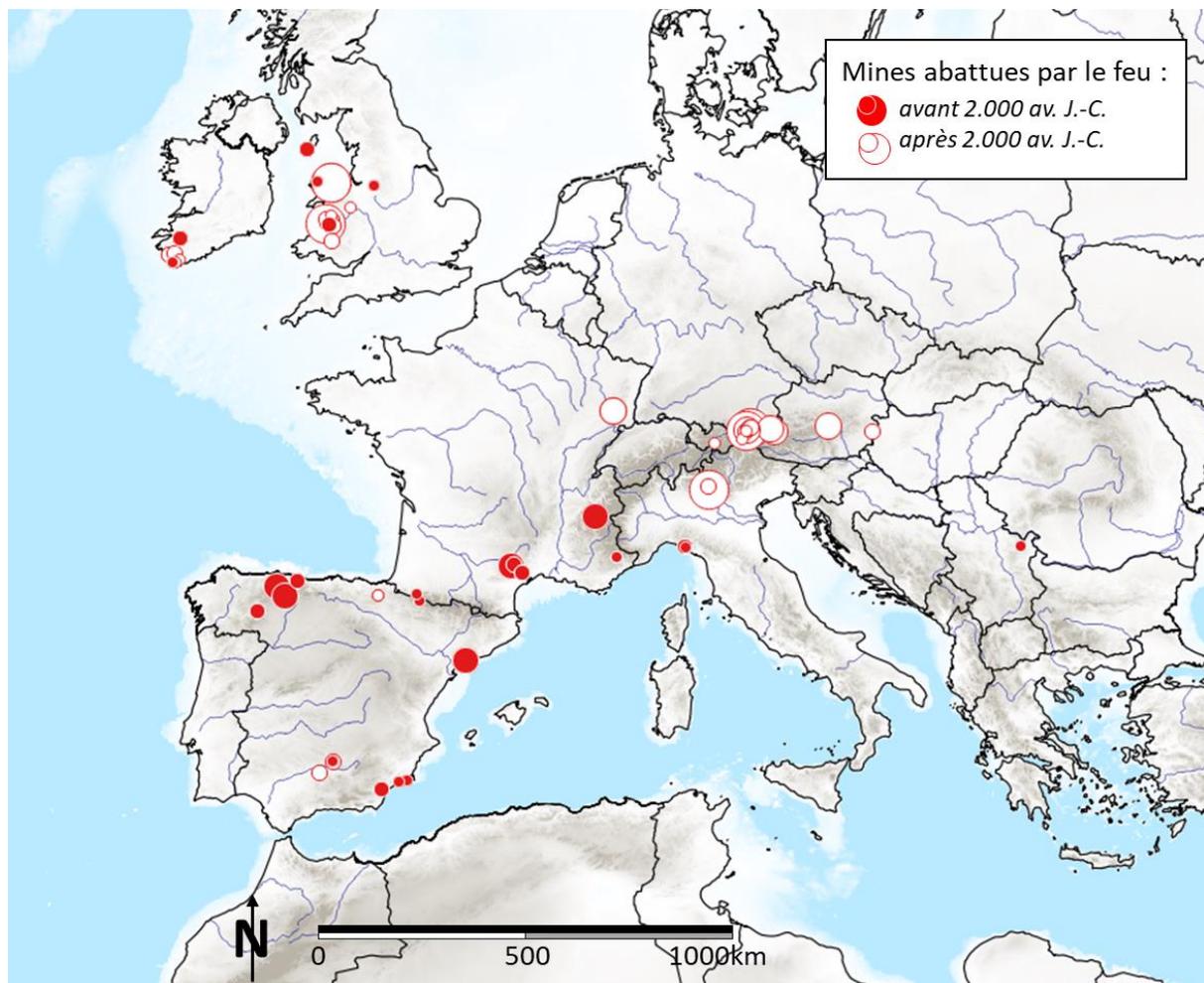


Figure 96 : Répartition spatiale des mines présentant des traces d'abattage par le feu avant 2000 av. J.-C. (ronds rouges) et après 2000 av. J.-C. (ronds blancs). L'abattage par le feu est présent dans l'ensemble de l'Europe avant 2000 av. J.-C. (l'exploitation des mines du Tyrol autrichien ne débute qu'après 2000 av. J.-C.).

¹⁴⁹ Elle peut s'effectuer en inclinant les galeries comme dans le cas de Mitterberg (Pittioni, 1951; Willies et Weisgerber, 2000). L'action de surélever les bûchers permettait également de jouer sur la hauteur de diffusion des fumées (Willies et Weisgerber, 2000). Dans la mine de Great Orme, des amas de roches stériles sont utilisés pour créer des murs artificiels et ainsi contrôler les flux de fumées (Fokkens et Harding, 2013, p. 449).

¹⁵⁰ L'abattage par le feu n'est pas uniquement connu pour les mines de métal, mais est également attesté au Néolithique dans le cas des jadéites du Mont Viso au V^e millénaire (Petrequin *et al.*, 2011) ou encore dans celui de la mine de silex d'Isteiner Klotz (Allemagne) au IV^e millénaire (Willies et Weisgerber, 2000). Cette technique est donc utilisée dès le Néolithique pour l'exploitation de roches tenaces (silex, jadéite) comme de minerais métallifères.

L'emploi de cette technique demande une bonne gestion des ressources en bois et pourtant, des mines situées au-dessus de la limite altitudinale des arbres¹⁵¹ présentent des traces d'abattage par le feu ; ce cas est observé à Gratspitze dans le Tyrol (l'exploitation est située légèrement au-dessus de la limite altitudinale actuelle des arbres¹⁵² (Heiss et Oeggl, 2008)). L'apport en bois a donc nécessité un approvisionnement depuis des zones de plus basse altitude.

L'abattage par le feu n'aurait pas entraîné de déforestation :

- Huit études polliniques réalisées dans des tourbières proches de sites miniers des Alpes et du Pays de Galles ne témoignent que d'une déforestation limitée pour l'approvisionnement en bois des travaux miniers (abattage par le feu et/ou métallurgie (elle aussi consommatrice de bois) (O'Brien, 2015 p. 274) ;
- Des études menées sur les charbons de bois issus d'abattage par le feu en Irlande à Mount Gabriel (O'Brien, 1994) et dans le Tyrol autrichien (Heiss et Oeggl, 2008) ont démontré que le bois utilisé provient de branches et de tiges et non de troncs, ce qui permet de conserver le couvert forestier¹⁵³.

L'étude anthracologique des essences utilisées montre qu'elles sont sélectionnées dans les écosystèmes locaux¹⁵⁴ et les analyses palynologiques témoignent d'une sélection des essences locales au plus fort pouvoir calorifique (Jouffroy-Bapicot *et al.*, 2007).

La pratique de l'abattage par le feu et l'approvisionnement en bois qu'elle impliquait semble donc parfaitement maîtrisée aux périodes étudiées.

Une sélection des gisements les plus concentrés ?

Une sélection des gisements pourrait s'opérer en fonction de leur richesse.

Les exploitations alluvionnaires pourraient cibler les parties les plus riches des gisements : Tizzoni (1999) estime à partir de scories d'étain de la fin de l'âge du Bronze/début de l'âge du Fer retrouvées en Angleterre et au Portugal que les minerais exploités contenaient au moins 65 % d'étain, ce qui est beaucoup.

Dans le cas particulier du plomb-argent, seules les galènes très riches en argent semblent exploitées. Il est extrêmement complexe de déterminer un seuil de concentration en argent en dessous duquel les mines ne seraient exploitées que pour le plomb et non pour l'argent. Pernicka (2014 p.260) évoque une limite de 500-800 ppm d'argent dans les galènes au début de l'âge du Bronze puis à 200-300 ppm à la fin de cette période, mais il ne précise pas sur quelles données il s'appuie. Le peu de références dont nous disposons nous incite à placer cette limite vers 4000 ppm puis vers 1000 ppm à la fin de la période (Tableau 17).

¹⁵¹ Limite supérieure de pousse des arbres (différente de celle de la forêt, située à une altitude plus faible et où le bois est plus abondant).

¹⁵² La mine se situe à 1899 m d'altitude alors que la limite d'apparition des arbres actuelle est fixée à 1800 m.

¹⁵³ Un constat similaire a été fait dans le cas de la mine de cinabre (exploité pour produire des pigments) à Spaccasasso (Toscane, Italie ; IV-III^e millénaire av. J.-C.). Les charbons découverts témoignent que de la bruyère arborescente a été utilisée, épargnant ainsi les arbres matures (Poggiali *et al.*, 2017).

¹⁵⁴ Principalement des chênes et noisetiers à Mount Gabriel, Pays de Galles (O'Brien, 1994) ; des épicéas, sapins, hêtres, pins sylvestres et mélèzes dans le cas des forêts montagnardes mixtes alpines (Heiss et Oeggl, 2008) ; de la bruyère arborescente en Toscane (Poggiali *et al.*, 2017).

Localité	Période d'exploitation	Teneur mesurée	Argent exploité	Référence
Cartegena (Espagne)	Forte entre ~1100 et 650 av. J.-C.	1000 ppm	Possible	Trincherini <i>et al.</i> , 2009
Thassos (Grèce)	Incertaine (évoqué par Hérodote)	1500 ppm	Possible	Pernicka <i>et al.</i> 1981
Laurion (Grèce)	~ 1500-900 av. J.-C.	5872 ppm	Avéré	Vaxevanopoulos <i>et al.</i> 2022
Pangaeon (Grèce)	Incertaine (évoqué par Hérodote)	9906 ppm	Possible	Vaxevanopoulos <i>et al.</i> 2022
Siphnos (Grèce)	~ 3000-2400 puis 800-400 av. J.-C.	4983 ppm	Non avéré	Vaxevanopoulos <i>et al.</i> 2022
Rio Tinto (Espagne)	~ 1600-1400 puis 800-600 av. J.-C.	4000 ppm	Avéré	Pérez Macías 1997

Tableau 17 : Exemples de teneurs mesurées dans des galènes et jarosites¹⁵⁵ possiblement exploitées.

Dans le cas du cuivre, il est primordial de revenir à la configuration des gisements : une même teneur (par exemple 2-3 % (wt) de cuivre) peut refléter un gisement où le cuivre est extrêmement disséminé (les minéraux cuprifères sont présents sous forme de mouchetures) ou caractériser un gisement où un filon centimétrique très riche est encaissé dans une roche stérile. Ce dernier cas est celui qui constitue potentiellement un gisement d'intérêt pour les mineurs. De très nombreux exemples de filons très riches dans des roches stériles, suivies sur de grandes distances sont connues et identifiées par les fouilles dans de nombreuses localités : dans les Alpes de l'Ouest (Ancel, 1997 ; Moulin *et al.*, 2010), au Pays de Galles (Timberlake, 1990 ; Mighall *et al.*, 2009 ; Page *et al.*, 2012), dans les Balkans (Jovanovic, 1990), ou encore dans la péninsule Ibérique (Steiniger et Giardino, 2013 ; Hunt Ortiz *et al.*, 2014).

Notre conception moderne de ce qu'est un gisement¹⁵⁶ n'est donc pas adaptée à la Protohistoire. Nous cherchons actuellement des gisements de grande dimension afin d'y implanter durablement des installations. Les porphyres cuprifères, mais aussi des minéralisations sédimentaires de type *Kupferschiefer*¹⁵⁷ qui constituent de nos jours les principales ressources cuprifères exploitées en Europe n'étaient alors peut-être pas assez concentrés pour être rentables pour les mineurs protohistoriques. Il en était peut-être de même pour les gisements scandinaves que William O'Brien (2015) considère les trop pauvres pour être exploités.

La richesse des gisements et leur dissémination est le seul facteur que nous pouvons clairement supposer pour expliquer l'absence d'exploitation de certaines zones métallifères. Des facteurs d'ordre techniques ne permettent pas d'exploiter l'absence de mines. Les mineurs étaient capables d'exploiter des minéralisations très variées, employant des techniques minières complexes pour assurer la stabilité des ouvrages et progresser dans la roche. Ils géraient efficacement les ressources nécessaires à l'activité minière

¹⁵⁵ Dans le cas des mines du Rio Tinto, les teneurs ont été mesurées dans des jarosites et cérosites et non pas dans des galènes.

¹⁵⁶ Un gisement se définit en termes relatifs à un marché économique : le terme de gisement s'emploie lorsque le minerai présente une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable avec profit ; le gîte devient alors gisement.

¹⁵⁷ Ces minéralisations se présentent dans des strates (d'épaisseur généralement inférieure à 4 m) de marnes bitumineuses (déposées à la suite d'une transgression marine rapide) d'âge permien supérieur (Hitzman *et al.*, 2010 ; Oszczepalski *et al.*, 2019). Le cuivre est présent de manière disséminée au sein des couches marnées et/ou sous forme de lits millimétriques de sulfures (principalement la bornite, la chalcopirite et la chalcocite). On trouve ces minéralisations dans le sud de la Pologne et en Allemagne dans un secteur correspondant au sud du bassin sédimentaire de Zechstein. Ces gisements constituent la 2e source de cuivre actuellement exploitée (après les porphyres cuprifères) et fournissent 20-25 % de la production de cuivre mondiale.

La présence de mines pourrait cependant dépendre de la maîtrise des processus de métallurgie extractive ou, plus précisément, à l'adaptation de ces processus aux minerais présents dans chaque région.

V/2.b Les métallurgistes peuvent-ils fondre tous les minerais de cuivre ?

La fonte des sulfures de cuivre : un processus complexe mais rapidement maîtrisé partout en Europe

Il a été théorisé que l'exploitation des sulfures primaires de cuivre ne débutait qu'à l'âge du Bronze et, qu'avant cette date, les métallurgistes ne seraient capables de fondre que des minerais riches en carbonates de cuivre¹⁵⁸ (Strahm, 1994 ; Stöllner, 2008 ; Hauptmann, 2021 p.12-19).

Bien que cette approche évolutionniste puisse être pertinente à une échelle générale, elle ne capture que partiellement la complexité des facteurs en jeu. En effet, la *cosmelting* (soit la fonte de minerais sulfurés et carbonatés/oxydés) est pratiquée dès le V^e millénaire av. J.-C. dans les Balkans puis au IV^e millénaire dans les Alpes.

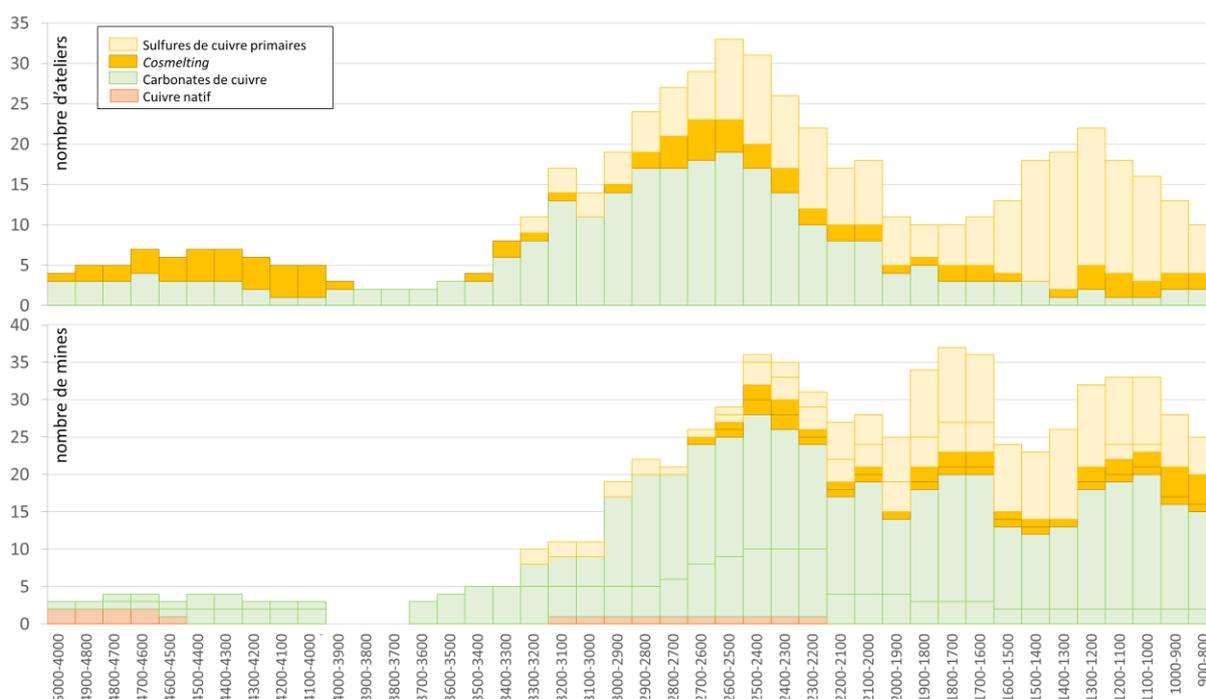


Figure 97 : Évolution du nombre de sites (ateliers en haut, mines en bas) où sont travaillés des sulfures primaires de cuivre (chalcopyrites) et/ou des carbonates et oxydes de cuivre.

¹⁵⁸ Ils ne maîtriseraient alors que la fusion réductrice à faible température et non le couplage grillage-réduction et ne produiraient du cuivre qu'en faible quantité.

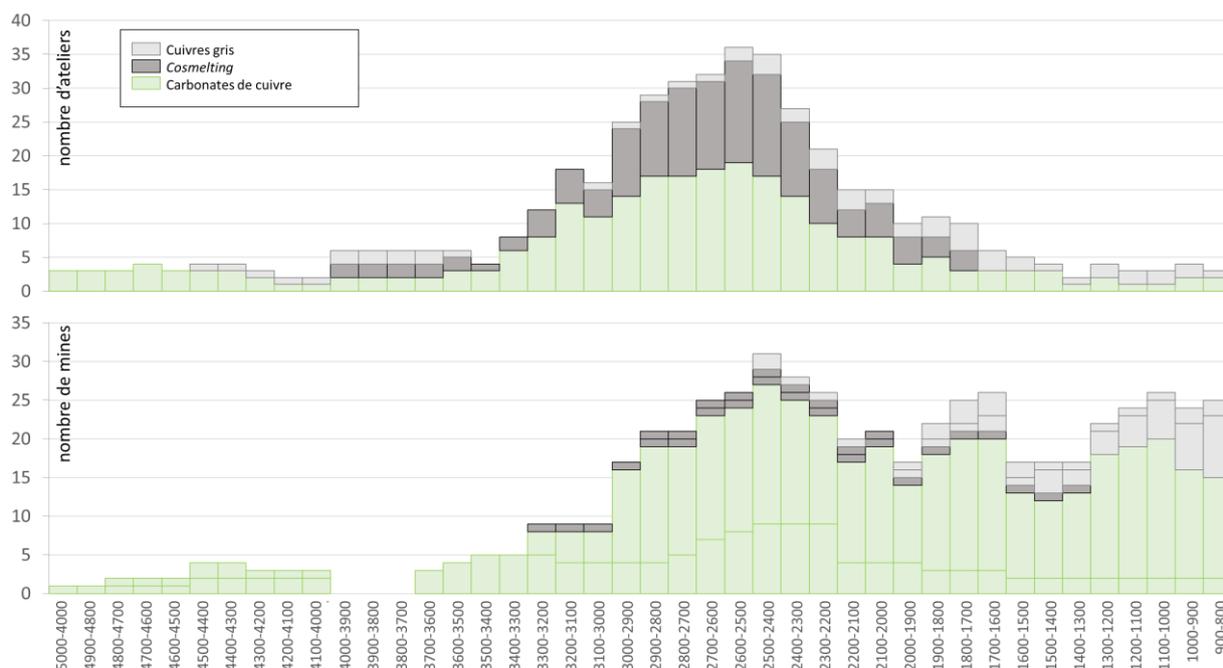


Figure 98 : Évolution du nombre de sites (ateliers en haut, mines en bas) où sont travaillés des cuivre gris et/ou des carbonates et oxydes de cuivre.

En rassemblant des données concernant les minerais exploités et donc fondus¹⁵⁹, nous pouvons aisément constater (Figure 97 et Figure 98) que :

- Les premières chalcopyrites et les premiers cuivres gris fondus ne semblent pas fondus seuls mais accompagnés de carbonates de cuivre : la fonte de ces sulfures semble d'abord pratiquée par *cosmelting*.
- Les premiers ateliers pratiquant la fonte de sulfures de cuivre primaires seuls apparaissent au III^e millénaire av. J.-C. soit bien avant l'âge du Bronze ;
- Le nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive liés aux sulfures primaires augmente progressivement et constitue près de la moitié des exploitations découvertes dès la seconde moitié du II^e millénaire av. J.-C. ;
- Des carbonates de cuivre continuent à être exploités après l'âge du Bronze ;

Afin d'observer ces évolutions plus en détail, nous avons découpé le corpus de mines et d'ateliers en 15 zones de production de cuivre¹⁶⁰ pour la période entre 3500 et 800 av. J.-C. (Figure 99) : le sud de l'Irlande (zone 1), le Pays de Galles (zone 2), le sud de la péninsule Ibérique (zone 3), les Asturies (zone 4), l'ouest des Pyrénées (zone 5), une zone Pyrénées-Massif central (zone 6), l'ouest des Alpes (zone 7), le centre et l'est des Alpes (zone 8), la Corse-Toscane-Ligurie (zone 9), l'Égée (zone 10), Chypre (zone 11), le Levant (zone 12), la Géorgie(/Arménie) (zone 13), l'Iran (zone 14), l'Oural (zone 15).

Ces 15 zones sont cohérentes en termes de périodes d'exploitation et de type de minéraux exploités. Certaines zones connaissent des reprises minières et possèdent donc plusieurs périodes d'exploitations entre 3500 et 800 av. J.-C. (il s'agit des zones 3, 8, 9, 12 et 14).

¹⁵⁹ Nous avons pris en compte les mines mal datées contrairement aux histogrammes tracés précédemment.

¹⁶⁰ Les mines et ateliers paraissant isolés en termes d'âges et/ou de localisation n'ont pas été affectés à une zone. C'est le cas notamment en Turquie dont le découpage pourrait être amélioré : de nombreux contextes mal datés peuvent difficilement d'être intégrés à la base de données.

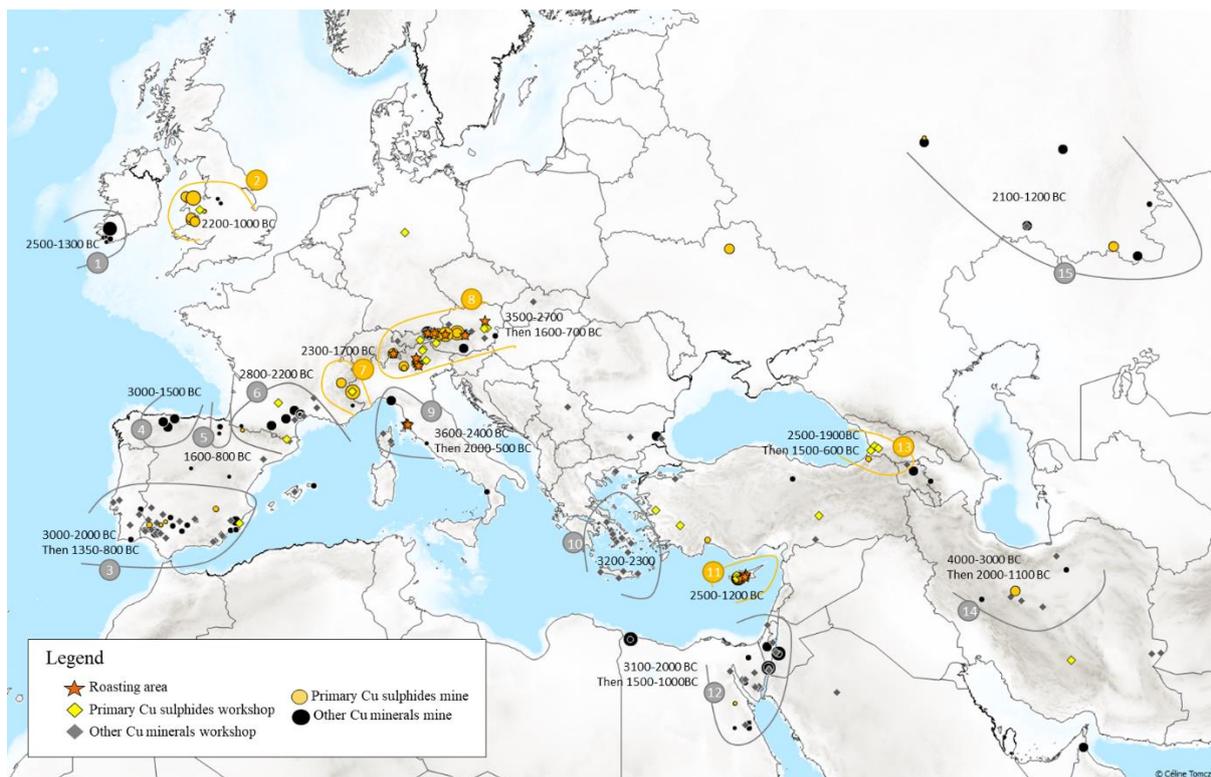


Figure 99 : Localisation des mines de cuivre et des ateliers de pyrométallurgie et principales périodes d'activité des grandes zones minières. Les zones sont numérotées de 1 à 15 ; les pastilles jaunes correspondent aux mines et ateliers exploitant majoritairement des chalcopyrites, les pastilles grises aux mines exploitant d'autres minéraux de cuivre (cuivres gris et carbonates de cuivre). La période d'activité indiquée correspond à la période la plus représentative de la période minière. Source : Tomczyk et al., 2021a.

Ce découpage permet de distinguer 5 zones pour lesquelles les minéraux de cuivre exploités et fondus sont majoritairement des sulfures primaires de cuivre. Parmi ces zones, seul l'est des Alpes (Zone 8) présente à la fois de nombreuses mines, ateliers d'extraction et aires de grillages. Dans le Pays de Galles (zone 2) et les Alpes de l'Ouest (zone 7), ce sont principalement des mines qui ont été retrouvées alors que Chypre (zone 11) et le sud de la Géorgie (zone 13) sont majoritairement caractérisés par des ateliers.

Cette répartition s'explique par le fait que les gisements de ces régions ne sont pas surmontés par d'épaisses zones d'enrichissement supergène. Pour autant, l'exploitation des gisements de cuivre primaires (soit de chalcopyrites) ne se limite pas à ces 5 zones. En effet, s'ils sont souvent minoritaires, des sites d'exploitation de sulfures de cuivre primaires sont connus dans la quasi-totalité de l'Europe de l'Ouest (Figure 100). Il n'y a que dans le nord de la péninsule Ibérique (zones 4 et 5) et dans le pourtour égéen (zone 10), qu'aucune trace d'exploitation de sulfures n'a été découverte. Le nombre assez important d'ateliers en zone 10 pourrait témoigner d'une réelle préférence pour l'exploitation de carbonates de cuivre mais il n'est pas certain que cela soit également le cas dans les zones 4 et 5 car très peu de mines et d'ateliers ont été découverts.

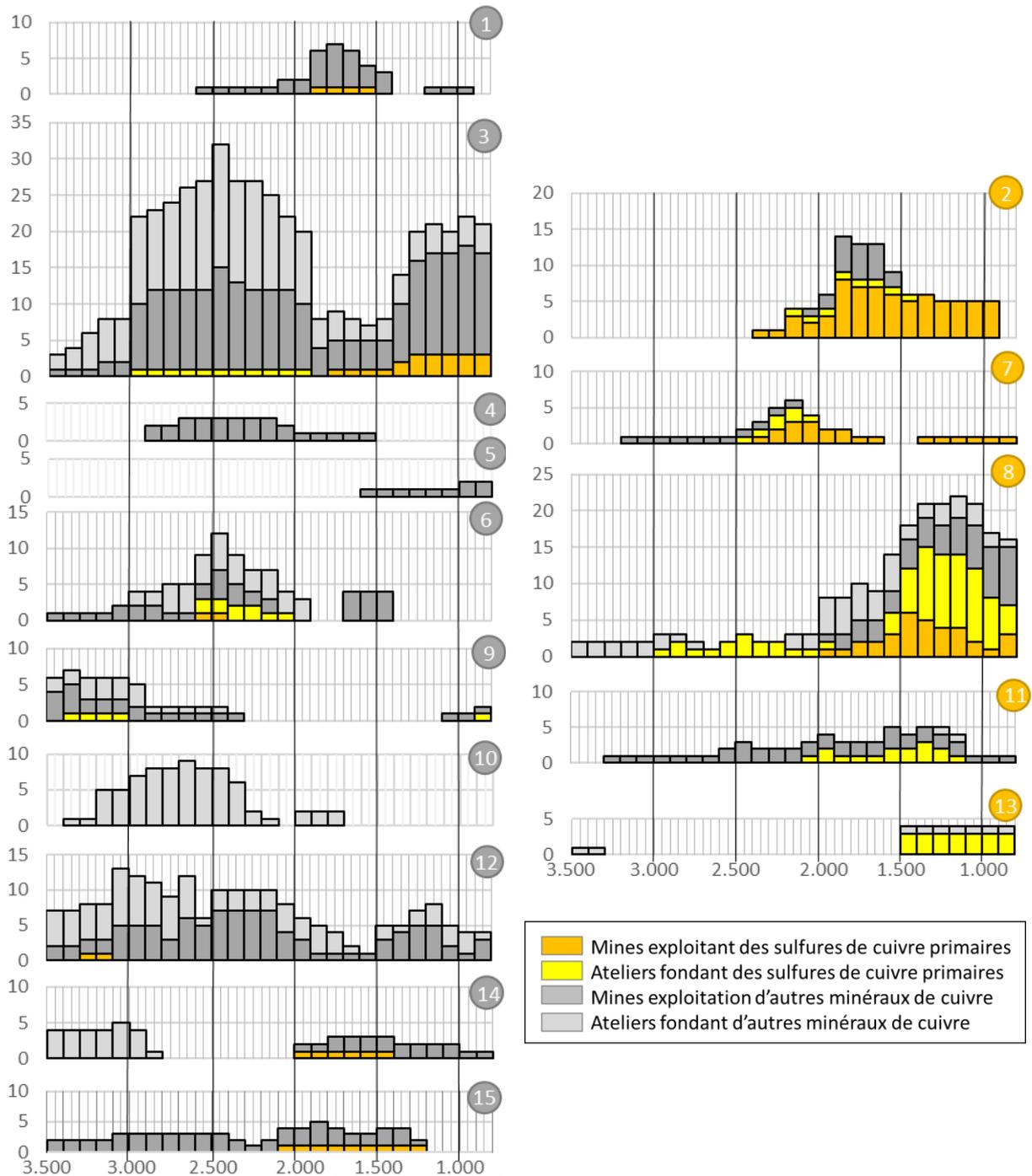


Figure 100 : Histogrammes par région : à droite zones définies comme à exploitation majoritaire de sulfures primaires, à gauche zones où les sites exploitant ces métaux sont minoritaires¹⁶¹. Source : Tomczyk et al., 2021a.

Le phénomène d'accroissement général du nombre d'ateliers et de mines de sulfures primaires (Figure 97) peut être complété par des évolutions par zones : les Alpes centrales et de l'est (zone 8) et le Pays de Galle (zone 2) expliquent à elles seules la majorité de cet accroissement.

La présence d'un faible nombre d'exploitations de sulfures dans toutes les régions (à l'exception du pourtour égéen) montre que, bien qu'il y ait maîtrise des processus permettant de fondre des chalcopyrates (sulfures primaires), il n'y a pas généralisation de cette dernière pour autant. Ainsi, dans certaines régions comme le sud de la péninsule Ibérique et le Levant, les mineurs ont continué d'extraire

¹⁶¹ Les zones 8 (Alpes de l'est) et 3 (sud de la péninsule Ibérique) présentent de nombreux cas de *cosmelting* (avec des cuivres gris pour la zone 8 et des carbonates de cuivre pour la zone 3).

préférentiellement des carbonates de cuivre malgré la présence de gisements accessibles riches en chalcopyrites. Ce fait s'explique plus aisément par un choix de production plutôt que par une prétendue absence de savoir-faire technologique. Le fait de sélectionner préférentiellement les carbonates pourrait en partie s'expliquer par la richesse en cuivre des gisements supergènes locaux vis-à-vis des gisements de sulfures localisés plus en profondeur.

Des variantes régionales de processus métallurgiques

Les processus métallurgiques employés en Europe et au Moyen-Orient diffèrent beaucoup selon les régions. Si les processus employés découlent en partie de traditions différentes, ils sont également très fortement liés aux spécificités des minerais et aux différences de ressources disponibles pour l'activité métallurgique. Par exemple les matériaux réfractaires (argiles, roches) employés pour la construction des réacteurs ou encore les essences de bois utilisées pour la combustion varient beaucoup selon les régions (Craddock, 1990).

Les gangues dans lesquelles sont contenues les chalcopyrites influencent aussi la métallurgie. Le fer reste lié au cuivre si la gangue est dépourvue de silice. Des minéraux siliceux (en particulier des quartz) sont récoltés et ajoutés aux chalcopyrites lors de la fusion réductrice afin de piéger le fer dans une scorie. À l'inverse, des minéraux de fer exogènes sont parfois ajoutés volontairement à des minerais de cuivre riches en silice pour faciliter l'extraction du cuivre (Craddock, 1990). De tels ajouts ont été reconnus en Asie Centrale à Mušiston (Tadjikistan) (Berger *et al.*, 2022) mais aussi dans une partie du Levant (Pickles et Peltenburg, 1998) ou encore dans les Cyclades (Bassiakos et Philaniotou, 2007).

Des fondants non siliceux peuvent également être apportés afin de réduire d'une centaine de degrés la température à atteindre pour que le métal entre en fusion. Les plus couramment utilisés sont le baryum et le manganèse. Plusieurs cas d'ajouts de fondants afin de diminuer les températures de fusion ont été reconnus :

- Dans les Alpes de l'Ouest, à Saint-Véran, où des amphiboles (plus précisément des riébeckites) ont été ajoutées pour créer un apport en sodium (Carozza *et al.*, 2008) ;
- Dans la *Pyrite Belt* ibérique, à Cabezo Juré, des roches mafiques ont servi également de fondant, apportant du manganèse et du baryum (Sáez *et al.*, 2003) ;
- Dans le Levant, à Fainan, des oxydes de manganèse ont été ajoutés lors de la fonte (Tylecote, 1992 p.7 ; Hauptmann, 2007 ; Abdel-Motelib *et al.*, 2012) ;
- Dans l'Oural, du baryum a été ajouté comme fondant (Artemyev et Ankushev, 2019).

L'adaptation des procédés aux minéralisations semble donc forte en Europe mais certains blocages technologiques expliqueraient la non-exploitation des minerais de certaines régions.

Prescott (2006) évoque le fait que le cuivre est associé à la pyrite dans les gisements scandinaves, ce qui rend complexe son extraction¹⁶². Cette remarque, évoquée en une ligne, est cependant intéressante car elle souligne à nouveau la difficulté de fondre des minerais de cuivre riches en fer qui, comme nous venons de l'évoquer, peut toutefois être contournée par l'ajout d'un fondant siliceux. Il serait surprenant que cette région soit la seule à ne pas avoir maîtrisé cette technique en

¹⁶² Il précise cependant également que (i) les Scandinaves possèdent une maîtrise avancée de la métallurgie d'élaboration et seraient donc capables de pratiquer une métallurgie d'extraction et (ii) qu'il existe des zones d'altération de taille réduite qui auraient pu nourrir en partie la production de cuivre locale.

Europe, d'autant plus que des processus complexes de métallurgie d'élaboration y ont été importés depuis l'Europe centrale (Bunnefeld, 2016)¹⁶³.

La non-exploitation de certaines régions cuprifères au cours de l'ensemble des périodes étudiées (5000-800 av. J.-C.) ne semble pas résider dans une absence de savoir-faire techniques (qu'ils soient miniers ou métallurgiques). Les mineurs étaient capables d'exploiter des gisements très différents et les métallurgistes pouvaient fondre des carbonates/oxydes comme des sulfures de cuivre.

Seul le facteur économique pourrait donc expliquer l'implantation de mines. L'une des manières d'appréhender cette question est d'estimer la capacité de production des mines.

V/3 Évolution de la quantité de cuivre produite en Europe de l'Ouest

V/3.a Dynamique d'ouvertures et de fermetures des mines

Périodes de croissance et de déclin du nombre de sites miniers

Observer le nombre de mines et d'ateliers de métallurgie dont l'exploitation commence et se termine par intervalles de 100 ans permet d'identifier des périodes où de nombreux sites cessent de produire du cuivre. Ces périodes de fermetures varient considérablement selon qu'il s'agisse des sites situés au Proche-Orient ou sur le continent européen.

En Europe (Figure 101), les principales périodes d'ouverture des mines de cuivre sont : le début du III^e millénaire, 2500 av. J.-C., 2000-1700 av. J.-C., et 1400-1200 av. J.-C. Des fermetures surviennent au début du II^e millénaire, vers 1600 av. J.-C., et entre 1100 et 900 av. J.-C.

Les dynamiques observées pour les ateliers de métallurgie diffèrent légèrement. Des ouvertures d'atelier ont également lieu au début du III^e millénaire et des fermetures au début du II^e millénaire. Mais de nombreux sites cessent leur activité vers 2600-2200 av. J.-C. (alors que le nombre de nouvelles mines est en légère croissance).

¹⁶³ Les motifs de l'absence d'exploitation du cuivre local pourraient trouver des explications d'ordre économique que nous discuterons en partie 2.

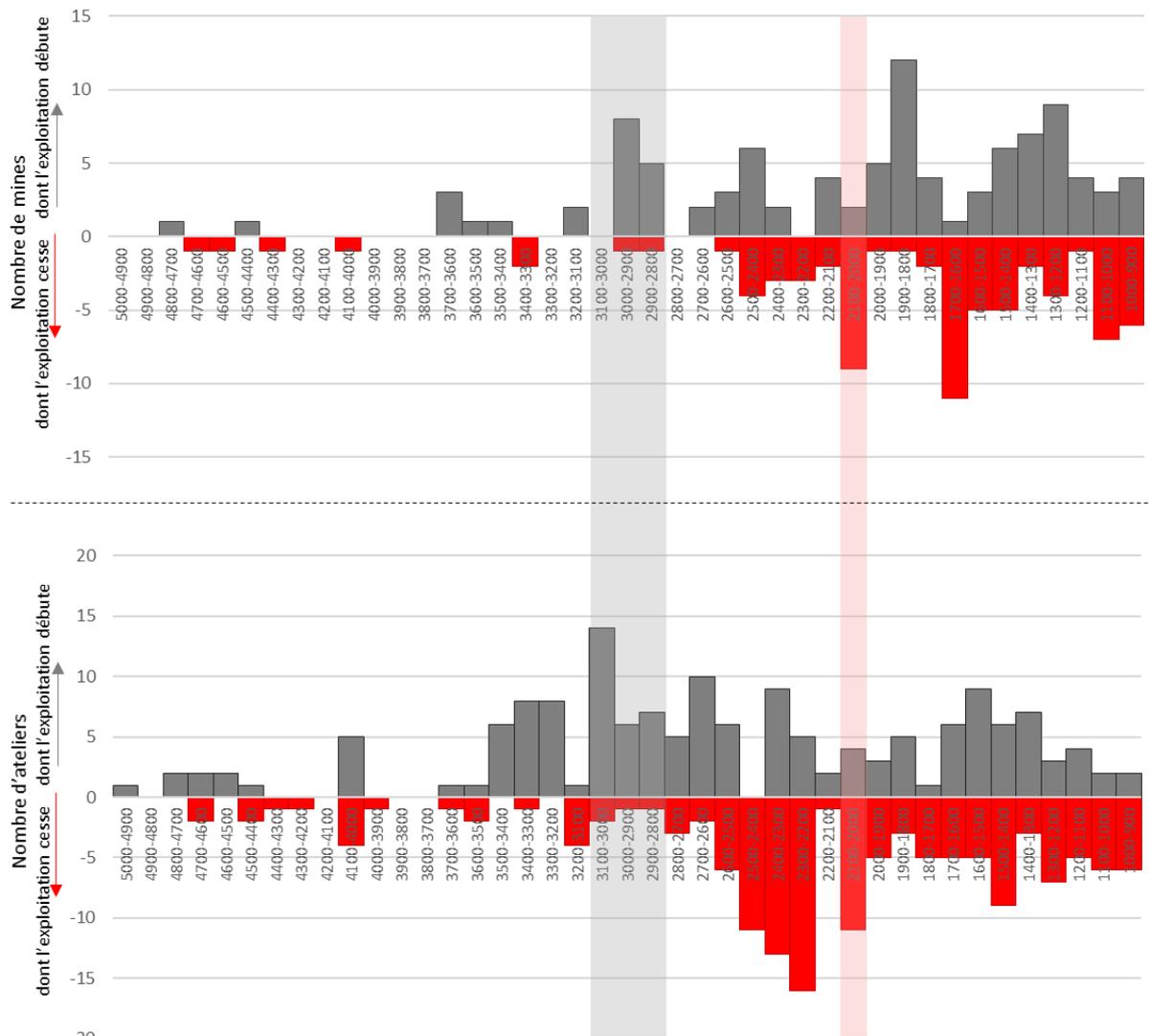


Figure 101 : Ouvertures et fermetures de mines (graphique du haut) et d'ateliers (graphique du bas) observées en Europe entre 5000 et 800 av. J.-C.

Au Proche et Moyen-Orient (Figure 102), une période d'ouverture de sites miniers pourrait avoir lieu aux V^e et IV^e millénaires av. J.-C.

Le nombre d'ouvertures et de fermetures de mines et d'ateliers montre ensuite une corrélation relative : les périodes d'activité et d'inactivité semblent équilibrées, sans grandes fluctuations observées au cours des III^e et II^e millénaires av. J.-C., à l'exception possible d'une légère période de fermeture vers 2000-1800 av. J.-C.

Une période de forte ouverture d'ateliers aurait lieu au 14^e siècle av. J.-C. Elle est directement suivie par un pic très net de fermetures de mines et d'ateliers à partir de 1300 av. J.-C. Cette diminution du nombre de mines de cuivre ne peut pas être clairement attribuée à une crise majeure, car dans ces régions, elle pourrait être liée à un changement dans les ressources exploitées, marquant une transition du cuivre vers le fer ;

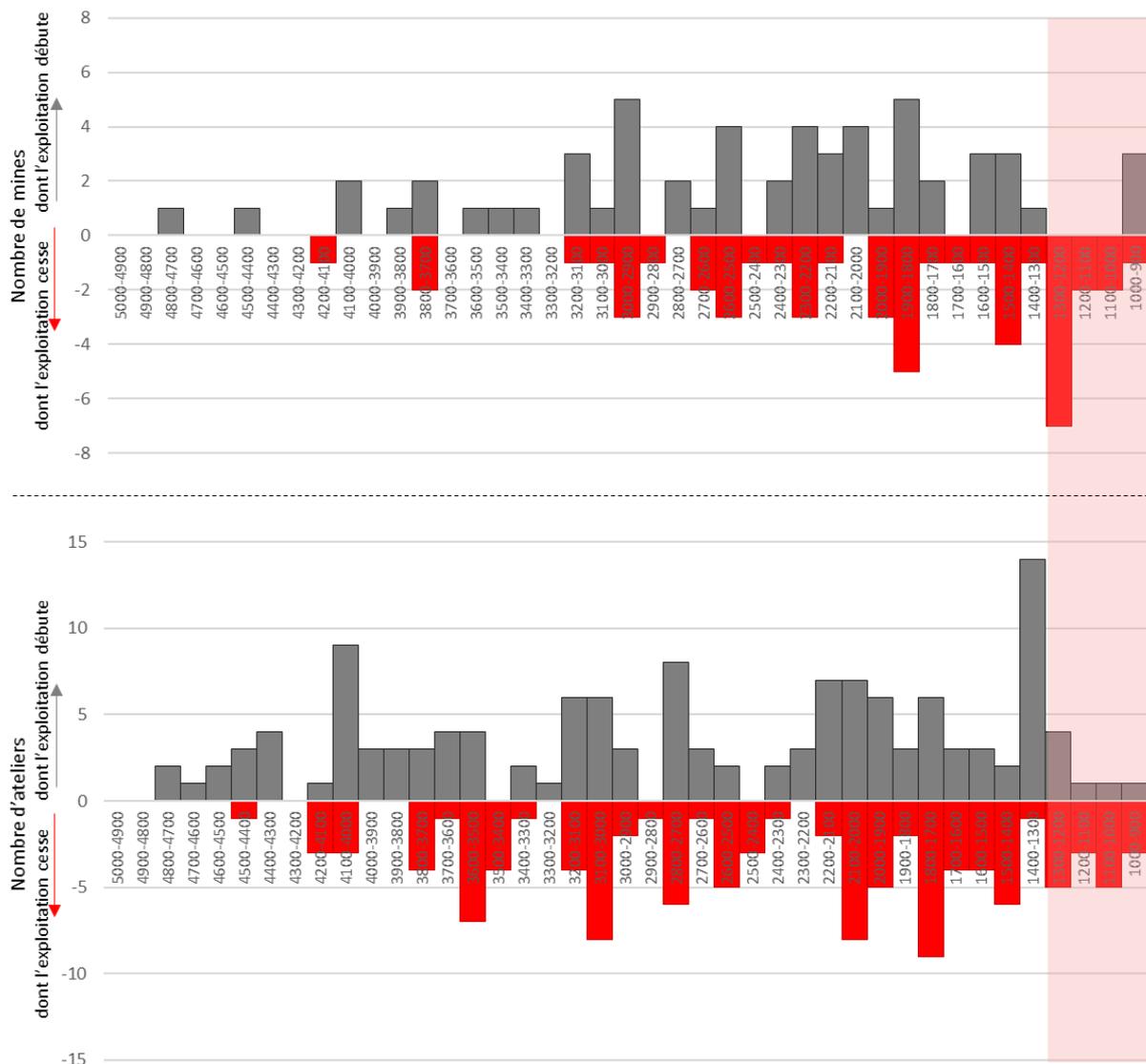


Figure 102 : Ouvertures et fermetures de mines (graphique du haut) et d'ateliers (graphique du bas) observées aux Proche et Moyen-Orient entre 5000 et 800 av. J.-C.

En conclusion, le dénombrement des fermetures mène à deux observations. Tout d'abord, les ateliers et les mines ne présentent pas toujours des dynamiques identiques et seules quelques périodes semblent clairement marquées par une diminution à la fois du nombre de mines et d'ateliers. Ensuite, nous pouvons constater que les périodes de fermeture ne dépassent pas une centaine d'années en Europe de l'Ouest et seraient donc de courte durée.

Crises commerciales et exploitation minière

Le dénombrement des sites liés à la production minière montre des variations importantes. Ces variations pourraient être en lien avec des besoins variables en métaux des sociétés mais pourraient également refléter de nouveaux tracés des réseaux d'échange voire même des crises commerciales.

Trois de ces ruptures sont assez nettes.

Une première crise vers 2100-2000 av. J.-C. ?

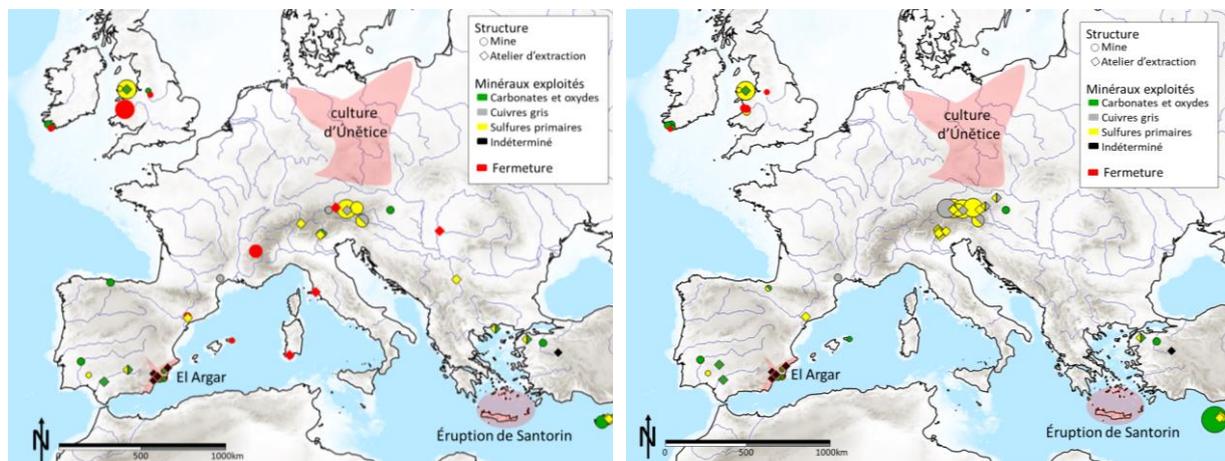
Une première diminution du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive s'observe vers 2100-2000 av. J.-C. soit au tout début de l'âge du Bronze d'Europe occidentale. Il est très probable que cette baisse apparente soit en grande partie liée aux difficultés de datation de certaines exploitations :

- Sur les 9 mines qui ferment, 6 sont mal datées ;
- Sur les 11 ateliers qui ferment, 7 sont mal datés.

Une seconde crise vers 1600 av. J.-C. ?

Une seconde crise, marquée par la fermeture de mines en Europe occidentale, aurait eu lieu vers 1700-1500 av. J.-C. Cette période est marquée par des bouleversements culturels, souvent attribués à des événements climatiques et environnementaux (Meller *et al.*, 2013) :

- Dans le sud du monde égéen, l'éruption de Santorin a conduit à des variations brutales du niveau de la mer (Satow *et al.*, 2021) et à la fin de la civilisation minoenne (voir notamment Friedrich, 2013) ;
- En Europe centrale, la fin de la culture d'Únětice pourrait être liée à une détérioration du climat (Kneisel *et al.*, 2019) ;
- Dans le sud-est de la péninsule Ibérique, des périodes de sécheresse aboutiraient à une diminution de la production de céréales vers 1550 av. J.-C. et à la fin de la culture d'El Argar (Lull *et al.*, 2013).



Néanmoins, malgré les perturbations climatiques, la plupart des sociétés montrent des signes de continuité culturelle et de résilience et continuent de développer leurs technologies métallurgiques et leurs réseaux commerciaux (Meller *et al.*, 2013). Par exemple, dans le sud de la péninsule Ibérique, les populations fortement impliquées dans la production de métal deviendraient de plus en plus hiérarchisées (Legarra Herrero, 2021). Cette période de troubles pourrait correspondre à une période de modification des routes commerciales, potentiellement marquée par de nouvelles relations d'alliances, ce qui expliquerait que la production de bronze diminue dans certaines régions telles que le centre de l'Europe (Svizzero et Tisdell, 2018).

Un autre argument en faveur de l'hypothèse d'un changement des axes d'échange réside dans le fait que :

- Les mines et ateliers qui cessent leur activité sont majoritairement localisés dans les îles Britanniques et dans le centre de la Méditerranée. Ils ne sont donc pas en contact direct avec les principales zones de troubles (Figure 103) ;
- Les années 1600 av. J.-C. sont directement suivies d'une période de forte activité minière des mines alpines ou encore chypriotes. Les nouveaux axes d'échange pourraient profiter à ces régions.

En l'absence de données concernant les productions minières et leur devenir, il n'est pas donc possible de déterminer si une crise commerciale a pu avoir lieu.

La crise de 1200 av. J.-C.

Une troisième crise, celle de 1250/1150 av. J.-C.¹⁶⁴ est visible dans le nombre de fermetures de sites au Proche-Orient. Cette période est marquée par des conflits affectant l'est de la Méditerranée (dont l'Égypte, les Hittites, les Mycéniens mais aussi Chypre) et la destruction violente de nombreux sites (Kreimerman, 2017). Elle est différente de la crise potentielle de 1600 av. J.-C. car elle a impliqué l'ensemble des sociétés étatiques¹⁶⁵ de la Méditerranée orientale. Cette crise présente également l'avantage d'avoir fait l'objet de beaucoup de travaux de recherche et d'être donc largement documentée par l'archéologie et les textes (Sandars, 1987 ; Drews, 1993 ; Cline, 2015).

La crise de 1250/1150 av. J.-C. ne se caractérise pas par de nombreuses fermetures de mines en Europe de l'Ouest. Au contraire, vers 1200 av. J.-C. une dizaine de mines s'ouvrent sur le continent européen¹⁶⁶. Ainsi, si des mines et ateliers ferment à Chypre et dans les Alpes orientales, dix ateliers ouvrent vers 1250 av. J.-C. dans la péninsule d'Oman et de nombreux sites miniers et ateliers commencent à exploiter le cuivre en péninsule Ibérique. L'hypothèse d'une modification des axes d'échange mérite donc à nouveau d'être posée (Figure 104).

¹⁶⁴ La datation précise de la crise reste à ce jour mal connue.

¹⁶⁵ Donc des sociétés beaucoup plus hiérarchisées que celles de la culture d'Únětice.

¹⁶⁶ Le lien avec les événements en Méditerranée orientale est néanmoins complexe à définir car, s'il convient de rappeler que la datation des mines n'est pas précise, l'ouverture des mines semble précéder la crise.

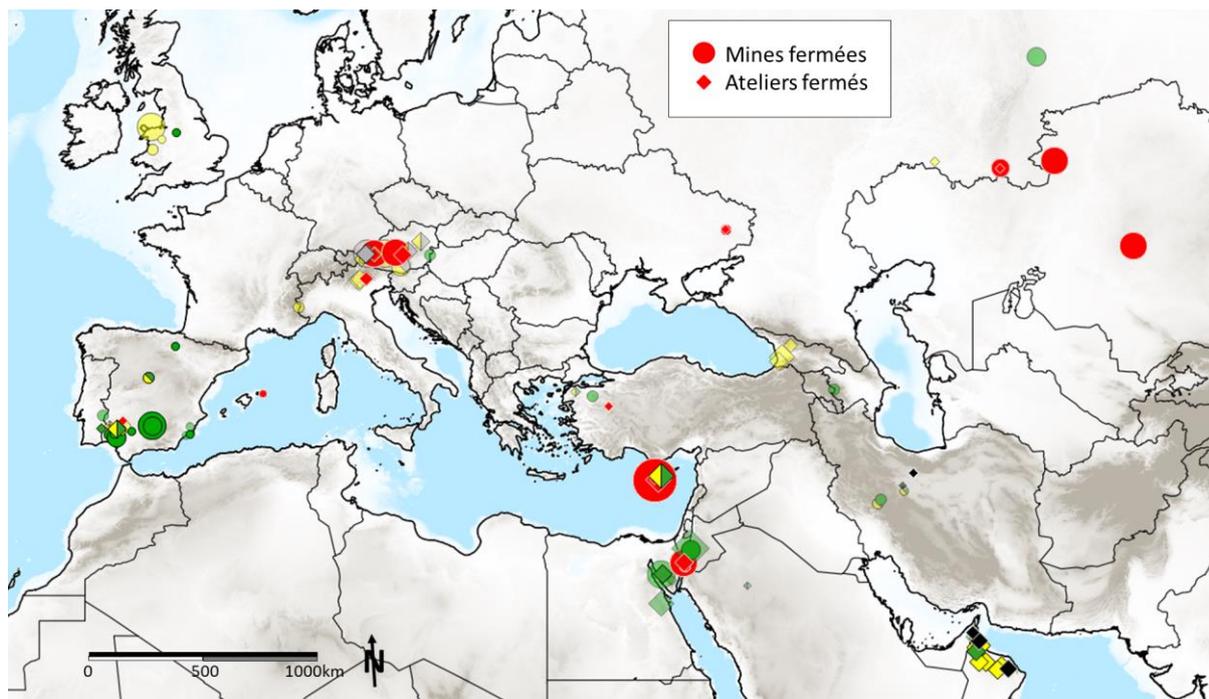


Figure 104 : Localisation des sites dont la production cesse (en rouge) entre 1300 et 1200 av. J.-C., et des sites précédemment en exploitation et dont l'exploitation continue (en transparence), des sites dont la production débute (en couleur) entre 1300 et 1200 av. J.-C.

L'hypothèse que Chypre serait l'une des régions où les productions seraient les plus affectées par la crise est intéressante car elle concorde avec les constatations faites par Kassianidou (2015) concernant les lingots en circulation dans l'est de la Méditerranée. En effet, la crise de 1200 av. J.-C. aurait entraîné une modification des grands axes d'échange dans l'est de la Méditerranée : Chypre aurait alors dirigé ses exportations vers le bassin égéen, et non plus vers le Levant. Le Levant se serait alors approvisionné localement dans les districts de Faynan et Timna¹⁶⁷ (Kassianidou, 2015).

Le terme d'effondrement s'applique donc mal aux productions minières de cuivre, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'ensemble des exploitations ne cessent pas leur activité. Ensuite, si les circuits d'échanges existants avaient été modifiés, certains axes semblent avoir perduré et se seraient même renforcés.

V/3.b Estimation de la quantité de cuivre produite

Nécessité d'estimer les tonnages produits

Le nombre de mines en exploitation varie au cours du temps mais dénombrer les mines en lien avec l'exploitation d'un métal dans une région n'offre pas la possibilité d'observer la quantité de métal issue des mines et donc mise en circulation à une période donnée. Nous pourrions supposer que la quantité de cuivre produite se corrèle au volume de vides laissés par l'extraction. Juger de la capacité de production d'une mine uniquement en observant son volume de vides ne donne toutefois qu'une vague idée de l'importance de sa production pour deux raisons principales :

¹⁶⁷ Où la persistance des exploitations s'observe sur les cartes.

- Une partie du volume de vides peut ne pas être liée à la présence de minerais mais à un besoin d'accès à ces derniers¹⁶⁸ ;
- Pour un même volume de vides laissés, la quantité de cuivre obtenue peut être très variable selon la richesse de la minéralisation.

Il est donc plus pertinent de considérer la quantité de métal extrait de chaque mine que le volume de vides laissés par les exploitations.

Pourtant, très peu d'études ont cherché à calculer des productions. Pour les métaux autres que le cuivre, nous n'avons recensé que 3 études.

Atelier	Métal	Période	Production estimée	Référence
Laurion (Grèce)	Ag/Pb	500-300 av. J.-C.	3 500 t Ag 1 400 000 t Pb	Conophagos, 1980 p.145-149
Sakdrisi (Géorgie)	Au	3400-2400 av. J.-C.	460 kg	Stoellner <i>et al.</i> , 2014
Kestel (Turquie)	Sn	3240-2200 av. J.-C.	115 t	Yener, 2008

Tableau 18 : Mines d'étain, d'or et de plomb-argent dont des tonnages extraits ont été calculés.

Concernant le cuivre, seules deux grandes régions cuprifères (le Tyrol autrichien (Pernicka *et al.*, 2016) et le sud de l'Irlande (Timberlake, 2017 ; Jackson, 1984)) ainsi qu'une dizaine d'autres mines de cuivre ont fait l'objet d'une quantification de leur production (Tableau 19).

Mine	Période	Production estimée	Référence
Ai Bunar (Bulgarie)	4800-4300 av. J.-C.	500 t	Chernych, 1978
El Aramo (Espagne)	4000-1500 av. J.-C.	350 t	de Blas Cortina, 2014 p.52
Kargaly (Russie)	3000–1400 av. J.-C.	150 000 t	Chernykh, 1998
Ishkinino (Russie)	3100–2400 av. J.-C. 1610-1210 av. J.-C.	750 t	Zaykov <i>et al.</i> , 2012
Bir Nasb (Égypte)	2900-2600 av. J.-C.	5 000 t	Rothenberg, 1987
Kenkazgan (Kazakhstan)	2425-1950 av. J.-C.	30 000-50 000 t	Chernykh, 1992
Saint-Véran (France)	2400-1700 av. J.-C.	1 400 t	Rostan <i>et al.</i> , 2002
Twll y Mwyn (RU)	1910-1700 av. J.-C.	1-2 t	Timberlake, 2003
Ballyrisode (Irlande)	1853-1619 av. J.-C.	14-243 kg	O'Brien, 2003
Great Orme (RU)	1800-1000 av. J.-C.	35 t 30-175 t 1 769 t	Timberlake, 2017 Lewis, 1996 Randall, 1995
Mount Gabriel (Irlande)	1800-1400 av. J.-C.	163 t 312 t	Jackson, 1984 O'Brien, 1994

Tableau 19 : Mines de cuivre dont des tonnages extraits ont été calculés.

Les méthodes de calcul appliquées pour obtenir ces estimations sont rarement précisées dans les publications. La nécessité d'une méthode de calcul uniforme est manifeste car, bien qu'appuyées par des données de terrain, les estimations peuvent diverger considérablement pour une même mine selon les auteurs (Tableau 19 : les estimations pour la mine de Great Orme varient entre 30 et 1769 t). Ces variations s'expliquent par les différences d'éléments pris en compte pour réaliser les calculs (volume du vide réel ou extrapolé, choix de la teneur moyenne...). Les estimations portant sur de grandes régions sont tout aussi approximatives : Jackson (1984) estime une production de 1463 t de cuivre pour l'ensemble de l'Irlande pour uniquement le Bronze ancien quand Timberlake (2017) ne l'estime qu'à 24 t entre le Chalcolithique et le Bronze final ; un rapport de 1 à 60 !

¹⁶⁸ Des travers-bancs d'accès peuvent être creusés dans des parties stériles mais ces derniers ne semblent apparaître qu'au début de l'âge du Fer : aux périodes antérieures les creusements se font généralement directement dans la minéralisation (O'Brien, 2015 p.15).

Données permettant d'estimer la production de cuivre

Discuter des capacités de production de différentes régions demande que les données de production soient comparables et donc issues d'un même mode de calcul. Ce calcul ne peut malheureusement pas être appliqué à l'ensemble des mines recensées car il nécessite de connaître :

- Le volume extrait ;
- Le type de minerai de cuivre extrait ;
- La teneur moyenne du gisement exploité.

Il n'est pas possible de proposer une estimation de la production lorsqu'une ou plusieurs des données citées ci-dessus est manquante. Ainsi les exploitations chypriotes ne peuvent pas être définies bien qu'il s'agisse d'un centre de production majeur. En effet, trop peu de galeries protohistoriques y ont été découvertes pour proposer une estimation de sa production en utilisant les vestiges miniers.

Il pourrait également être intéressant d'estimer des quantités de cuivre produites à partir des scories retrouvées. Un tel calcul permettrait de vérifier l'adéquation des productions calculées à partir des mines et des ateliers de métallurgie extractive qui leur sont reliés. Ce calcul partant des scories s'est vite avéré impossible à mener pour plusieurs raisons :

- La quantité de scories présentes dans un atelier n'est que très rarement pesée (en particulier lorsque ces dernières forment des monticules) ;
- Les scories peuvent être refondues pour extraire le cuivre résiduel qu'elles contiennent encore (Burger, 2008 p.48) et il n'est donc pas certain que la quantité de scories retrouvées corresponde à la totalité des scories produites ;
- La quantité de cuivre piégé dans les scories varie énormément selon les minerais fondus et les processus pyrométallurgiques employés (Burger, 2008 p.265) : les scories des sites d'Al-Claus et de La Capitelle contiennent respectivement 17 % et 9 % de cuivre résiduel alors que les scories retrouvées à Aqua Fredda et Saint-Véran n'en contiennent jamais plus de 4 %.
- La quantité de cuivre piégé dans les scories peuvent varier d'une scorie à l'autre : Catapotis et Bassiakos (2007) précisent que les scories égéennes présentent des teneurs en cuivre de l'ordre de 0,5 à plus de 10 %¹⁶⁹.

Estimer des productions à partir de scories cuivreuses s'avère ainsi impossible car les deux éléments principaux du calcul (la quantité de scories et leur teneur en cuivre) sont rarement disponibles. Il n'est donc pas surprenant que si peu d'études s'y soient risquées (Tableau 20).

Atelier	Période	Cu estimé	Référence
Feinan (Jordanie)	2900-2200 av. J.-C.	300-500 t	Hauptmann <i>et al.</i> , 1992
Dzhezkazgan (Kazakhstan)	1800/1700- 1200 av. J.-C.	30 000-50 000 t	Rubinstein et Barsky, 2002 p.96

Tableau 20 : Ateliers de métallurgie extractive du cuivre dont des tonnages extraits ont été calculés.

Un calcul de la production extractible

La remarque précédente concernant les quantités de cuivre encore présent dans les scories met en évidence la grande complexité à déterminer avec précision la quantité de cuivre réellement récupérée. En effet, une telle évaluation nécessite une estimation des pertes survenues tout au long des différentes étapes de la chaîne opératoire, y compris la minéralurgie et la métallurgie extractive. Sans ces données, il est impossible d'estimer l'écart entre la quantité de métal obtenue et celle initialement contenue dans le minerai. Les processus techniques demeurent largement méconnus et peu d'études permettent de

¹⁶⁹ Les scories découvertes à Kephala contiennent même entre 0,5 et 15 % de cuivre.

définir les rendements des multiples procédés de métallurgie extractive, lesquels varient selon les régions et les périodes chronologiques. Ainsi, en raison de l'impossibilité d'évaluer précisément les pertes survenues lors du processus métallurgique, nous ne pouvons qu'estimer la quantité de métal théoriquement extractible et non pas la production finale. De plus, notre estimation n'ayant pas fait l'objet d'un travail de vérification de terrain, elle ne s'appuie que sur les données publiées dont la qualité est variable.

Détail du calcul de la production d'une exploitation

Si les modes de calcul des anciennes productions minières peuvent varier, ils se basent néanmoins tous sur la proportion de minerai (et par extension la proportion de stérile) dans les vides laissés. Nous proposons un calcul pouvant se résumer par la formule suivante :

Quantité de cuivre $Q = V \times d \times t$ où :

- Q est la quantité de cuivre en tonne
- V correspond au volume d'extraction en m^3
- d, la densité des minerais de cuivre
- t, la teneur en cuivre du gisement.

La quantité de cuivre Q, ainsi obtenue divisée par la durée d'activité de la mine (T en années) permet ensuite d'estimer une quantité de cuivre extractible par an. Il faut savoir que les données prises en compte présentent toutes des incertitudes tant pour ce qui concerne le volume que la densité des minerais et la teneur en cuivre.

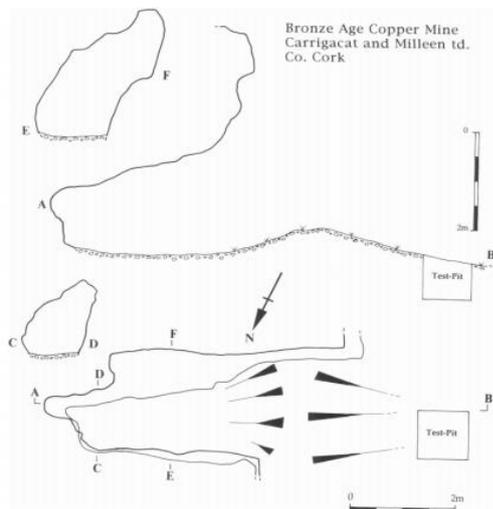
Calcul du volume des vides

Des informations précises ont été recherchées afin d'estimer le volume des chantiers miniers (soit des zones exploitées pour leurs minéralisations excluant les conduits d'accès et possibles galeries d'exhaure). La qualité des données de volumes récoltées dépend alors de plusieurs facteurs :

- L'état de conservation de la mine : des reprises minières postérieures, des effondrements et/ou comblements des structures peuvent avoir fait disparaître ou avoir rendu inaccessibles certaines portions des mines ;
- La difficulté d'identifier les zones minéralisées : il peut être complexe pour quelqu'un ne disposant pas de bonnes connaissances géologiques de faire la distinction entre les creusements nécessaires à l'accès au gisement et ceux correspondant à l'exploitation du gisement en lui-même. Il est parfois nécessaire d'abattre des portions stériles pour accéder au gisement, ce qu'une étude géologique détaillée de la mine permet de vérifier ;
- La précision des données publiées : elles varient selon qu'il s'agisse de relevés 3D, de plans, de descriptions textuelles ou encore de simples photographies avec échelle.

L'estimation des volumes extraits (V), correspondant à l'exploitation de zones minéralisées aura été la donnée la plus complexe que nous avons eu à recueillir et estimer. Seules 56 % des mines prises en compte ont fait l'objet d'une estimation de volume et/ou présentent une description détaillée (longueur, largeur et hauteur) des volumes laissés par l'extraction. Ces descriptions peuvent se présenter sous forme d'informations textuelles ou sous la forme d'un plan. Les 44 % des mines restantes présentent une incertitude très importante du volume extrait, pouvant atteindre $\pm 25\%$ car les estimations s'appuient sur des données imprécises : une ou plusieurs dimensions sont manquantes et n'ont pu être que grossièrement estimées à partir de photographies.

L'estimation des marges d'erreur s'appuie sur des cas où au moins deux types d'informations sont disponibles : un volume estimé, une description complète, un plan ou encore une photo. Par exemple, l'écart de précision entre un plan et une description textuelle précise¹⁷⁰ peut être estimé à environ 10 % en se basant sur la mine de Carrigacat (Irlande). Un volume approximatif calculé à partir de la même publication (O'Brien, 2003) serait de 15 m³ (5 x 1,5 x 2) d'après le plan fourni et de 16,698 m³ (5,06 x 1,65 x 2) en se basant sur le texte accompagnant le plan.



« The mine working is driven east/north-east (060?) into the base of the rock cliff for a **distance** of 5.06m (3.45m from entrance portal roof to backwall). The entrance opening varies in internal **width** from 1.6m (base) to 1.73m (middle) at the portal, from 1.2m (base) to 1.8m (top) in the mid-section, and from 0.4m (base) to 1.05m (top) at the backwall (all rock face measurements). The **height** to a rubble floor ranges from 3.4m at the portal and 1.82m in the mid-section, to between 1.1m and 1.3m at the back. »

Figure 105 : Plan et description du volume de la mine de Carrigacat dans O'Brien, 2003.

Les volumes utilisés ont été divisés en quatre catégories selon le niveau de précision :

- Excel (excellent) : présence de relevés topographiques précis, existence de modèles 3D ou estimations de tonnages de minerais extraits disponibles (le volume est alors défini par un x) ;
- Cor (correct) : volume déduit de schémas et/ou de textes descriptifs détaillés, identification assez claire des phases de reprises minières postérieures ;
- Dim (dimension) : une dimension (souvent la profondeur) est mal définie, les phases de reprises ne sont pas clairement identifiées ;
- Mauv (mauvais) : les mines ne sont caractérisées que par une photo ou un schéma très peu précis.

Nous avons calculé les volumes dès lors que nous disposions de suffisamment d'informations : 20% des volumes ont été classés Excel, 40% Cor, 35% Dim et 4% Mauv. Des estimations plus précises permettraient cependant de diminuer la marge d'erreur du calcul de production.

Les grandes mines dont le volume est mal estimé biaisent particulièrement les estimations. Les mines exploitées entre 4400 et 4100, 2300 et 2000 et 1300 et 800 av. J.-C. sont celles présentant le plus d'incertitudes concernant les volumes totaux extraits (Figure 106).

¹⁷⁰ Une description textuelle est souvent plus adéquate car les plans étant souvent de petite dimension dans les publications, il est complexe d'estimer précisément les dimensions.

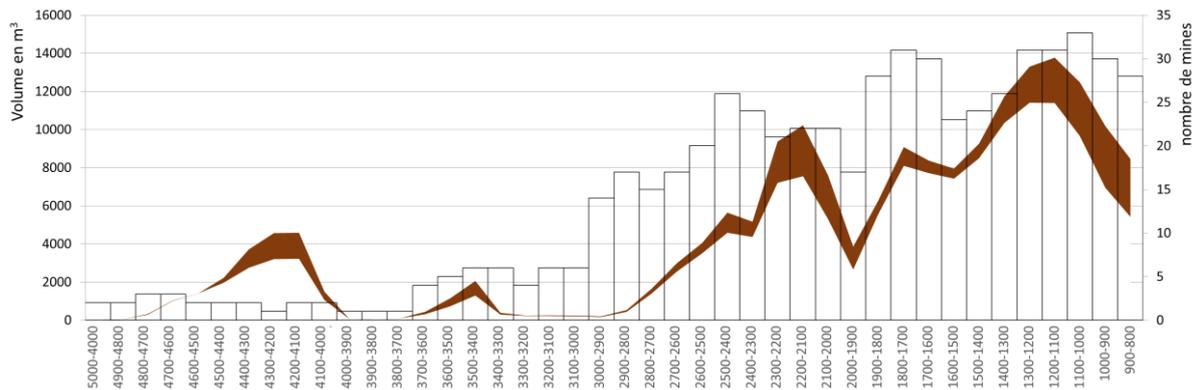


Figure 106 : Volumes calculés par pas de 100 ans : l'épaisseur de la courbe obtenue (en marron) souligne des écarts importants entre les volumes maximums et minimums calculés.

Minerais exploités et teneur en cuivre

Une fois le volume estimé, il est nécessaire de déterminer la densité du minerai extrait ainsi que la teneur du gisement. La densité du minerai peut être évaluée en connaissant les minéraux de cuivre présents et le type de gangue. Cependant, les descriptions des assemblages minéralogiques sont en général peu précises dans les publications et seuls les minéraux de cuivre dominant sont toujours clairement identifiés dans les références utilisées.

Minéral	Formule chimique	Cu wt%	densité
Cuivre Natif	Cu	100 %	8,93
Cuprite (cup)	Cu ₂ O	88,8 %	5,95
Malachite (mal)	CuCO ₃ ·Cu(OH) ₂	57,3 %	3,983
Azurite (az)	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55 %	3,8
Chalcocite (cc)	Cu ₂ S	79,85 %	5,65
Digénite (dg)	Cu ₉ S ₅	78,1 %	5,628
Chalcopyrite (cpy)	CuFeS ₂	34,5 %	4,2
Bornite (bn)	Cu ₅ FeS ₄	63,3 %	5,07
Brochantite (bh)	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆	56,2 %	3,97
Cuivres gris (fh) - Tétrahédrite (td)	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	34,8 %	4,97
Cuivres gris (fh) - Tennantite (td)	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	47,5 %	4,62

Tableau 21 : Densités prises en compte pour les principaux minéraux de cuivre (la densité prise en compte correspond à l'ensemble de l'assemblage décrit dans les proportions publiées).

La teneur du gisement est issue de travaux de géologues¹⁷¹. Il n'est pas toujours possible de connaître la teneur en cuivre d'une mine précise. Dans ce cas de figure, des teneurs mesurées pour des gisements du même type et dans la même région ont été considérées : dans l'est des Alpes, les teneurs moyennes considérées sont de l'ordre de 4 à 5% ; dans le Pays de Galles de 2 à 3,6 % ; dans le sud de la péninsule Ibérique, les teneurs moyennes varient de 2 à 14 % du fait de la présence d'importantes zones d'altération supergène. Une marge d'erreur supplémentaire est donc induite par le fait que la teneur en cuivre peut varier au sein d'une même minéralisation. Ceci est particulièrement marqué dans les zones qui présentent une forte altération supergène pouvant conduire à un enrichissement de surface important. Par exemple, à Chypre, la teneur moyenne en cuivre des gisements varie de 2 à 4,5 % mais

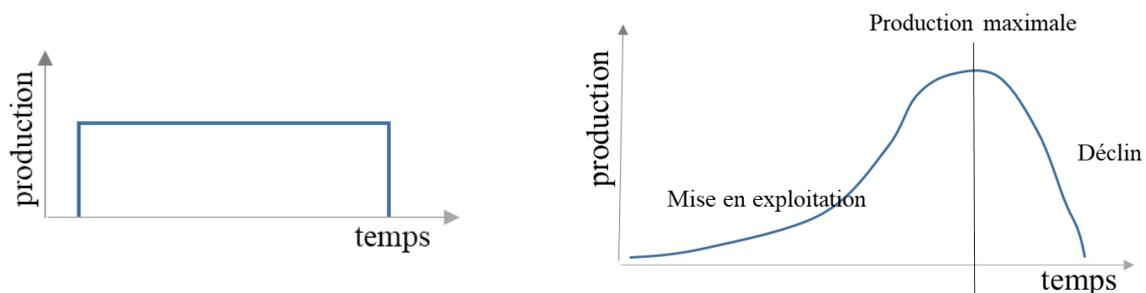
¹⁷¹ Les teneurs calculées actuellement sont pensées avec des contraintes de mécanisation et portent sur des surfaces incluant des zones de roches. Ainsi, si l'exploitation d'une veine de 15 cm d'épaisseur demande d'abattre un plus gros volume de la roche pour que le mineur puisse progresser dans les galeries ; c'est ce volume qui est compris dans la teneur considérée.

peut très localement atteindre 20 % dans les portions les plus riches des zones d'enrichissement supergène (Constantinou 2007 p.342).

Production théorique par tranche de 100 ans

Tout le cuivre potentiellement extrait d'une mine n'a pas nécessairement été récupéré. Des pertes ont pu se produire au cours de l'extraction minière et du traitement minéralurgique (tri et concassage du minerai) et lors des processus de métallurgie extractive. Ces processus varient beaucoup selon les périodes et les régions et sont complexes à quantifier. Par exemple, deux travaux expérimentaux menés sur le même type de minerais de cuivre et visant à étudier le même processus pyrométallurgique dans le Tyrol ont estimé une perte en cuivre allant de 13 % (Stöllner *et al.*, 2011) à 25 % (Zschocke et Preuschen, 1932). Nous avons donc choisi de ne pas prendre en compte ces pertes, qui auraient été évaluées arbitrairement. Les productions calculées correspondent donc à des productions extractibles et non à la production finale (qui ne peut qu'être moindre). Il est cependant à souligner que le procédé de réduction « non scorifiant » (en une seule étape de réduction à ~700 °C réalisée le plus souvent dans des foyers en cuvette et/ou des « vase-fours ») engendre une forte viscosité des scories et par conséquent une mauvaise séparation entre la scorie et le métal provoquant une perte importante de cuivre dans les scories (Bourgarit et Mille, 2005), ce qui n'est pas le cas du couplage grillage-réduction de chalcopirites car le cuivre se sépare par gravité de la scorie ferreuse produite (Hauptmann, 2003). De meilleurs rendements sont donc théoriquement obtenus lorsque des sulfures de cuivre contenant du fer sont grillés puis fondus sous atmosphère réductrice.

La division de la production extractible par le nombre d'années d'exploitation fournit alors une évaluation de la production annuelle mais une simple division implique une production constante par an, depuis la mise en exploitation jusqu'à la fermeture de la mine (cas de gauche dans la Figure 107). Une correction permettant d'obtenir des courbes de production en cloche a été appliquée (à droite dans la Figure 107). Faute de modèle ethnographique, cette dernière s'inspire de courbes modernes.



L'application de cette correction conduit à un résultat proche de celui obtenu en considérant une production constante. Dans la suite de notre propos, nous avons conservé la projection en cloche.

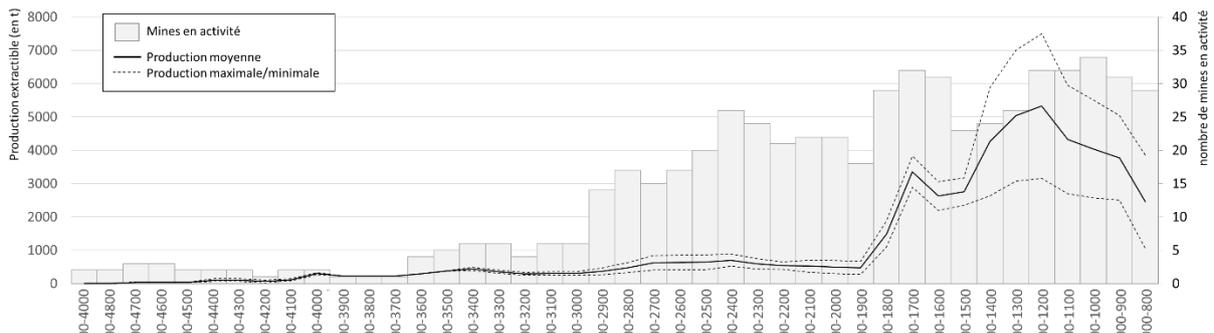


Figure 108 : Production totale estimée par pas de 100 ans en considérant des productions constantes.

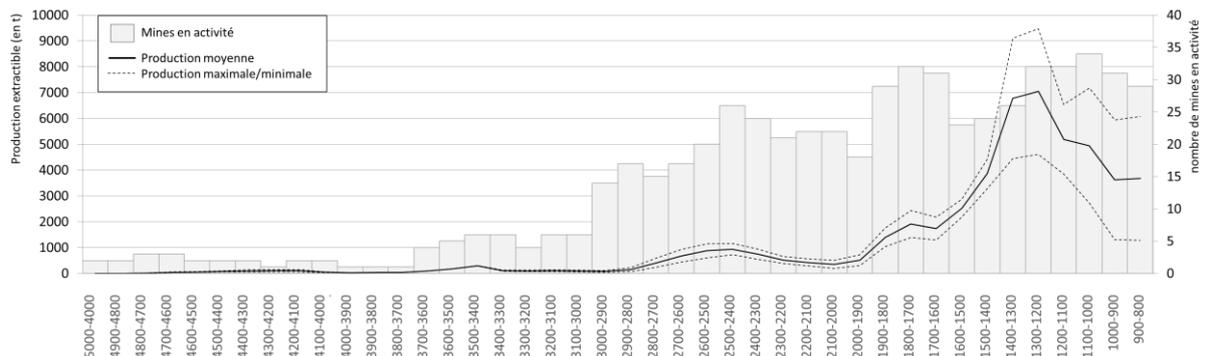


Figure 109 : Production totale estimée par pas de 100 ans avec correction de type « en cloche ».

V/3.c Des disparités importantes concernant les quantités de cuivre produites par régions

Les productions ne se corrèlent pas avec le nombre de mines

Pour toutes les raisons évoquées plus haut, la courbe de potentiel de production obtenue ne prend en compte qu'un échantillon réduit des mines connues et plus encore, des mines ayant existé. Elle possède une marge d'erreur conséquente inhérente à l'état de conservation des mines, à la variation de l'enrichissement des gisements et à la précision des données publiées. L'intervalle de production proposé n'est donc pas à considérer exact et pourrait être légèrement surestimé : une grande partie des productions calculées présentent une valeur sensiblement plus forte que celles précédemment publiées (Tableau 22).

Zone/site	Cette estimation	Estimation(s) précédente(s)
Irlande	129 t	24 t (Timberlake, 2017) à 1 463 t (Jackson, 1984)
Grande-Bretagne	4 638 t	51 t (Timberlake, 2017) à >1 800 t (Randall, 1995)
Est des Alpes	25 181 t	20 140 t (Pernicka <i>et al.</i> , 2016)
Mine d'El Aramo (Esp.)	886 t	350 t (de Blas Cortina, 2014)

Tableau 22 : Exemple de comparaison des productions de cuivre estimées et précédemment publiées.

L'estimation de la production de l'Irlande reste très hypothétique du fait de la difficulté à trouver des informations de volume sur la mine de Ross Island, pour la mine d'El Aramo la seule donnée indiquée est le volume de vides mesuré (4 670 m³).

Bien qu'imparfaite, cette courbe (qui ne prend pas en compte Chypre¹⁷² pour les raisons évoquées plus haut) apporte une vision plus précise des capacités de production que le simple comptage des exploitations (Figure 110).

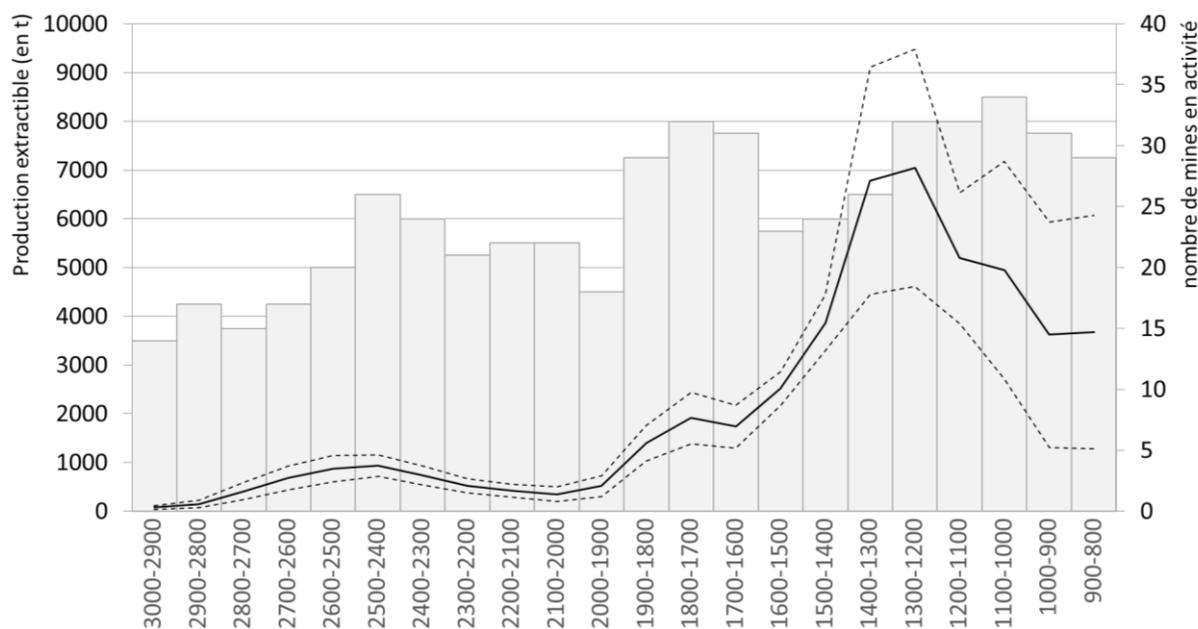


Figure 110 : Production totale estimée par tranche de 100 ans pour l'Europe de l'Ouest (Chypre exclue) à partir de notre corpus. Les productions minimales et maximales obtenues sont indiquées en pointillés, la moyenne est représentée par un trait plein.

Si le nombre de mines en activité est relativement stable, la courbe de capacité de production proposée pour l'ensemble de l'Europe montre clairement une augmentation progressive du cuivre potentiellement disponible depuis le début de l'âge du Bronze avec un maximum entre 1400 et 1200 av. J.-C. Il semblerait ainsi qu'en Europe de l'Ouest la production de cuivre soit relativement faible entre 2500 et 2000 av. J.-C., puis augmente fortement entre 2000 et 1400 av. J.-C. avant de finalement diminuer. La baisse de production qui semble se dessiner aux environs de 1200 av. J.-C. pourrait être une répercussion des troubles identifiés dans l'est de la Méditerranée : les troubles ne se traduiraient pas par la fermeture de nombreux sites d'exploitation mais par une baisse de la production.

Cette observation à échelle européenne doit cependant être nuancée. En effet, en analysant les productions du sud de la péninsule Ibérique, de l'est des Alpes et du Pays de Galles, on constate qu'elles sont asynchrones (Figure 111). Ainsi, la production chute dans l'est des Alpes et au Pays de Galles à partir de 1200 av. J.-C., mais augmente dans le sud de la péninsule Ibérique après 1300 av. J.-C.

¹⁷² Constantinou (1982) estime grossièrement la production chypriote de par la quantité importante de scories retrouvées sur l'île à 200 000 t entre 2500 av. J.-C. et 500 ap. J.-C. soit 6 700 t par tranche de 100 ans en considérant une production constante, ce qui est considérable.

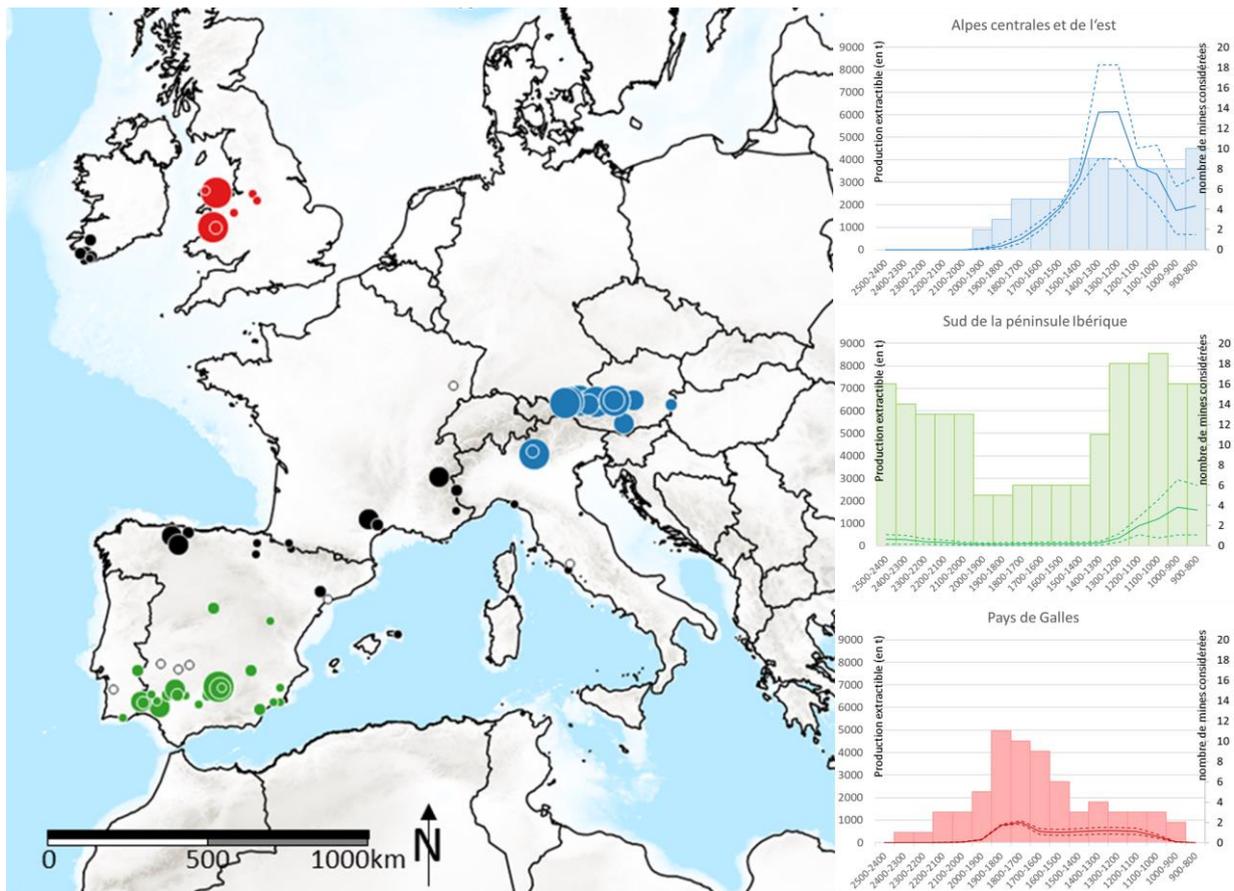


Figure 111 : Localisation (la taille des figurés est proportionnelle à la production totale des mines) et courbes de production pour les trois régions présentant la plus forte concentration de mines décrites : le sud de la péninsule Ibérique, le Pays de Galles et l'est des Alpes. L'écart entre les valeurs maximales et minimales obtenues (représentées en pointillés) est important. Il est dû à la présence de zones d'altération supergène dans le sud de la péninsule Ibérique et à la difficulté d'estimer les volumes de vides dans les mines des Alpes.

Il est donc possible de supposer que le monde interconnecté de l'âge du Bronze ne soit pas aussi fragile que Cline (2015) l'écrit. Les productions calculées montrent que, suite à la crise de 1200 av. J.-C., il pourrait y avoir une résilience accrue de la production de cuivre à large échelle. Un effet de « vases communicants » aurait lieu et la diminution de production de cuivre dans l'est de la Méditerranée aurait entraîné une augmentation de la production de cuivre en Espagne.

Des stratégies d'exploitation différentes ?

La productivité moyenne des mines (nombre de mines en exploitation vs quantité de cuivre produite) montre de grandes disparités régionales.

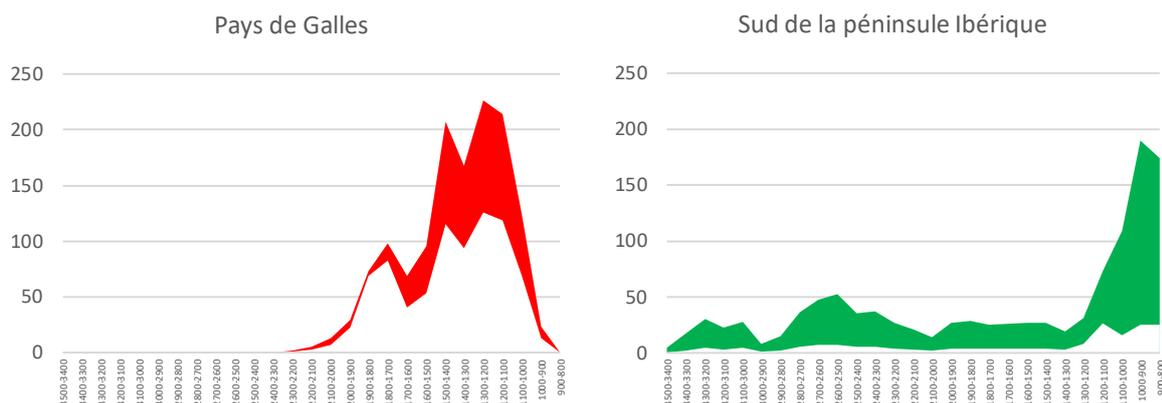


Figure 112 : Productivité moyenne (somme des tonnes de cuivre produites par 100 ans divisée par le nombre de mines) théorique des mines ibériques et britanniques.

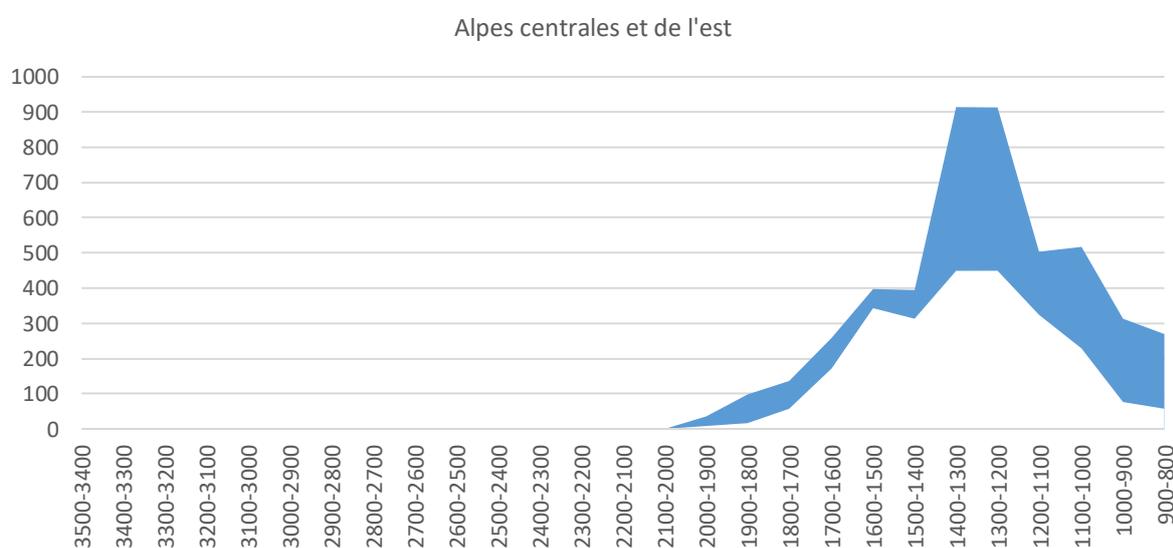


Figure 113 : Productivité moyenne (somme des tonnes de cuivre produites par 100 ans divisée par le nombre de mines) théorique des mines des Alpes centrales et de l'est.

Le sud de la péninsule Ibérique possède de nombreuses mines, qui, pour la plupart, exploitent uniquement les horizons enrichis des zones d'altération supergène. Ces mines auraient longtemps présenté de faible capacité de production. Si vers 1200 av. J.-C., les mines pourraient avoir une productivité proche de celle des mines britanniques, toutes sont très inférieures¹⁷³ à la productivité des mines de l'est des Alpes, dont les gisements sont pourtant plus difficiles d'accès.

Les disparités de capacités de production par région pourraient traduire des stratégies d'exploitation différentes. Certaines régions semblent faire l'objet d'une exploitation intensive du cuivre, comme déjà supposé dans le cas des Alpes de l'est (Lutz et Pernicka, 2013). D'autres régions pourraient privilégier les gisements dont il est possible d'extraire du cuivre et d'autres métaux. Cela pourrait être le cas de la péninsule Ibérique où Macías (2015) constate que, dans la région de Rio Tinto, des gisements de cuivre sont abandonnés vers la fin de l'âge du Bronze à la faveur de l'exploitation de gisements polymétalliques comme dans le cas de la mine de Monte Romero présentant cuivre et argent (Rothenberg et Blanco-Freijeiro, 1981 p.84-87). Pour le même volume extrait, la quantité de cuivre obtenue pourrait ainsi être moindre.

¹⁷³ Il est cependant possible que la forte reprise minière ait détruit certaines (grandes) mines.

Ces différences de productivité des mines pourraient refléter des différences de « stratégies d'exploitation » et une organisation différente des productions.

Les productions estimées se corrèlent-elles à d'autres facteurs ?

L'évolution des productions se doit d'être mise à l'épreuve de données archéologiques.

La production se corrèle-t-elle au nombre d'artefacts en circulation ?

Comparons tout d'abord les quantités de cuivre produites à la quantité d'artefacts cuivreux en circulation pour un intervalle de temps donné. À notre connaissance, seules deux études ont cherché à estimer le nombre d'artefacts en circulation à grande échelle et sur le temps long :

- Schauer *et al.* (2021) s'intéressent à l'ensemble de l'Europe et recensent 2042 artefacts chalcolithiques. Ce référentiel couvre une surface géographique moins importante que celle des productions estimées puisqu'aucun artefact de la péninsule Ibérique ni des Balkans n'a été considéré (Figure 114) ;
- Brozio *et al.* (2023) estiment la fréquence relative (nombre d'objets produits par siècle) des artefacts néolithiques en cuivre découverts en Allemagne du nord et en Scandinavie du sud.

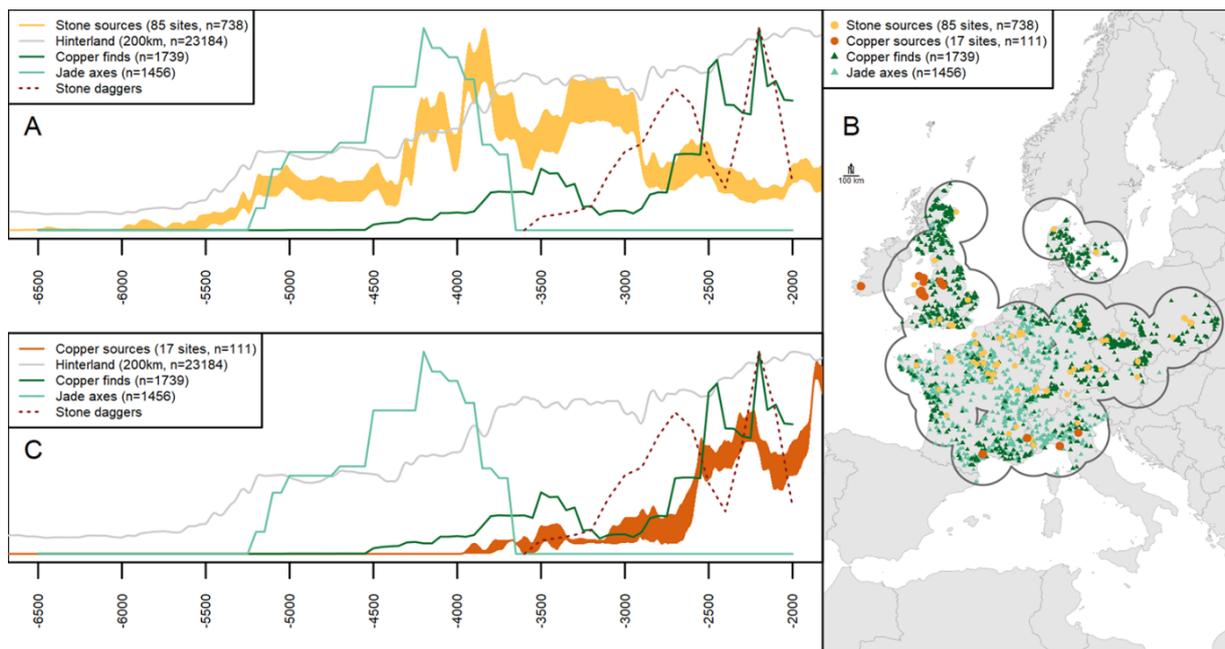


Figure 114 : Évolution du nombre d'artefacts en matière lithique et en cuivre qui ont été découverts.
 Source : Schauer *et al.* (2021)

Il est difficile d'évaluer précisément le nombre d'objets en circulation en nous basant uniquement sur les artefacts retrouvés, car ces derniers ne représentent certainement qu'une petite fraction des objets ayant effectivement circulé (et n'ayant pas été recyclés). Les objets découverts sont surtout ceux qui ont été utilisés pour des pratiques funéraires ou votives et sacrificielles. Il est clair que la fréquence et le contenu de ces dépôts répondaient à des motivations très variables dans le temps, dans l'espace et dans le message social exprimé par leurs organisateurs.

Ces études montrent cependant que la consommation de cuivre n'est pas strictement croissante mais varie au cours du temps. Les courbes de production minière et celles représentant le nombre d'artefacts en cuivre recensés présentent des similarités (Figure 115) :

- La baisse des productions vers 3400 av. J.-C. serait contemporaine d'une diminution marquée du nombre d'artefacts en circulation entre 3500 et 3000 av. J.-C.¹⁷⁴ ;
- L'augmentation de la production vers 2800 av. J.-C. se corrèle à une augmentation du nombre d'artefacts en circulation ;
- La période 2600-2100 av. J.-C. serait marquée par une instabilité en termes de consommation de métal : des pics et des baisses s'enchaîneraient mais ne sont pas visibles dans nos projections qui indiquent une baisse générale de production de cuivre ;
- La légère diminution du nombre d'artefacts vers 1600 av. J.-C. se produit 100 ans après une légère baisse de la production de cuivre qui pourrait être contemporaine d'une diminution importante de la population.

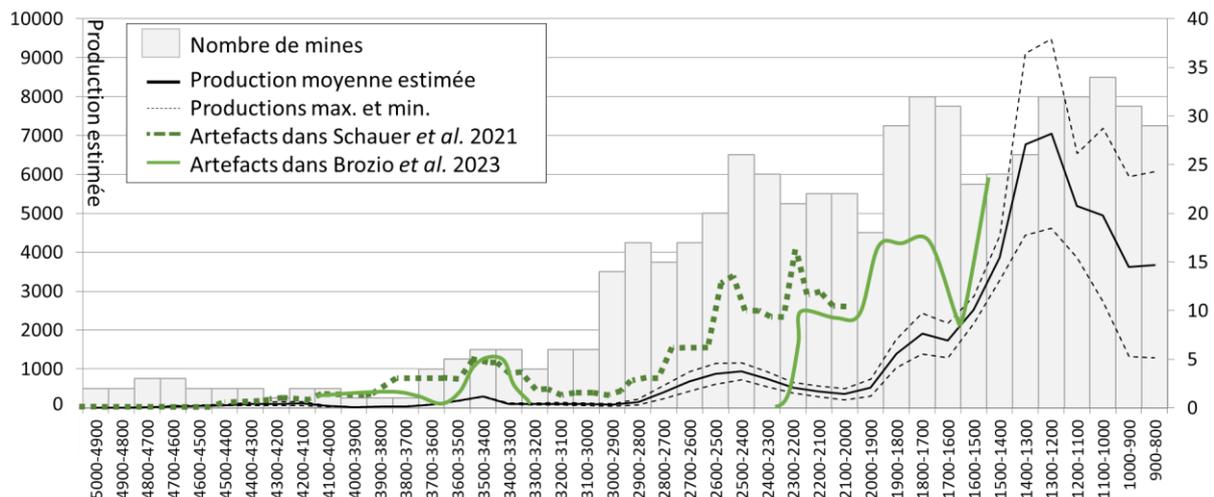


Figure 115 : Courbes de production de cuivre précédemment calculée et évolution du nombre d'artefacts en cuivre en circulation d'après Brozio et al. (2023) et Schauer et al. (2021) (nous avons exagéré les courbes pour faciliter la lecture).

L'augmentation de la production est-elle corrélée à l'accroissement démographique ?

Comme évoqué en introduction de ce travail de thèse, il est probable que le besoin de se fournir en cuivre augmente à mesure que les populations s'accroissent.

Une étude récente de Capuzzo *et al.* (2018) estime les variations relatives de population de l'âge du Bronze dans une grande zone géographique comprenant les Pyrénées, toute la partie sud de la France, l'ensemble des Alpes ainsi que la Ligurie (Figure 116). Ils utilisent pour cela les datations radiocarbone de 852 sites d'habitat et de 283 sites funéraires. Les résultats obtenus concernent la période comprise entre 1800 et 800 av. J.-C. Ils montrent une faible augmentation de la densité de population entre 1800 et 1400 av. J.-C. avec peut-être un pic entre 1500 et 1400 av. J.-C. (bien marqué pour les sites d'habitats mais pas dans les contextes funéraires). Une très courte période d'environ 50 ans entre 1400 et 1350 av. J.-C. voit la population chuter très brutalement. Cette période très nette de déclin est suivie d'une phase de stabilité entre 1350 et 1050 av. J.-C. à laquelle succède une nouvelle augmentation continue entre 1050 et 825 av. J.-C. (Figure 116).

¹⁷⁴ Cependant, les productions de la période ~ 3700-3300 av. J.-C. sont principalement issues des mines du nord-ouest de l'Espagne (el Aramo et la Pronfonda) qui sont des zones de production éloignées du lieu de découverte des artefacts considérés dans le cadre des deux études.

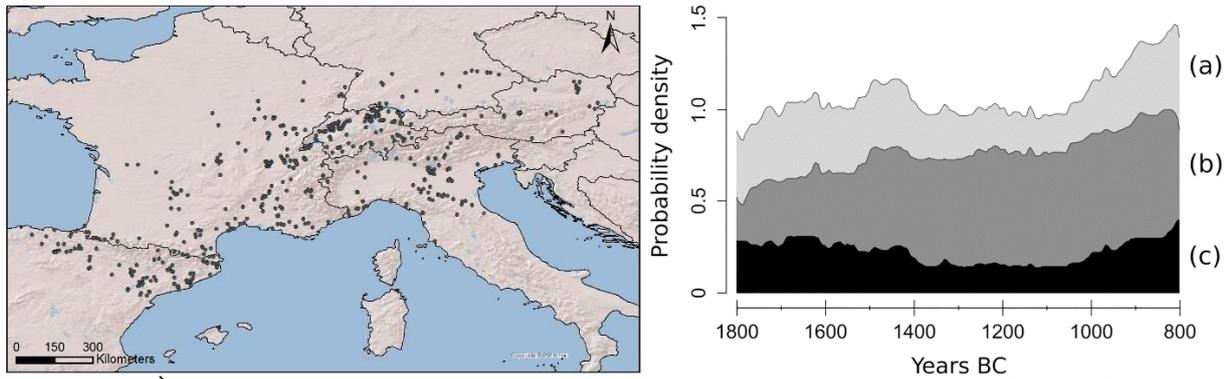


Figure 116 : À gauche : sites référencés par Capuzzo *et al.* (2018) ; à droite : densité de probabilité obtenue, (a) 1233 dates de l'ensemble de données filtrées, (b) 852 dates 14C des établissements, (c) 283 dates 14C des contextes funéraires. Source des illustrations : Capuzzo *et al.*, 2018.

La confrontation des résultats de l'étude de Capuzzo *et al.* (2018) aux courbes de production calculées montre des décalages (Figure 117).

L'augmentation estimée de la production entre 2000 et 1300 av. J.-C. pourrait être contemporaine d'un essor démographique. Plus en détail, la légère chute de production de cuivre vers 1700 av. J.-C. apparaît 100 ans avant une chute démographique marquée vers 1600 av. J.-C., et la diminution de la production de cuivre (vers 1300 av. J.-C.) survient un siècle après le déclin démographique (vers 1400 av. J.-C.). L'accroissement démographique présumé vers 1050 av. J.-C. ne semble pas être accompagné d'une augmentation notable de la production de cuivre.

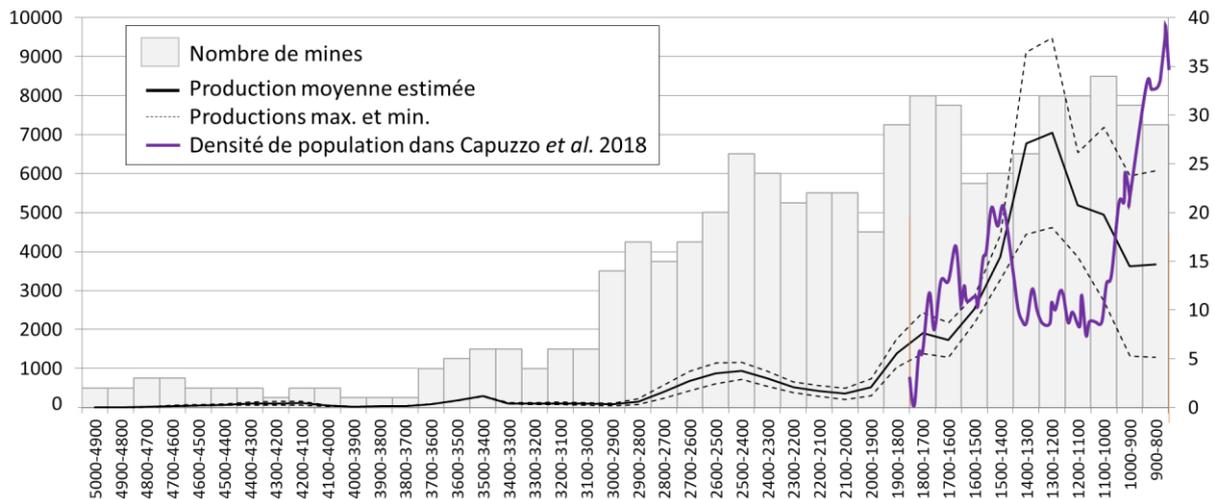


Figure 117 : Courbes de production de cuivre précédemment calculées et dynamiques démographiques issues de l'analyse de densité de probabilité des dates radiocarbone de Capuzzo *et al.*, 2018 (nous avons pris en compte l'ensemble des données soit le modèle a et avons exagéré la courbe afin de faciliter la lecture).

Un décalage entre les dynamiques démographiques et la production minière s'observe également à une échelle plus locale. La mise en commun des productions ibériques et de la compilation de 1895 dates radiocarbone provenant de 302 sites de peuplement représentatifs de l'ensemble de la péninsule Ibérique (données issues de Hinz *et al.*, 2019) montre une bonne corrélation entre accroissement démographique et augmentation de la production de cuivre locale entre 3100 et 2300 av. J.-C.

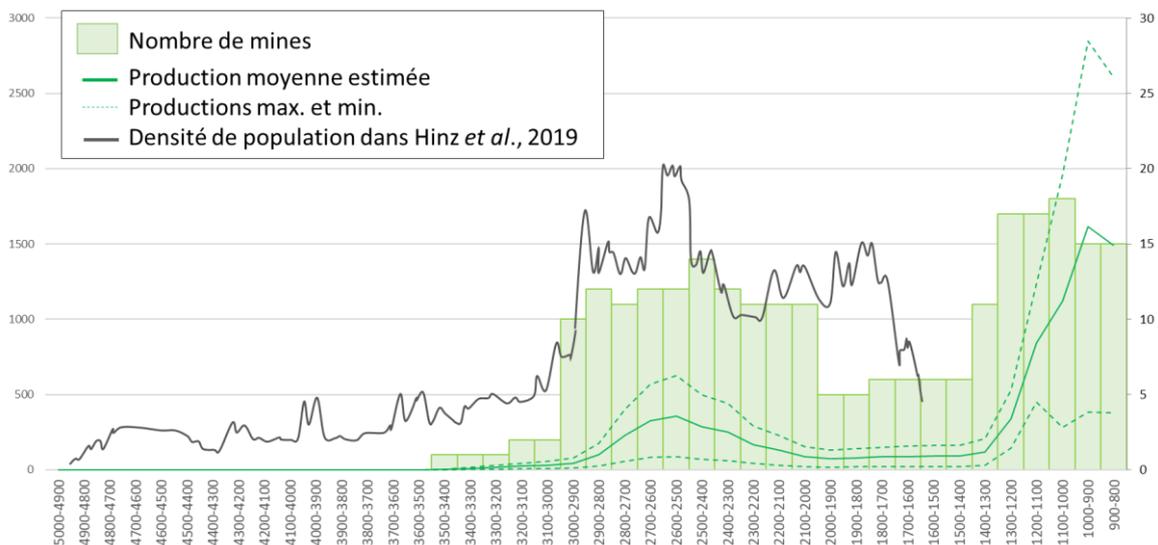


Figure 118 : Courbes de production de cuivre estimées pour la péninsule Ibérique et dynamiques démographiques issues de l'analyse de densité de probabilité des dates radiocarbone d'Hinz et al., 2019.

Cependant, si le nombre de sites de peuplement semble relativement stable entre 2300 et 1700 av. J.-C., la production de cuivre décroît (Figure 118). La péninsule Ibérique importerait peut-être alors une partie de son cuivre. Enfin, la chute démographique observée précédemment vers 1600 av. J.-C. est également très nette en péninsule Ibérique.

À grande échelle comme à une échelle plus locale, l'accroissement de la population semble coïncider avec l'augmentation de la production de cuivre. Nous devons toutefois rester prudents car :

- Rien ne permet formellement de confirmer qu'il existe une corrélation entre la densité de population et la consommation de métaux ;
- Une partie du cuivre consommé pourrait provenir de régions dont nous n'avons pas estimé la production (en particulier Chypre) ou d'importations extra-européennes.

La confirmation d'une crise économique vers 1600 av. J.-C. ?

Le calcul de production proposé présente de nombreuses limites car il ne porte que sur un nombre de mines très limité et que les données prises en comptes dans le calcul ne présentent pas toutes les mêmes degrés de précision. Cette constatation s'applique également au nombre d'artefacts retrouvés dans les sites d'habitats et les sites funéraires qui ne représentent eux aussi qu'un ensemble restreint et ne nous offrent donc qu'une vision réduite de ce qu'était la réalité du nombre de mines exploitées, du nombre d'artefacts produits, et du nombre d'individus ayant vécu à la Protohistoire.

Le fait que la production d'objets en alliages cuivreux, la démographie et la production de cuivre diminuent brusquement vers 1600 av. J.-C. indiquerait clairement qu'une crise économique et sociétale aurait lieu à cette période. Une attention particulière sera donc portée à l'évolution des axes d'échange entre 2000-1600 et 1600-1300 av. J.-C. (cf partie 2 V/5).

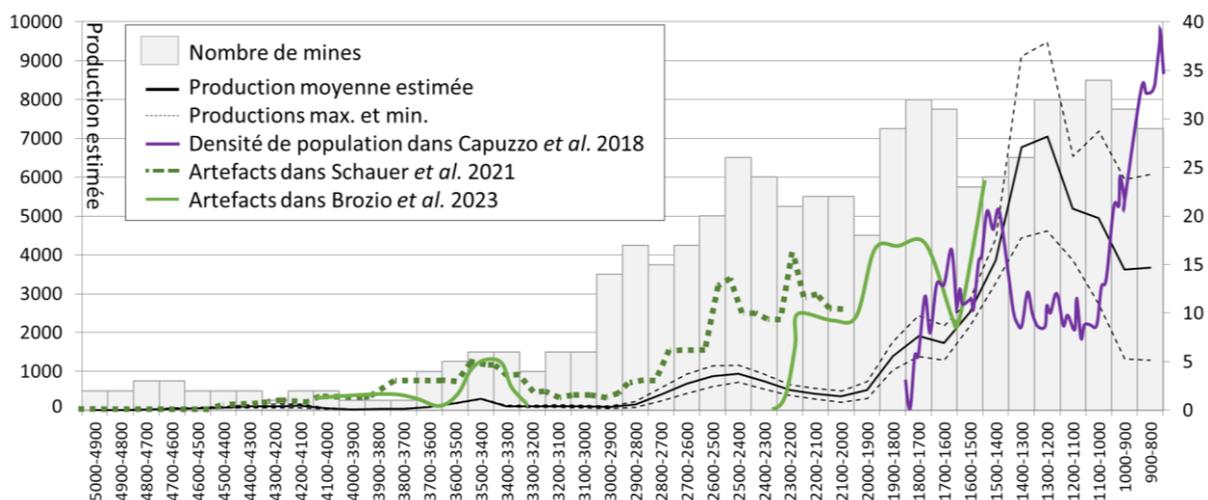


Figure 119 : Courbes de production de cuivre précédemment calculées, dynamiques démographiques issues de Capuzzo et al., 2018 et évolution du nombre d'artefacts en cuivre en circulation d'après Brozio et al. (2023) et Schauer et al. (2021) (nous avons exagéré les courbes pour faciliter la lecture).

V/3.d Des régions produisant du cuivre aux propriétés différentes ?

Une faible production de cuivre est issue de la fonte de carbonates de cuivre

Les courbes de production permettent d'étudier les quantités de cuivre produites par type de minerais.

L'hypothèse précédemment formulée d'une persistance des exploitations de carbonates de cuivre alors que la métallurgie des sulfures de cuivre primaires apparaît peut être remise en question. Les estimations de production par types de minéraux de cuivre révèlent que, bien que les mines exploitant des carbonates de cuivre et des sulfures primaires de cuivre soient presque aussi nombreuses entre 1900 et 1000 av. J.-C., la production des mines extrayant des sulfures primaires serait nettement supérieure à celle des mines exploitant des carbonates de cuivre (diagramme supérieur de la Figure 120).

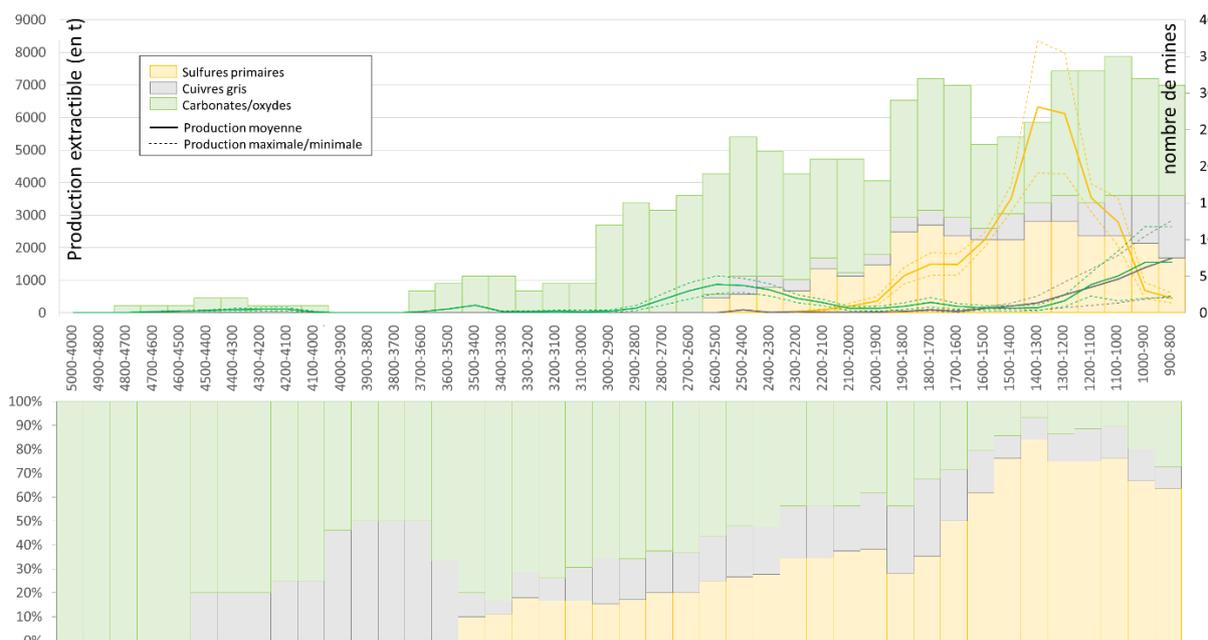


Figure 120 : Nombre de mines et courbes de production moyenne par type de minéral majoritairement exploité (en haut), répartition des ateliers par type de minéral majoritairement fondu (en bas).

Cet écart entre le nombre de sites miniers et la production effective pourrait expliquer les variations observées concernant les types de minerais fondus dans les ateliers de cette période. Le fait que les ateliers où des sulfures primaires sont fondus deviennent majoritaires vers 1700 av. J.-C. (diagramme inférieur de la Figure 120), est corrélé au fait que les minerais primaires sont les plus largement extraits dès 1800 av. J.-C.

Le fait que les mines mises en place dans les riches zones d'altération supergène produisent moins que les mines exploitant des sulfures de cuivre pose question, car l'exploitation de cette partie sommitale des gisements présente plusieurs avantages :

- Elle est fortement enrichie en cuivre ;
- Elle est située près de la surface et est donc extractible à ciel ouvert ;
- Les roches encaissantes y sont altérées et donc tendres et la progression y est aisée à l'aide de simples outils de pierre ;
- Les minéraux oxydés et carbonatés qu'elle contient peuvent être fondus par fusion réductrice à « faible » température.

Nous aurions donc pu nous attendre à ce que plus de cuivre soit extrait de ces gisements très riches en carbonates de cuivre, or ce n'est visiblement pas le cas. Nous n'expliquons pas non plus pourquoi la production issue de l'exploitation des cuivres gris est faible au Chalcolithique (3000-2000 av. J.-C.) alors même que ces cuivres gris permettent de produire des cuivres arséniés.

Du cuivre avec ou sans arsenic ?

Une longue période où des cuivres gris sont extraits

Les premiers alliages cuivreux en circulation en Europe ne sont pas des bronzes à étain mais des alliages de cuivre-arsenic/antimoine présentant des propriétés physiques comparables aux vrais bronzes. La manière de produire les bronzes arséniés a longtemps été sujette à débats (voir la synthèse de Killick, 2014). Des arsénopyrites (FeAsS) ont été volontairement fondues avec des carbonates de cuivre entre 3100 et 2900 av. J.-C. en Iran dans la région d'Arisman (Rehren *et al.*, 2012)¹⁷⁵ mais cette pratique, si elle est avérée en Iran, ne semble pas se confirmer en l'Europe où seule la fonte de cuivres gris et de leur altération est avérée.

La fonte de ces minerais riches en arsenic et/ou antimoine sous atmosphère réductrice a perduré pendant plus d'un millénaire avant d'être progressivement remplacée par l'extraction de chalcopyrates (Figure 121).

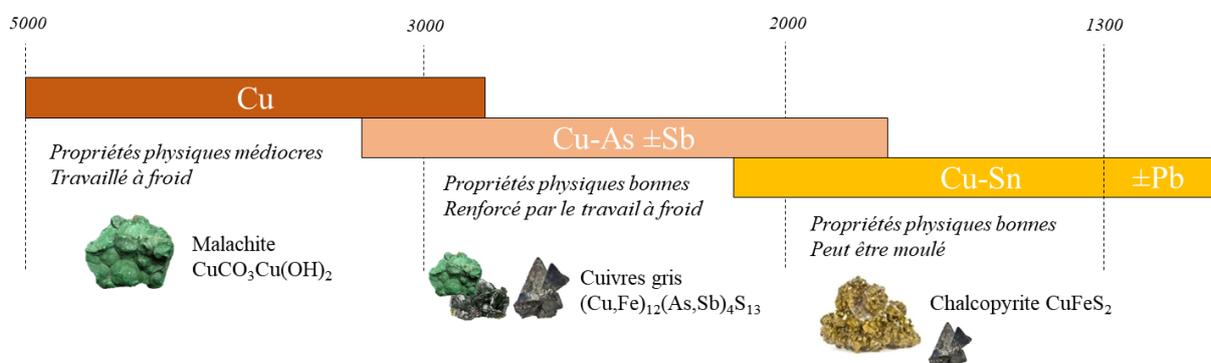


Figure 121 : Synthèse des minéraux principalement exploités et des alliages en circulation.

¹⁷⁵ Des analyses au Synchrotron ont permis de détecter des arsénopyrites dans les artefacts en cuivre arsénié du début du III^e millénaire du site iranien d'Espidej (Emami *et al.*, 2022) confirmant la fonte locale d'arsénopyrites.

Teneurs en As/Sb des minerais exploités

Nous ne disposons malheureusement pas toujours d'informations concernant la composition des minéralisations exploitées, et en particulier concernant la présence ou non d'arsenic/antimoine dans les gisements de cuivre. Les analyses géochimiques permettant d'estimer les concentrations en éléments majeurs et traces des minerais sont rarement réalisées. La reconnaissance de minéraux présents dans les mines ne repose souvent que sur des observations visuelles qui ne sont pourtant que peu satisfaisantes dans le cas de minéraux oxydés : des cuivres gris altérés en olivénite et malachite ne se différencient pas clairement visuellement de malachites issues de l'altération de chalcopyrites (Figure 122).



Figure 122 : Minéral à aspect de malachite issu non pas de l'altération d'une chalcopyrite mais de l'altération d'une tétraédrite (cuivres gris) : l'analyse EDS (MEB) permet de constater que ce minéral contient des teneurs très élevées (33 %) en antimoine.

Le nombre de mines et d'ateliers pour lesquels la présence d'arsenic (As) et/ou d'antimoine (Sb) a été quantifiée est inférieur au nombre de sites où les minéraux exploités ont été identifiés. En ne prenant en compte que les mines pour lesquelles nous disposons d'informations, nous pouvons déterminer la date précise à laquelle l'exploitation des minerais de cuivre riches en As et Sb devient minoritaire.

Date d'abandon de l'exploitation des cuivres gris

Les mines exploitant des minerais riches en As/Sb sont majoritaires jusqu'à environ 1900 av. J.-C. mais le nombre d'ateliers exploitant ces minerais ne chute que vers 1700 av. J.-C. (Figure 123). Ce changement est très progressif et a lieu entre 1900/1700 av. J.-C. et 1400 av. J.-C.¹⁷⁶.

Passé cette date de 1400 av. J.-C., l'exploitation des minerais riches en arsenic/antimoine ne cesse pas pour autant puisqu'elle est largement attestée dans les Alpes orientales mais ces minerais riches en arsenic/antimoine sont alors grillés avant d'être réduits, cela afin de vaporiser l'arsenic et l'antimoine qui ne sont alors présents dans le cuivre produit que sous forme de traces¹⁷⁷.

¹⁷⁶ Ces dates nous semblent pertinentes car elles correspondent bien à la période où les bronzes arséniés sont progressivement remplacés par les bronzes à étain.

¹⁷⁷ Il n'est pas toujours possible de définir si les minerais extraits des mines sont destinés ou non à être grillés lorsque les ateliers associés aux mines n'ont pas été découverts. La persistance d'exploitations de minerais riches en arsenic supposés réduits après 1400 av. J.-C. est liée à ce biais archéologique.

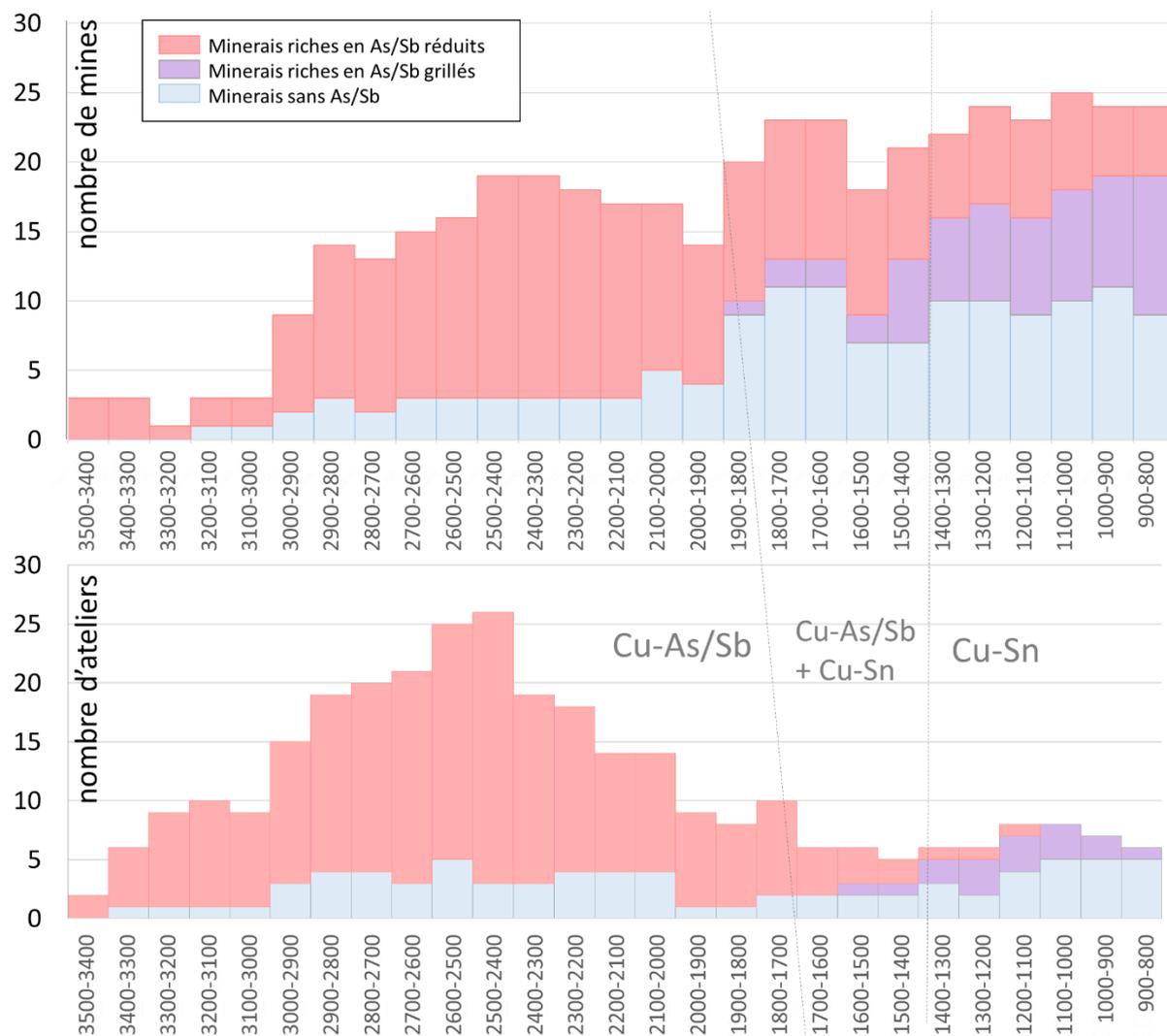


Figure 123 : Présence d'arsenic/antimoine dans les minerais de cuivre extraits des mines (graphique du haut) et fondus dans les ateliers (graphique du bas) au cours du temps. Le nombre de mines (graphique du haut) et d'ateliers (en bas) indique des dynamiques différentes.

le décalage observé dans les dates de changement de type de minerai exploité (avec ou sans As/Sb) des mines et des ateliers est clairement réduit lorsque l'on observe les productions minières théoriques. Le basculement se marque alors à 1700 av. J.-C. soit de manière contemporaine aux ateliers (Figure 124).

Une faible production de cuivre arsénié ?

La quantité de cuivre extraite de chacun de ces différents types de minerais montre que la production de minerais de cuivre à arsenic/antimoine serait très inférieure à celles issues de la fonte de chalcopyrates (Figure 124).

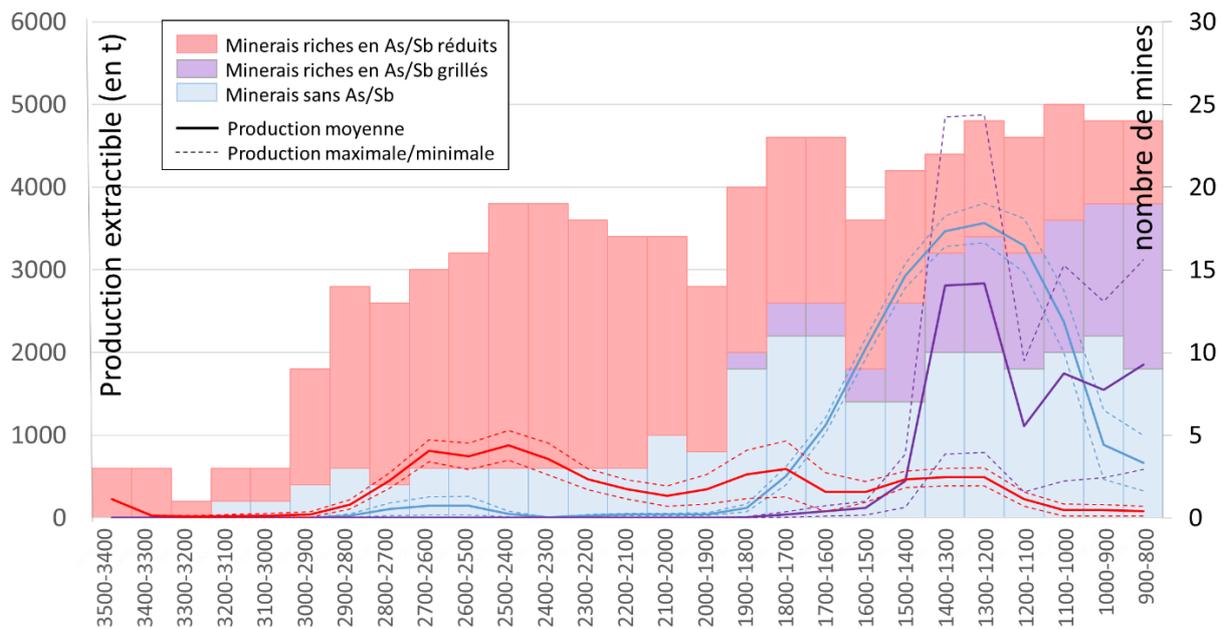


Figure 124 : Nombre de mines considérées et production théorique en fonction de la présence ou non d'arsenic/antimoine dans les gisements. Les minerais riches en As/Sb subissant un grillage afin de vaporiser l'As/Sb (en mauve) ont été distingués des minerais pour lesquels seule une réduction (permettant de conserver As et Sb) est supposée (en rouge).

Nous posons l'hypothèse que cette faible production s'expliquerait par le fait que produire un objet en cuivre arsénié serait complexe et chronophage. Il fallait tout d'abord trouver des gisements très concentrés en arsenic et antimoine. Ensuite, à l'image du fer qui se forge et ne se moule pas, donner forme à un objet demandait un long travail de martelage (cf I/3.c de l'introduction générale).

Produire des bronzes a demandé un approvisionnement en étain ce qui n'a a priori pas été problématique car des gisements ont été exploités partout en Europe et que des réseaux d'échanges ont dû se mettre en place progressivement. Cependant, si nous pensons toujours à la difficulté qu'ont dû avoir les populations de se procurer de l'étain, nous oublions rapidement qu'extraire du cuivre riche en arsenic et/ou antimoine n'était pas chose aisée tant les gisements très concentrés en cuivre gris sont rares. La pression concernant les teneurs en arsenic et antimoine des gisements de cuivre exploités a dû diminuer avec l'apparition des bronzes pour lesquels cette contrainte devient obsolète. L'apparition des premiers bronzes aurait alors mené à une diversification des minéraux exploités et des pratiques métallurgiques :

- Beaucoup de gisements pauvres en arsenic/antimoine sont exploités (voir la courbe de production en bleu de la Figure 124) ;
- Des cuivres gris sont exploités dans les Alpes orientales mais sont désormais grillés (courbe de production mauve de la Figure 124), l'arsenic/l'antimoine est vaporisé afin de produire un cuivre dépourvu de ces éléments¹⁷⁸.

Toutes les zones minières n'exploitent pas le même type de minerais de cuivre (Figure 125) : des minerais riches en arsenic sont exploités et fondus à quelques dizaines de kilomètres de minerais ne contenant pas d'arsenic, et ce, à toutes les périodes. Nous pouvons donc conclure à nouveau qu'il existe

¹⁷⁸ Ling *et al.* (2014) évoquent une demande grandissante pour le cuivre et lient les exploitations de cuivres gris du Tyrol à un besoin de productivité accru. En effet, les cuivres gris sont légèrement plus riches en cuivre que les chalcoprites et permettent de produire proportionnellement plus de cuivre.

des différences significatives dans les modes de production, en termes de minéraux ciblés et de processus utilisés, à l'échelle régionale et intra-régionale.

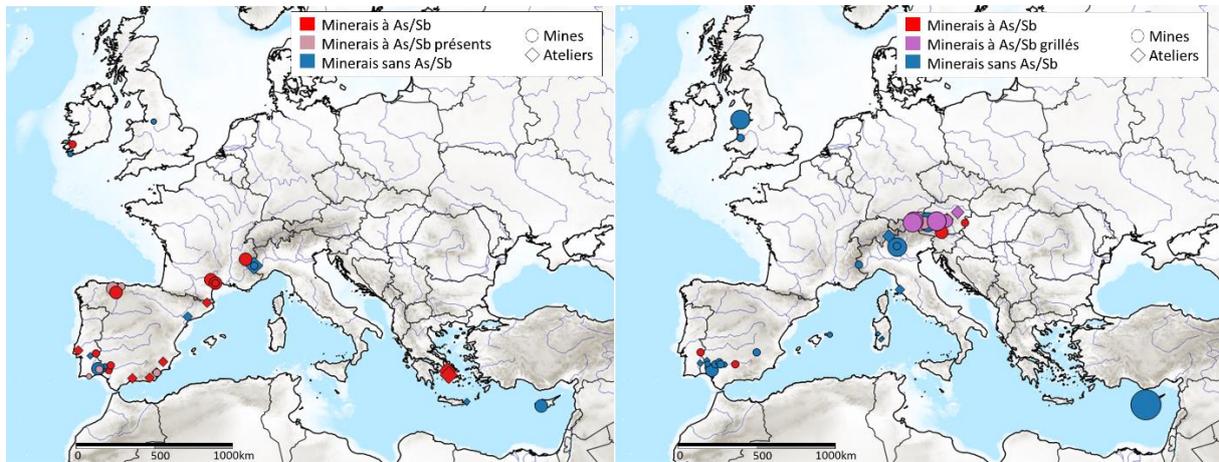


Figure 125 : Types de minerais de cuivre exploités/fondus entre 3000 et 2000 av. J.-C. (carte de gauche) et entre 1300 et 800 av. J.-C. (carte de droite). Sur la carte de gauche, certains sites (en rose) exploitent des minerais riches en cuivres gris et en minerais de cuivre dépourvus d'arsenic et antimoine (tels que des chalcopyrites ou des malachites) mais il n'est pas possible de déterminer si ces deux types de minerais sont exploités ou non. Dans la carte de droite, des cuivres gris sont grillés (en violet) afin de vaporiser l'arsenic et l'antimoine.

V/4 Des rythmes de production différents ?

Nous avons démontré que les grandes régions minières cuprifères en activité entre le Néolithique et le début de l'âge du Fer ne produisaient pas du cuivre dans des quantités similaires. Or, l'un des facteurs en lien avec l'intensité de l'exploitation minière pourrait être la saisonnalité des exploitations.

V/4.a Une exploitation hivernale des mines ?

O'Brien (2015 p. 16 et p. 267) ou encore Hanks et Doonan (2009) ont estimé que le travail de mineur était, dans de nombreux cas, une activité saisonnière s'étendant de la fin de l'automne à l'ensemble de l'hiver, quand le besoin de main-d'œuvre pour l'agriculture ou le pastoralisme était le plus faible.

Une exploitation qui se déroulerait pendant l'hiver permettrait également de profiter d'un abattage par le feu plus efficace car l'arrivée d'air dans les galeries est plus importante en hiver qu'en été (Ancel et Favier-Cauvin, 2021 ; Shennan, 1989) et la force des vents plus importante pourrait également faciliter les activités de métallurgie¹⁷⁹.

Toutefois, Maggi et Pearce (2010) mais aussi Kienlin (2013) proposent quant à eux que, dans les Alpes, des expéditions vers des gisements de minerai de cuivre pourraient être menées en relation avec des activités pastorales, c'est-à-dire en été.

Ces hypothèses concernant la saisonnalité des exploitations minières sont fondées sur des raisonnements théoriques et restent donc très hypothétiques.

¹⁷⁹ Cela est notamment supposé dans le Levant à Faynan ou encore à Timna (Genz, 2000).

V/4.b Une organisation du travail différente ?

La question d'une possible exploitation annuelle des mines est cruciale pour de nombreuses raisons. Outre le fait que l'on pourrait s'attendre à une quantité de métal produit plus importante dans le cas d'une exploitation annuelle, ce type d'exploitation impliquerait une organisation des productions s'inscrivant dans un système économique très organisé.

Hanks et Doonan (2009) opposent, de manière théorique, des groupes humains autonomes pratiquant une exploitation saisonnière à des communautés spécialisées exploitant les mines de manière annuelle. Pour eux une organisation annuelle implique :

- Que les besoins de subsistance de base des mineurs soient satisfaits par des contacts avec d'autres groupes locaux ;
- Que des mineurs et des métallurgistes hautement spécialisés, habitent près des sites miniers.

Stöllner (2012) arrive au même type de conclusion à l'aide de comparaisons ethnologiques. Selon lui, les communautés minières saisonnières sont basées sur le lignage et exploitent de petits sites alors que les communautés permanentes mènent des opérations techniquement plus complexes sous la direction d'élites. Il distingue ainsi trois modèles d'organisation (Figure 126) :

- Des productions saisonnières (pastoralisme dominant) ;
- De petits groupes spécialisés exploitant les mines à l'année ;
- Un pouvoir centralisé où l'activité minière deviendrait une activité annuelle à plein temps impliquant une main-d'œuvre abondante.

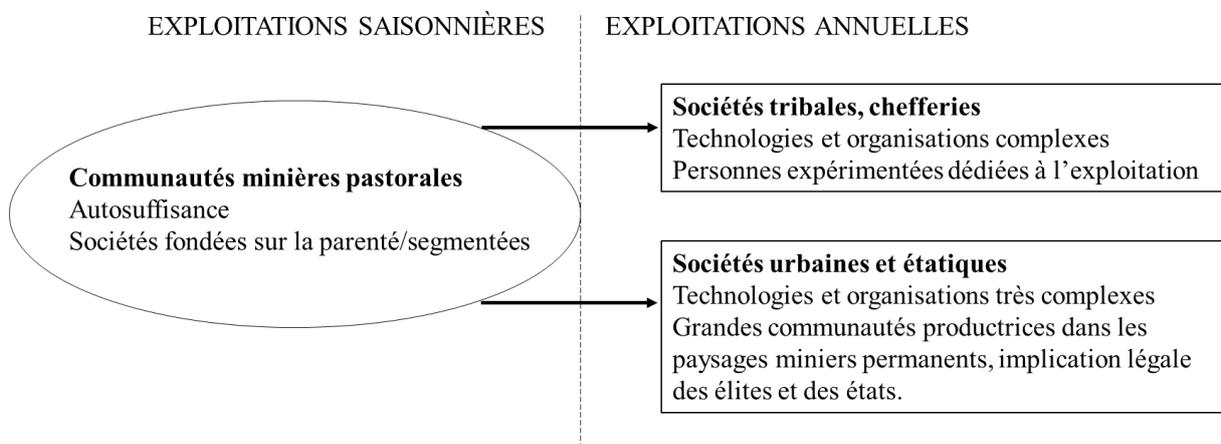


Figure 126 : Les trois types d'organisations sociétales et leurs relations à l'exploitation minière, modifié d'après Stöllner (2012)

Stöllner (2012) cherche à définir à partir de quand les sociétés exploitent les mines de manière annuelle et non plus saisonnière. Pour cela, il utilise 4 cas d'études liant mines et sépultures pour illustrer l'hypothèse que les activités minières seraient majoritairement annuelles à partir du Bronze final. L'une des principales critiques que nous pouvons apporter à ce travail est que les 4 mines sur lesquelles s'appuie son raisonnement exploitent des ressources différentes et sont éloignées tant géographiquement que chronologiquement les unes des autres. De plus, les critères qu'il définit sont critiquables. Nous nous proposons alors de tester ses hypothèses.

Les sépultures comme indices de l'exploitation annuelle des mines ?

Stöllner (2012) cite deux exemples où un petit groupe de population se dédierait au travail du métal de manière annuelle, mais sans contrôle d'élites :

- (i) La mine d'or géorgienne de Sakdrissi (3500 av. J.-C.) dont la profondeur de 25 m atteinte, l'emploi d'abattage par le feu et la séparation de l'or et du sable dans des installations dédiées sont considérés comme très évolués. Il suppose donc que ces activités sont réalisées par un groupe spécialisé, travaillant à l'année, sans pour autant être contrôlé par des élites car aucune tombe très riche en or n'a été découverte.
- (ii) Les mines d'étain d'Askaraly au Kazakhstan (2000 av. J.-C.) dont de nombreux éléments rappellent celle de Sakdrissi. La mine est profonde et a été taillée dans du granite, elle a également été attaquée par le feu et elle présentait des aires dédiées à la métallurgie. À proximité des installations minières, 14 dépouilles (hommes, femmes et enfants) présentaient de l'étain et des marteaux de mineurs. Ces individus pourraient correspondre à une famille exploitant le gisement. Aucune recherche ADN n'a cependant été réalisée pour confirmer que ces défunts avaient des liens de parenté.

Proposer que les individus inhumés avec des marteaux et autres outils liés à la chaîne opératoire minière étaient des mineurs exploitant un gisement est intéressant. Si cette hypothèse s'avère exacte, alors l'exploitation minière serait annuelle dès les III^e et II^e millénaires av. J.-C. car de nombreuses tombes contenant ces outils ont été découvertes en Europe (Figure 127)¹⁸⁰, mais rien n'indique qu'un individu dont le travail du minerai serait saisonnier ne puisse pas être enterré avec des outils miniers.

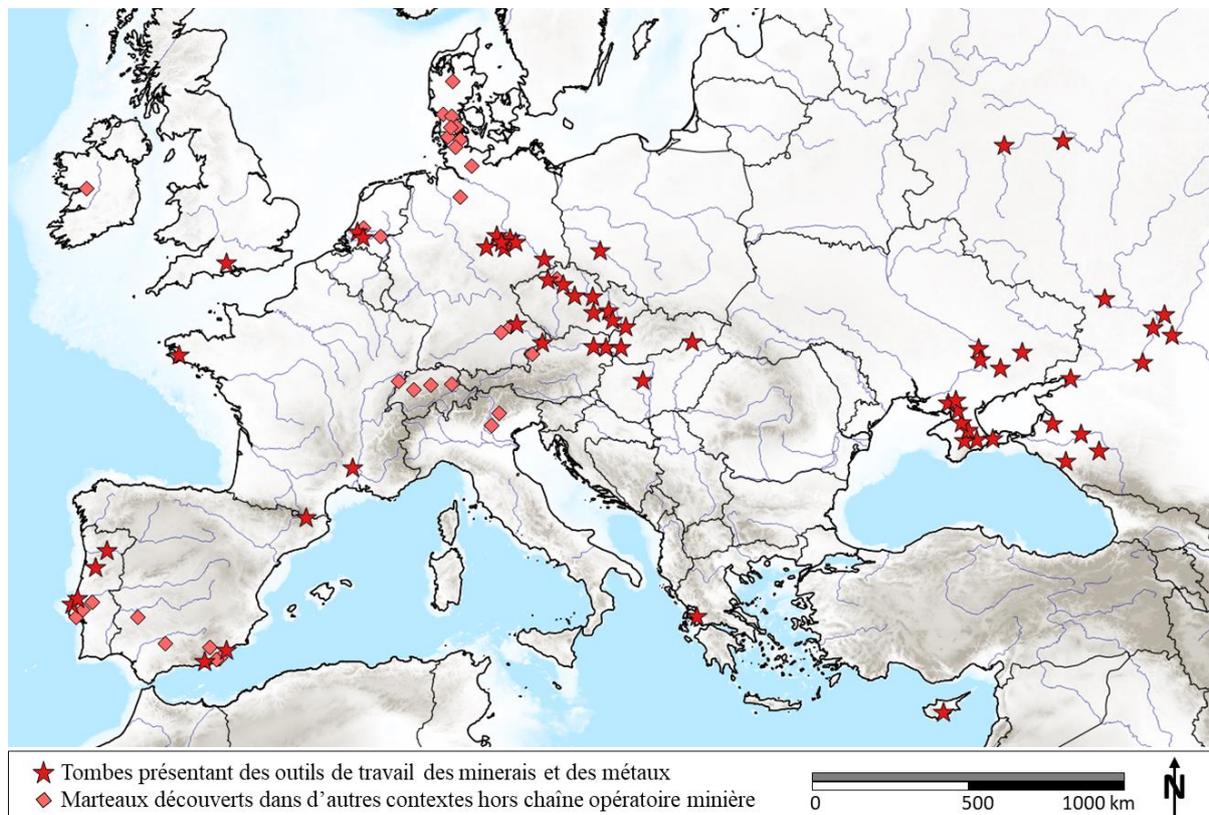


Figure 127 : Distribution géographique des tombes présentant des outils de travail des minerais et des métaux (étoiles) et des marteaux retrouvés hors contextes miniers entre le III^e et le II^e millénaire av. J.-C., d'après Soriano (2011) avec ajout d'une donnée de Costantini (1984) concernant la découverte d'un maillet dans un dolmen du Larzac et de Nowak et al. (2022) concernant des outils retrouvés en contexte funéraire en Pologne.

¹⁸⁰ Un possible cas de présence de scories de cuivre en contexte funéraire a également été signalé à Chypre à Skouriotissa (19-18^e siècles av. J.-C. ; Kassianidou 2013).

De plus, les exemples cités par Stöllner (2012) sont critiquables. Les mines d'Askaraly (ii) sont voisines des mines de Karnab exploitées également pour l'étain et par le même groupe culturel. Les mines de Karnab sont de dimensions bien supérieures à celles d'Askaraly mais présentaient une activité saisonnière : selon Garner (2001) les poteries retrouvées en contexte minier sont caractéristiques des populations nomades de la culture d'Andronovo. Les individus exploitant ces grandes mines et enterrés avec des outils n'étaient donc pas nécessairement sédentaires et n'exploitaient probablement pas les mines à l'année.

Dans le cas de la mine de Sakdrissi (i), interpréter la présence d'abattage par le feu comme le témoin d'une maîtrise minière importante est trompeuse car cette technologie est maîtrisée dans l'ensemble de l'Europe et du Proche-Orient et constitue davantage un acquis nécessaire à l'exploitation minière qu'une marque de maîtrise technique importante (Tomczyk *et al.*, 2020).

De plus, la présence d'abattage par le feu est reconnue dans plusieurs mines dont les indices témoigneraient plutôt d'une exploitation saisonnière et non annuelle. Par exemple, dans les mines de cuivre de Cabrières (Hérault), abattues par le feu, les reconstructions en pierre des fondations des habitations associées aux mines et la présence de couverture recouvrant les fosses de stockage alimentaire laissent supposer que ces habitations sont régulièrement laissées à l'abandon puis reconstruites, ce que Esperou (2010) suppose lié à des occupations saisonnières du site. Un cas de figure similaire est connu dans le massif des Rousses dans les Alpes : le grand nombre d'habitations situées aux abords des mines indiquerait des constructions saisonnières (Bailly-Maitre et Gonon, 2008).

L'exploitation saisonnière de mines abattues par le feu a également été supposée dans le Tyrol autrichien à St Veit (Shennan, 1989 ; Kienlin, 2013) ou encore au Pays de Galles¹⁸¹ au Mont Gabriel (O'Brien, 2015, p.13) mais aussi dans les mines de Great Orme également situées au Pays de Galles (Williams et Le Carlier Veslud, 2019)¹⁸². Cependant, la saisonnalité de ces exploitations est supposée uniquement en raison de la présence de nombreuses structures d'extraction. Cet argument est discutable car il peut s'agir d'une adaptation au gisement : les filons plus pauvres, plus discontinus ou dans les encaissants plus résistants peuvent être abandonnés au profit d'autres filons alors que l'exploitation est annuelle. La présence de nombreuses structures pourrait également correspondre à des exploitations individuelles : chaque mineur ou famille de mineur exploiterait un secteur du gisement.

Comment définir si des élites contrôlaient l'exploitation minière ?

Les autres exemples cités par Stöllner (2012) pour illustrer cette fois des productions annuelles contrôlées par des élites sont :

- (iii) La production de cuivre de la fin de l'âge du Bronze à Chypre. Il justifie cela par le fait que les ateliers de métallurgie sont localisés loin des centres miniers : le métal aurait été exporté vers les zones urbaines, soulignant un système économique très développé travaillant à temps plein et contrôlé par des élites ;

¹⁸¹ Le nombre important de structures d'extraction au Pays de Galles pourrait correspondre à une stratégie d'exploitation adaptée aux gisements très peu concentrés de cette grande région géologique (O'Brien 2015, p.13).

¹⁸² Des activités saisonnières sont également supposées dans l'est de la péninsule Ibérique du fait de la présence de nombreuses structures d'extraction (citons par exemple Loma de la Tejería (Montero Ruiz et Rodríguez de la Esperanza, 2008)) mais dans ces cas il n'y a pas d'indices de la présence d'abattage par le feu.

- (iv) La production de sel et de cuivre au début de l'âge du Fer dans les Alpes de l'est (Hallstatt) car des tombes d'élites y ont été découvertes et que les exploitations y sont de taille importante.

Ces deux exemples sont également sujets à critique car ils représentent des sites exceptionnels en termes de dimension. Le fait que des élites contrôlaient ces productions est hautement probable mais ces deux cas ne peuvent pas être considérés comme représentatifs de l'ensemble des sites de la fin de l'âge du Bronze.

Les autres travaux cherchant à définir un contrôle des mines par les élites n'apportent pas de pistes plus exploitables. Kienlin (2013) s'appuie sur le site de métallurgie extractive de St Veit-Klinglberg¹⁸³ où il a été déterminé que de la nourriture était apportée aux mineurs. Il interprète l'apport de nourriture déjà préparée et la complexité de la métallurgie comme le témoin d'un contrôle exercé par les élites émergentes de l'âge du Bronze. Néanmoins, la découverte de nourriture est extrêmement rare dans les sites miniers. Seul un autre site à la conservation exceptionnelle, la mine de Prigglitz-Gasteil (également dans le Tyrol autrichien), montre que les mineurs du Bronze final mangeaient des céréales sous forme déjà préparée ce qui laisse supposer que les mineurs ne cuisinaient pas ou peu sur site (Heiss *et al.*, 2021).

Cette information peu courante est également critiquable : rien ne prouve formellement qu'un petit groupe autonome exploitant une mine de manière saisonnière ne puisse pas s'être fait livrer de la nourriture ou avoir prévu un stock de nourriture conséquent. Par exemple, dans la mine de la fin de l'âge du Bronze de Mikhailo-Ovsyanka I en Oural, la saison à laquelle deux animaux consommés par les mineurs ont été abattus a pu être estimée à la fin de l'automne/début de l'hiver (Shishlina *et al.*, 2020). Les animaux étaient alors probablement gardés, abattus et consommés dans un campement minier saisonnier.

En conclusion de l'état de l'art

Dans l'état de l'art actuel, la question de la saisonnalité ou non de l'exploitation minière reste difficile. Nous proposons de tester une approche différente. Nous proposons de calculer le nombre de mois d'exploitation par an d'une mine en nous basant sur la quantité de roche abattue par le feu.

V/4.c Test de saisonnalité : la distance abattue par le feu

Les mines présentant de l'abattage par le feu sont fréquentes pour la période étudiée (cf V/2.a). Les études s'appuyant soit sur des textes, soit sur des expérimentations et visant à retracer le processus d'abattage sont nombreuses. Elles fournissent des informations tant sur les distances de progression (m³ abattus par brasiers) que sur le temps écoulé entre deux brasiers. Ces deux informations nous permettent de déterminer de déterminer combien de temps il a fallu aux mineurs pour creuser la roche.

Laps de temps séparant les brasiers

Dans les mines souterraines, allumer des brasiers provoque une augmentation de la température mais et la production de fumée. Des textes anciens recensés par Dubois (1996) et Willies et Weisgerber

¹⁸³ Un atelier de métallurgie extractive localisé dans une habitation proche d'une mine dans le Tyrol autrichien, daté de 1800-1400 av. J.-C.

(2000), expliquent que l'air est irrespirable et que la mine n'est donc pas accessible le temps de l'opération, et ce jusqu'à la disparition des fumées.

Le problème est alors de savoir au bout de combien de temps l'air est renouvelé. Cela peut dépendre de la puissance du brasier et de la qualité de la ventilation de la mine. Les textes indiquent que quelques jours seraient nécessaires (des sources différentes indiquent que les brasiers sont allumés le samedi matin et que la mine n'est réouverte que le lundi¹⁸⁴). Dans tous les cas, il ne semble pas envisageable d'allumer un feu par jour en souterrain et il semble plus judicieux de supposer que deux brasiers pourraient être allumés par semaine ; ces durées sont très cohérentes avec les simulations d'incendies (feux de bois et/ou de charbon de terre) pour les mines souterraines actuelles (et donc très bien ventilées) qui montrent qu'il faut 48 h à 72 h pour que la température retombe à son niveau initial (Trevits *et al.*, 2009)¹⁸⁵.

Reste à déterminer en combien de temps la roche fragilisée peut être retirée avec des outils en pierre et non en fer ou acier. Cela pourrait être rapide. Stoellner *et al.* (2014) ont réalisé des tests en extérieur dans la mine d'or de Sakdrisi (Géorgie). Les résultats montrent que l'utilisation de petits maillets en pierre permet de retirer la majorité des roches fragilisées par le feu dès 30 min de martelage mais ces tests ont été réalisés sur de la roche déjà très altérée et le temps nécessaire pour retirer l'ensemble de la roche n'est pas indiqué.

En souterrain, allumer un brasier, attendre deux jours pour que les fumées s'évacuent puis dédier une journée à frapper la roche fragilisée, récupérer les minerais et installer un nouveau brasier semble être un rythme supportable pour des mineurs du Néolithique et de l'âge du Bronze. Cet enchaînement conduirait donc à une estimation d'environ 2 brasiers par semaine. Demeure alors la question de combien de centimètres il est possible de progresser par brasier.

La distance de progression par brasier

Les expérimentations si elles sont nombreuses présentent un défaut : elles sont pour l'immense majorité réalisées en extérieur où :

- Le tirage est bien meilleur mais où l'« effet de four » est absent (Dubois, 1996) ;
- Les bûchers peuvent être rechargés périodiquement ;
- L'altération météorique a déjà fragilisé la roche (Timberlake, 2007 ; Py, 2009 p.1140).

Elles ne correspondent pas à un contexte d'exploitation souterraine et présentent des distances de progression très importantes, atteignant parfois le décimètre (Tableau 23).

¹⁸⁴ Les riches textes suédois de 1846 cités par Willies et Weisgerber (2000) évoquent la fermeture des mines pour une durée d'un weekend et/ou a minima d'une nuit séparant les bûchers.

¹⁸⁵ Les expérimentations menées sur des quartzites par Dubois (1996) témoignent du fait que le délai maximum entre deux brasiers est bien plus réduit en extérieur (où l'évacuation de la fumée ne pose pas problème). Dans ce cas jusqu'à deux attaques au feu peuvent être effectuées par jour.

Source	Progression par brasier	Roche	Remarques
Dubois, 1996	1 cm (roche saine) à 12 cm (altérée)	quartzites	les plus petits bûchers (50 kg de bois) seraient les plus efficaces
O'Brien, 1994 p171	1 à 2 cm	grès	2 h de brasier un seul feu sur surface altérée
Craddock, 1992	5 à 40 cm	?	400 kg de bois sec, découpé en bûches de 1,6 m de long, 360 kg de roches abattus
Téreygeol, 2001	3 à 10 cm	calcaire	40 feux ont été réalisés : 9 en souterrain sur un front de taille existant et 31 en extérieur
Storemyr, 2013	15 cm	chert	un seul feu sur surface altérée il faut attendre 50 min pour que le feu fasse éclater la roche

Tableau 23 : Résultats d'expérimentations d'abattage par le feu réalisées en extérieur¹⁸⁶.

Très peu d'expérimentations ont été menées dans le cas des mines souterraines mais l'étude de textes comme les expérimentations soulignent des progressions très faibles en particulier dans le cas de roches très résistantes telles que les quartzites (Tableau 24).

Source	Progression par brasier	Roche	Remarques
Willies et Weisgerber, 2000	progression de 4 m toutes les 4 semaines	gneiss	basé sur des textes suédois de 1846 18 m ³ de bois par brasier
Ancel <i>et al.</i> , 2010	progression de 5 m par an	quartzites	basé sur des textes médiévaux
Ancel et Py, 2008	1,5 m de hauteur et 2 m de profondeur pour 185 feux	quartzite	expérimentations 3 m ³ de roche ont été abattus (8 650 kg) et 40 m ³ de bois sec ont été brûlés (8 400 kg).
Ancel <i>et al.</i> , 2010 ; Py, 2009 p.1188	1,6 m de hauteur et 2,2 m de profondeur pour 200 feux	quartzites	expérimentations plus de 3 m ³ de roche ont été abattus et 45 m ³ de bois sec ont été brûlés ¹⁸⁷ .

Tableau 24 : Résultats d'expérimentations d'abattage par le feu réalisées en souterrain.

Présentation du calcul

Nous cherchons à déterminer si les mines creusées par abattage par le feu auraient pu être exploitées tout au long de l'année. Pour cela, nous avons essayé de déterminer combien de brasiers ont été nécessaires pour creuser les galeries¹⁸⁸.

Afin d'avoir une vision réaliste, il nous faut sélectionner des progressions au plus proche des conditions en souterrain. Nous ne pouvons donc exploiter que les données du second tableau ci-dessus car les expérimentations sur roches altérées ne correspondent pas aux conditions rencontrées par les mineurs en souterrain. De plus, comme nous cherchons à calculer un nombre de mois de creusements maximum par an, il nous faut considérer une progression lente. En effet, exagérer les distances abattues par le feu et/ou le nombre de brasiers ne ferait que réduire le temps théorique nécessaire au creusement de la mine (une progression d'un centimètre par feu demande 10 feux pour avancer de 10 cm alors qu'une progression de 10 cm par feu n'en demande qu'un et réduit donc le temps de travail).

¹⁸⁶ Cette liste est non exhaustive : de nombreuses autres expérimentations ont été réalisées et publiées mais la majorité de ces dernières ne s'intéressent qu'au ratio bois/roche et pas à la distance de progression.

¹⁸⁷ Près de 200 kg de charbon de bois ont été produits, cette proportion est beaucoup plus importante que celle constatée dans des remblais archéologiques, ce qui indiquerait que ce sous-produit était récupéré pour d'autres usages.

¹⁸⁸ Plus précisément pour progresser horizontalement dans la mine.

En utilisant les estimations d'Ance *et al.* (2010) soit 2,2 m de progression pour 200 feux, on obtient une progression horizontale moyenne de 1,1 cm par feu. Si l'on estime une durée de 2 jours de pause entre deux brasiers (en cohérence avec les descriptions faites plus haut), la progression minimale des mineurs serait de 2,75 cm par semaine.

En considérant la longueur totale de la mine¹⁸⁹, il est possible d'estimer le nombre maximum de semaines nécessaires pour creuser cette distance par abattage par le feu (soit l'extension horizontale totale de la mine (en m) divisée par 2,75/100). Ce nombre peut être converti en années puis divisé par la durée totale d'exploitation de la mine (en années). Une multiplication par 12 permet d'obtenir le nombre de mois maximum de creusement dans l'année.

Cette estimation correspond à un nombre de mois de creusement maximum par année. Elle n'implique qu'un seul brasier en activité à un seul moment et est calculée sur la base d'une roche de type quartzite soit une roche extrêmement résistante. Or, toutes les roches ne présentent pas les mêmes coefficients de dilatation thermique¹⁹⁰ et il est fort probable que plusieurs brasiers puissent être allumés simultanément dans un même espace minier. De plus, afin de pouvoir proposer des estimations, il est nécessaire de disposer de données précises. Les mines retenues dans notre étude sont donc des mines dont la morphologie et la datation sont connues et dont nous avons la preuve que l'extraction s'est faite par abattage par le feu.

Résultats obtenus

Sur les 49 mines de cuivre européennes abattues par le feu dont la longueur totale peut être estimée et dont la datation est connue¹⁹¹, seules 3 pourraient présenter une exploitation annuelle : une mine dans le Pays de Galles (Great Orme) et deux dans le Tyrol autrichien (Sagzeche et les mines de Leogang).

Le cas de la mine de Great Orme s'avère très particulier car il s'agit d'un gisement dans une cavité karstique dont une partie des galeries ont été creusées par la nature et non pas par l'activité humaine. Une partie de la mine a été creusée uniquement à l'aide des maillets en pierre et de piques en bois du fait de la faible dureté des parois altérées par l'érosion karstique (Dutton *et al.*, 1994 ; Lewis, 1996). Ainsi, si rien n'empêche de réaliser le calcul sur des mines s'implantant dans des cavités karstiques, le nombre de mois d'abattage par le feu par an peut s'avérer surestimé.

¹⁸⁹ Le nombre de mètres de galeries mis bout à bout.

¹⁹⁰ Par exemple, au contraire des minéraux siliceux, la calcite est particulièrement sensible à l'abattage par le feu : la transformation de CaCO₃ en CaO avec libération de CO₂, même si elle est peu développée, suffit à provoquer une contrainte interne qui fragilise très fortement la roche (Celauro et Maass, 2019).

¹⁹¹ La mine de Bouche Payrol a été retirée de cette étude car la datation de la mine ne repose que sur des ossements humains datés par radiocarbone entre 2480 et 2450 av. J.-C., dont ni le contexte de découverte ni leur stratigraphie n'ont été précisés dans la publication y faisant référence.

Type	Nom du site	Localisation	Début	Fin	Durée	Ext (m)	mois /an
Karstique	Great Orme	Galles	-1878	-922	956	6000	52,67
Reprises	Sagzeche	Tyrol	-816	-780	36	60	13,99
/	Leogang	Tyrol	-1445	-1385	60	90	12,59
/	Mount Gabriel	Irlande	-1868	-1438	430	465	9,07
/	Schwaz-Brixlegg -Gratlspitze	Tyrol	-800	-650	150	150	8,39
Karstique	El Aramo	NO Ibérique	-2875	-2035	840	800	7,99
/	Oberhalbstein (Graubünden)	Tyrol	-745	-500	245	170	5,82
Karstique	Arritzaga - BF	Pyrénées	-930	-810	120	74	5,17
/	Nantyreira	Galles	-1890	-1520	370	225	5,10
/	Schwaz-Brixlegg - Großkogel	Tyrol	-1200	-700	500	300	5,03
/	Crumpane	Irlande	-1739	-1431	308	150	4,09
/	Schwaz-Brixlegg - Blutskopf	Tyrol	-915	-810	105	50	4,00
/	Baita Cludona di Fondo	Tyrol	-900	-400	500	220	3,69
/	Cerro Minado	E Ibérique	-2466	-2347	119	50	3,53
/	Silter di Campolungo	Tyrol	-900	-400	500	199	3,34
Reprises	Mauk (Mauken, Maukental)	Tyrol	-813	-714	99	37,5	3,18
Karstique	Arritzaga - BM	Pyrénées	-1600	-1400	200	74	3,10
/	Les Rousses	Alpes	-2186	-1641	545	200	3,08
/	Llancynfelin (Llangynfelyn)	Galles	-1860	-1530	330	100	2,54
/	Libiola	Ligurie	-3510	-2905	605	150	2,08
/	Saalfelden-B - Viehofen-W	Tyrol	-1600	-1150	450	100	1,86
/	Clue de Roua	Alpes	-3200	-2200	1000	210	1,76
Karstique	El Milagro	NO Ibérique	-2700	-1600	1100	200	1,53
/	Eiblschrofen (Pagan)	Tyrol	-2000	-1600	400	65	1,36
/	Boulysallagh (Dane's Lode)	Irlande	-1883	-1691	192	30	1,31
Karstique	La Profunda in León	NO Ibérique	-2860	-2200	660	100	1,27
/	Knappenkuchl Navis	Tyrol	-1261	-1016	245	25	0,86
/	Rudna Glava	Balkans	-5060	-4500	560	50	0,75
Reprises	Cwmystwyth (Copa Hill)	Galles	-1880	-940	940	70	0,62
Reprises	Parys Mountain	Galles	-2140	-1390	750	50	0,56
Reprises	Vallée d'Aspe - Causiat	Pyrénées	-2580	-2340	240	15	0,52
Reprises	Arroyo del Cuezco	Pyrite Belt	-1250	-750	500	30	0,50
/	Tyn y fron	Galles	-2135	-1885	250	15	0,50
/	José Martín Palacios - BF	Pyrite Belt	-894	-810	84	4	0,40
Reprises	Cabrières - Pioch Farrus	M. central	-2480	-2130	350	15	0,36
Reprises	Llanymynech Ogof	Galles	-1350	-1000	350	15	0,36
/	José Martín Palacios - AF	Pyrite Belt	-488	-389	99	4	0,34
Reprises	José Palacios/Doña Eva	Pyrite Belt	-894	-389	505	20	0,33
/	Cabrières - Neuf Bouches	M. central	-2630	-1470	1160	40	0,29
Reprises	Ogof Wyddon (Park Lodge)	Galles	-1890	-1630	260	8	0,26
/	Nantyrarian	Galles	-1940	-1620	320	10	0,26
/	Ross Island	Irlande	-2562	-1752	810	20	0,21
/	José Martín Palacios - Néo.	Pyrite Belt	-2196	-2029	167	4	0,20
Reprises	Monte Loreto	Ligurie	-3645	-2340	1305	30	0,19
Reprises	Schönbiegler Bau	Tyrol	-987	-547	440	7	0,13
/	Carrigacat	Irlande	-2009	-1693	316	5,06	0,13
/	Mazarrón - Minas de Balsicas	E Ibérique	-3000	-1000	2000	30	0,13
Reprises	Alderley Edge	Galles	-2018	-1528	490	5	0,09
/	Consuelo (Filón Consuelo)	E Ibérique	-3000	-1000	2000	7	0,03

Tableau 25 : Mois de travail maximum par an calculés pour les mines abattues par le feu bien documentées. Les données en rouge et orange sont des informations peu précises.

Discussion des résultats

Mis à part la mine de Great Orme, les mines profitant de systèmes karstiques ne présenteraient pas une exploitation annuelle, et ce, même avec une estimation de calcul de progression la plus lente, soit 1,1 cm/feu (Tableau 25).

Les mines ayant connu de fortes reprises minières ne semblent pas non plus présenter une exploitation annuelle à l'exception de la mine de Sagzeche. Au contraire, ces mines présenteraient de faibles périodes de creusement par an qui pourraient peut-être s'expliquer par le fait que leur extension horizontale est complexe à déterminer. La dimension des mines pourrait être largement surestimée¹⁹², ce qui expliquerait les très faibles durées de creusement calculées.

Enfin, les données qui apparaissent les plus fiables concernent les mines n'ayant pas fait l'objet de reprises qui ne sont pas incluses dans des systèmes karstiques. Si les mines présentant les durées d'exploitation les plus importantes sont celles dont les extensions sont les moins bien connues, il ressort toutefois que les mines alpines présentent les durées de creusement les plus élevées. Ainsi, même en considérant des mois de creusement maximum par an, la médiane de l'ensemble des durées de creusement est de 1,3 mois/an (Figure 128).

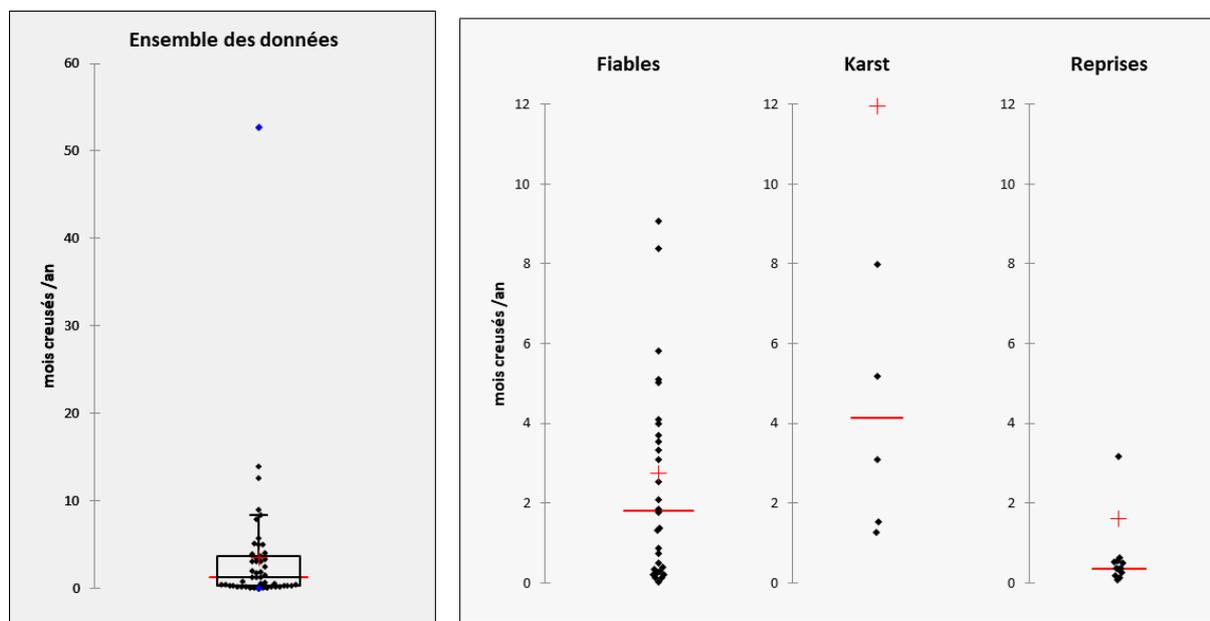


Figure 128 : Analyse de la variation des périodes d'activité minière : à gauche, boîte à moustaches pour l'ensemble des mines ; à droite, diagrammes de dispersion par catégorie de mines (les valeurs > 12 mois/an¹⁹³ ont été exclues pour une meilleure lisibilité).

Cette estimation peut paraître surprenante car elle suppose que la plupart des mines ne seraient exploitées qu'un mois tout au plus dans l'année, et ce alors que le cuivre est un métal utilisé dans la fabrication de la grande majorité des objets. De rares mines pourraient avoir été exploitées annuellement (Great Orme, Sagzeche et Leogang) sur l'ensemble de leur durée supposée d'exploitation mais la majorité d'entre elles feraient l'objet :

- D'exploitations saisonnières environ 1 à 3 mois dans l'année ;

¹⁹² Une partie des galeries plus récentes a pu être comptabilisée dans notre calcul.

¹⁹³ Les mines de Great Orme, Leogang et Sagzeche n'ont pas été affichées.

- D'une exploitation très discontinue alternant des périodes d'exploitation et des phases d'arrêt d'exploitation.

Cette dernière hypothèse ne peut pas être exclue car les datations radiocarbone comme les datations par les corpus céramiques fournissent des intervalles probables et non pas des dates précises de début et de fin d'exploitation. Des ruptures d'exploitations de plusieurs années ou une mauvaise estimation des dates de début et de fin de l'activité minière fausseraient pour beaucoup l'estimation du nombre de mois d'activité par an.

Néanmoins, en supposant que les datations soient fiables, l'hypothèse d'exploitations majoritairement saisonnières reste fragile car les données ne sont pas bien contraintes tant pour la durée d'exploitation de la mine que pour son extension horizontale. Le postulat d'une distance exploitée de 1,1 cm/feu et également critiquable car l'efficacité de l'abattage par le feu est dépendante :

- Des roches encaissant le gisement : le coefficient d'expansion thermique varie selon les minéraux du fait de leur élasticité (Willies et Weisgerber, 2000 ; Celauro et Maass, 2019) ;
- De l'essence de bois utilisée¹⁹⁴, de son degré d'humidité et de la forme des bûchers (Py et Ancel, 2006 ; Poggiali *et al.*, 2017).

Perspectives de recherche

Une estimation de la distance de progression horizontale des mineurs dans les mines de cuivre évoquerait des exploitations majoritairement saisonnières¹⁹⁵, ou plus probablement des exploitations discontinues alternant des années avec et sans exploitation. Cependant, les différences de coefficient d'expansion thermique des minéraux ; les différences de pouvoir calorifique des espèces de bois utilisées ; la difficulté de déterminer le nombre de brasiers simultanés ; mais plus encore, les marges d'erreur de datation des mines font que ces observations ne peuvent rester qu'à l'état d'hypothèses.

La question de l'organisation communautaire et des besoins de subsistance de base pouvant impliquer des activités minières (i) à plein temps et (ii) toute l'année demeure donc ouverte.

Une piste de recherche consisterait en l'étude de traces de suie laissées par l'exploitation minière (pouvant être liées au besoin d'éclairage ou encore à des projections de cendres dues à l'abattage par le feu). De fines lamines de suie pourraient alors être piégées dans des concrétions calcaires en formation si l'environnement de la mine est calcaire. Ces concrétions formant des doublés annuels (une lamine pour la saison chaude (printemps et été) et une autre pour la saison froide (automne et hiver)), la découverte de suie dans l'une et/ou l'autre de ces lamines pourrait permettre de prouver une saisonnalité ou une annualité et plus encore, de possibles courtes périodes de ruptures d'exploitation qu'il n'est pas possible de déterminer autrement.

L'étude de traces de suies conservées dans les spéléothèmes¹⁹⁶ est envisagée avec Ségolène Vandavelde sur du matériel récupéré en août 2022.

¹⁹⁴ Le pouvoir calorifique des bois varie selon les essences (Py et Ancel, 2006 ; Poggiali *et al.*, 2017).

¹⁹⁵ Cela pourrait également être le cas des mines exploitant d'autres ressources, même si les indices sont plus ténus. Ainsi, les mines de sel du V-III^e millénaire av. J.-C. de Duzdaği (en Azerbaïdjan) présentent de très nombreuses structures d'habitation, ce qui témoignerait d'une exploitation saisonnière des mines du fait de la reconstruction d'habitats (Hamon, 2016).

¹⁹⁶ Voir notamment Vandavelde *et al.* (2021) pour plus de détails concernant les méthodologies pouvant être employées.



Figure 129 : À gauche : possibles traces de suie dans la paroi d'une galerie d'exploitation de cuivre (datation céramique du début du III^e millénaire av. J.-C.), à droite : stalagmite conservée dans un travers-banc d'accès d'une mine médiévale (datation ¹⁴C du 13^e siècle apr. J.-C.). Les deux sites sont localisés dans l'Aveyron.

Néanmoins, ce type d'étude semble complexe à appliquer de manière systématique car il est difficile de trouver du matériel se prêtant à ce type d'analyse. La galerie échantillonnée ne doit pas correspondre à un front de taille mais à une portion de galerie utilisée à des fins de circulation ou de stationnement où les indices des nombreux allers-retours des mineurs ont plus de chance d'être conservés. Le matériel échantillonné doit être issu de stalagmites et non pas de stalactites car la circulation d'eau au cœur de ces dernières efface progressivement l'enregistrement. Cependant, les trajets des mineurs peuvent piétiner les stalagmites en formation. Les stalagmites découvertes en mine sont donc souvent postérieures à l'activité minière. Cette étude, si elle aboutit, ne pourra pas être appliquée à un grand nombre de mines.

V/5 Degrés de spécialisation de la production de cuivre

V/5.a Qu'est-ce que la spécialisation des tâches ?

Par analogie avec la période moderne, il a longtemps été admis que la spécialisation de l'artisanat (parfois nommée division du travail) conduirait à l'augmentation des quantités produites et à un export des surplus (Averbouh *et al.*, 2006 ; Brun, 2015). Cette définition courante se base sur une vision actuelle et, comme Norgaard et Reiter (2020) le soulignent, il n'est pas possible d'affirmer que le surplus était la norme à la Protohistoire.

Une définition plus en adéquation avec la période étudiée est celle liant une augmentation de la production à une organisation sociale complexe et stratifiée impliquant des groupes spécialisés dédiés au travail du métal, contrôlés ou non par des élites (Figure 130).

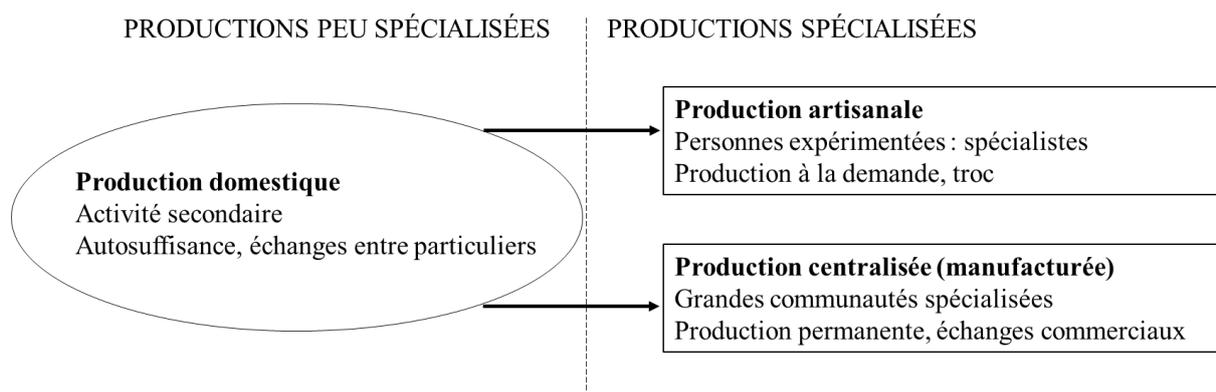


Figure 130 : Résumé des théories concernant le degré de spécialisation des productions en lien avec l'organisation des sociétés et des échanges, d'après Stöllner (2012) et Norgaard et Reiter (2020).

Les calculs de quantité de cuivre extractible révèlent des disparités de capacité de production entre les grandes régions définies. Ces disparités de volumes de production pourraient découler de facteurs liés aux gisements. L'étude de la spécialisation des tâches nécessite donc une compréhension des facteurs géologiques, en particulier du type de gisement exploité, influençant les stratégies d'exploitation et les procédés métallurgiques¹⁹⁷.

Des différences d'organisation sociale pourraient influencer sur la dimension des mines et des ateliers et donc sur les volumes produits. L'étude de cette division du travail implique donc la prise en compte de critères techniques (procédés et productions) et d'indices d'organisation sociale. De tels critères ont été identifiés par Patrice Brun (2015) qui propose une classification des types de spécialisation des tâches basée sur 5 critères possédant l'intérêt de pouvoir être reconnus par les archéologues : la taille de l'unité de production (U), la périodicité de l'activité (P), le niveau de dépendance vivrière (D), le volume de production (V) et le niveau de technicité (D). Brun (2015) découpe chacun de ces critères en trois niveaux de spécialisation : le score de 1 correspondant à niveau de spécialisation le plus bas, 3 au plus important (soit à l'organisation la plus complexe impliquant le plus de main-d'œuvre).

Critère	Score 1	Score 2	Score 3
U : dimension de l'unité de production	Domestique	Atelier	Manufacture
P : périodicité de l'activité	Occasionnelle	Saisonnaire	Permanente
T : niveau de technicité	Bas	Moyen	Élevé
V : volume de production	Petit (demande domestique)	Moyen (supérieur aux besoins du groupe)	Gros (largement supérieur aux besoins du groupe)
D : dépendance vivrière	Faible (produit sa propre nourriture)	Moyen (nourriture obtenue en échange de rémunération)	/

Figure 131 : Synthèse des critères de distinction des degrés de spécialisation des tâches d'après Brun (2015).

Cette classification demande de prendre en compte un nombre conséquent de sites. Le nombre de mines et d'ateliers référencés pour l'étain, l'or et le plomb-argent étant limité, nous avons choisi de restreindre l'étude aux mines et ateliers de cuivre dont le nombre est beaucoup plus conséquent.

¹⁹⁷ Par exemple, les riches gisements de la péninsule Ibérique semblent avoir été exploités principalement dans leurs portions superficielles et des carbonates de cuivre y ont été fondus sous atmosphère réductrice. En revanche, les mines des Alpes ont été creusées en souterrain dans des roches très résistantes et des chalcopyrites y ont été grillées.

V/5.b Recherche de critères adaptés à la chaîne opératoire de production du cuivre

Les critères proposés par Brun (2015) ont pour but d'être généraux et de permettre des comparaisons à large échelle. Nous avons alors cherché à les adapter aux sites dont les renseignements sont les plus complets, soit 83 mines et 73 ateliers de métallurgie extractive. Les critères pour les ateliers et les mines ne peuvent alors pas être les mêmes car les technologies employées ne sont pas comparables.

Malheureusement, dans le cas des mines comme des ateliers, il apparaît impossible de définir le niveau de dépendance vivrière (D). En effet, de la nourriture n'a été identifiée que dans de très rares sites et nous ne disposons pas d'indices clairs permettant de définir les modalités d'approvisionnement en nourriture de l'ensemble des mines et ateliers en dehors de ces rares découvertes. La périodicité de l'activité (P) (occasionnelle, saisonnière ou permanente) est, comme précédemment discuté, très difficile à caractériser dans le cas des mines mais l'est tout autant dans le cas des ateliers métallurgiques. L'absence de données ne nous permet donc pas de prendre en compte ce critère.

Trois critères ont tout de même pu être retenus : la dimension de l'unité de production (U), le niveau de technicité (T) et le volume de production (V).

Critère	Mines		Métallurgie extractive	
	Pris en compte	Fiabilité	Pris en compte	Fiabilité
V : volume de production	Quantité de cuivre extractible par an	Marge d'erreur importante	Type de réacteur employé	Pas toujours retrouvé
U : dimension de l'unité de production	Volume (m ³) abattu par an	Marge d'erreur importante	Atelier domestique ou aire spécialisée	Donnée parfois subjective
T : niveau de technicité	Type d'extraction	Données précises	Minerai(s) fondu(s)	Données souvent précises

Tableau 26 : Résumé des éléments pris en compte pour chaque catégorie et fiabilité des observations.

Volume de production

Volume de production des mines

Dans le cas des mines, le volume de production correspond aux quantités de cuivre extractible précédemment calculées¹⁹⁸. Les données ont été réparties en trois catégories selon la production extractible annuelle (et théorique) des mines :

- Volume de production faible : <0,1 t /100 ans, soit moins de 1 kg par an ;
- Volume de production moyen : 0,1 à 1 t /100 ans, soit entre 1 et 10 kg /an ;
- Volume de production fort : > 1 t/100 ans, soit plus de 10 kg/an.

Ces seuils ont été choisis pour permettre une discrimination efficace¹⁹⁹. Cette classification ne présage pas qu'une production annuelle de moins de 1 kg correspond à la production domestique d'une petite communauté autonome, que 1 à 10 kg de cuivre produit excéderait les besoins locaux et qu'une production de plus de 10 kg par an permettrait une commercialisation des productions.

Les résultats obtenus présentés sous la forme d'un graphique empilé proportionnel (Figure 132) montrent une augmentation du nombre de mines de forts volumes de production au cours du temps, et

¹⁹⁸ Elles sont plus représentatives que le volume de la mine car une quantité importante de m³ de roche extraits n'impliquent pas nécessairement une quantité importante de cuivre extrait.

¹⁹⁹ 0,1t par an correspond à la médiane des productions de cuivre par mine.

en particulier à partir de 1900 av. J.-C. ce qui pourrait traduire une spécialisation de plus en plus forte à partir du début de l'âge du Bronze.

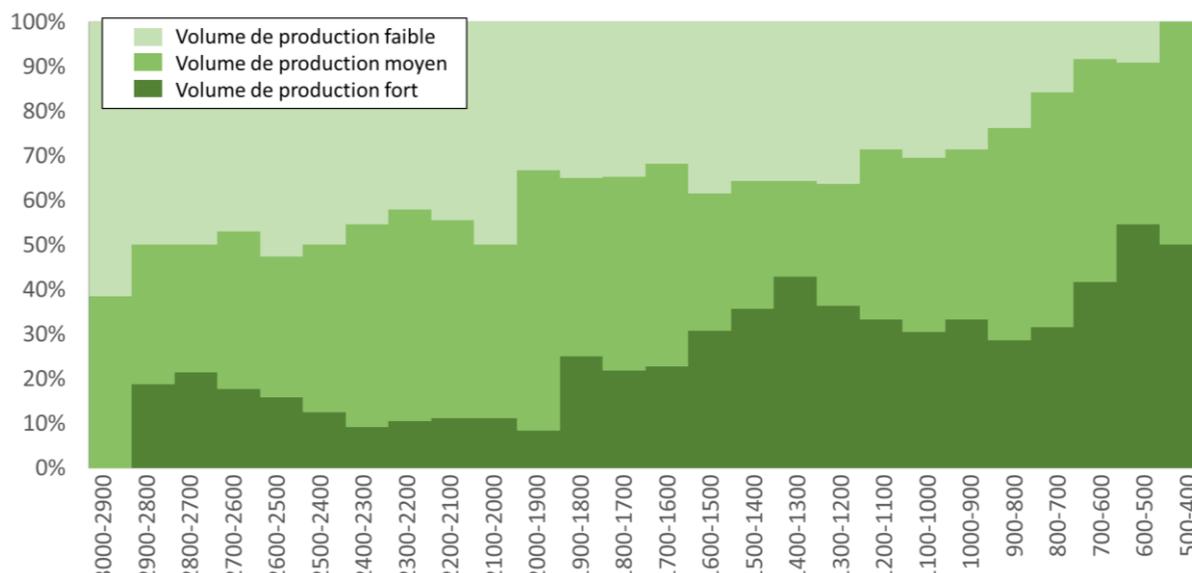


Figure 132 : Pourcentage relatif du volume de production pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82).

Cette augmentation de la production semble cependant se produire de manière décalée selon les régions. Par exemple, dans la péninsule Ibérique, les mines à forts volumes de production apparaissent plus tardivement, vers 1400 av. J.-C. (Figure 133).

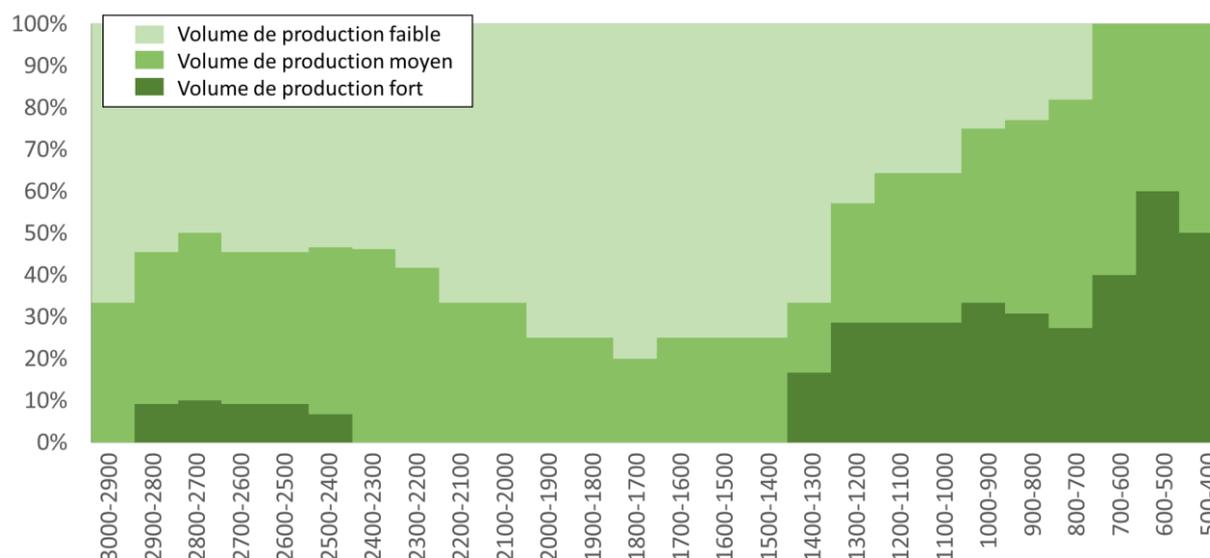


Figure 133 : Pourcentage relatif du volume de production des mines de cuivre de la péninsule Ibérique (n=32).

Volume de production des ateliers

L'augmentation des volumes produits par les mines est-elle contemporaine d'une augmentation des volumes produits par les ateliers ? Il nous faut trouver un critère adapté pour répondre à cette question.

En suivant le raisonnement de Amzallag (2009), un marqueur de la spécialisation des productions serait l'abandon des creusets pour les fours qui permettraient de fondre beaucoup plus de concentré de minerais et donc d'obtenir des quantités de cuivre métal plus importantes par fonte (15-

30 g de cuivre serait obtenu lorsque les minerais sont fondus dans des creusets comme 50-500 g de cuivre lorsqu'ils sont fondus dans un four (Amzallag, 2009)). Selon ce critère, nous proposons quatre catégories :

- Présence uniquement de creusets ;
- Présence de vases-fours ;
- Présence de fours ;
- Présence d'une batterie de fours et/ou de grandes aires de grillage.

Cette distinction souligne des spécificités régionales (Figure 134) : dans l'ouest de la Méditerranée, des fours (perforés) sont principalement employés (Georgakopoulou, 2016) ; dans les Alpes de grandes structures (fours en batteries et grandes aires de grillages) ont été retrouvées alors que dans le sud-ouest de la Méditerranée et le Massif central les vases-fours succèdent aux creusets seuls (Rovira et Ambert, 2002).

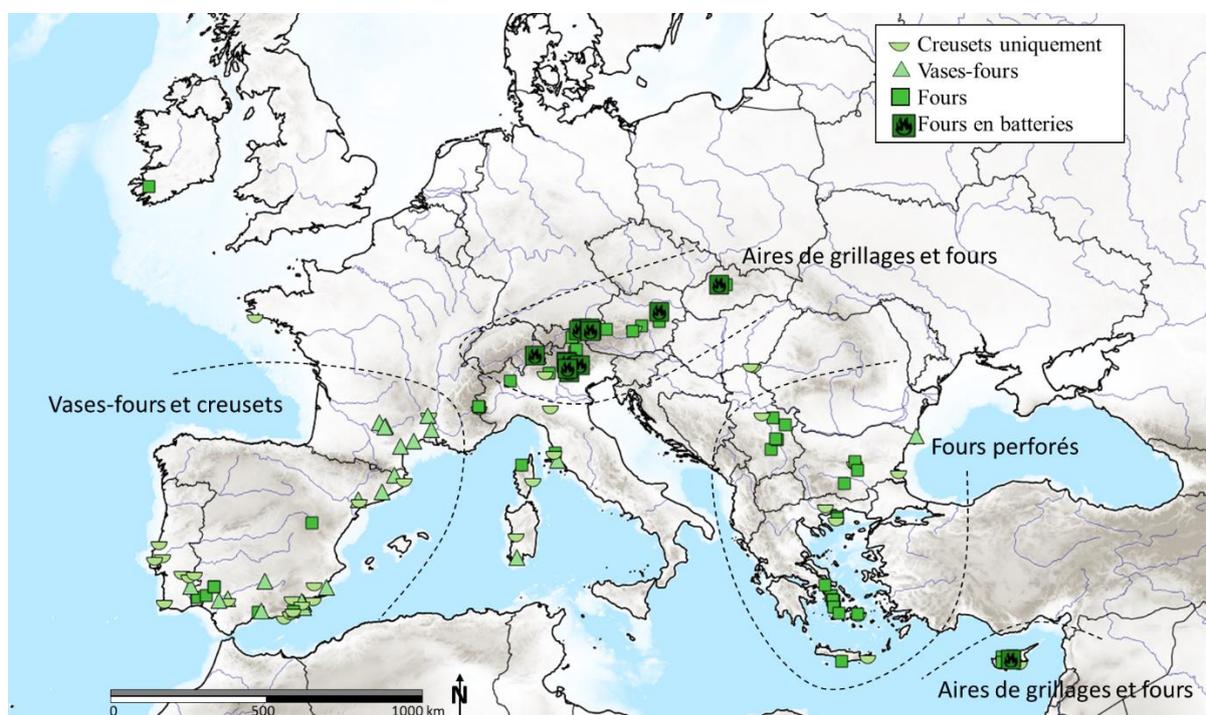


Figure 134 : Répartition des types de réacteurs pour les 73 sites de métallurgie extractive du cuivre étudiés.

L'analyse conduite sur 73 ateliers ne montre pas d'évolution impliquant l'abandon des creusets pour les vases-fours/fours puis pour de grandes aires métallurgiques. Le nombre de grandes structures fermées, telles que les fours et les fours en batterie, augmente à partir de 1900 av. J.-C. soit au début de l'âge du Bronze (Figure 135). Toutefois, la métallurgie utilisant uniquement des creusets n'est pas abandonnée : il n'y a pas de remplacement des systèmes techniques, mais plutôt une intégration des différentes innovations techniques à l'échelle européenne.

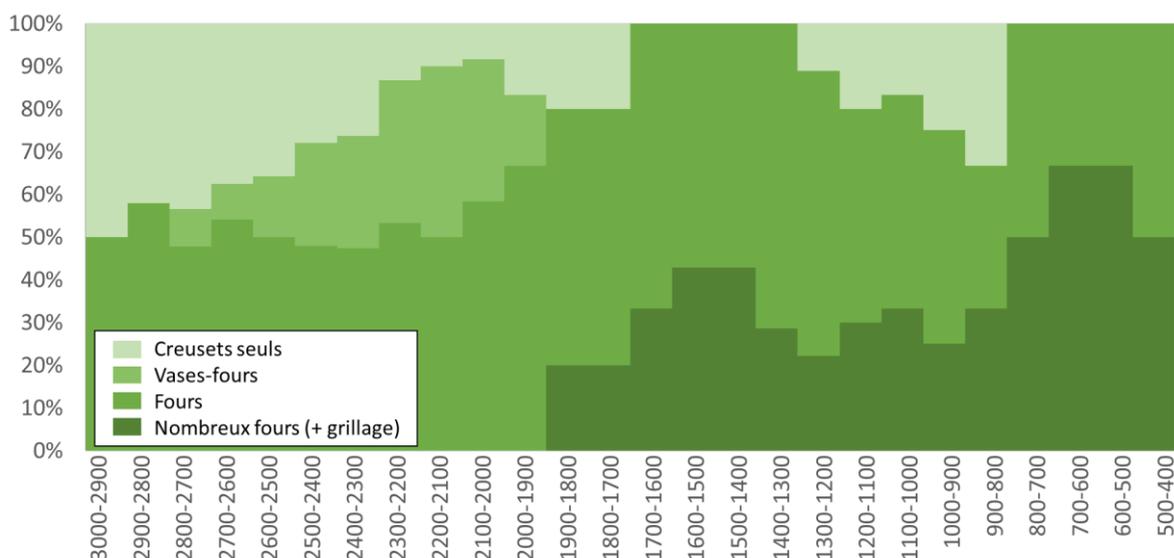


Figure 135 : Pourcentage relatif du volume de production pour l'ensemble des ateliers de métallurgie extractive du cuivre considérés (n=73).

Cette observation répond en partie à un débat entre Thornton *et al.* (2010) et Amzallag (2009). Amzallag (2009) propose qu'au Proche-Orient, une transition technologique se soit produite, marquée par l'abandon de la métallurgie utilisant des creusets au profit d'une métallurgie réalisée dans des fours, permettant de fondre une plus grande quantité de minerai en une seule opération. Cependant, Thornton *et al.* (2010) contestent cette hypothèse, estimant que la différence de quantité de cuivre produite entre un creuset et un four est exagérée par Amzallag (2009). Selon ces auteurs, la principale différence entre les fours et les creusets réside dans les températures atteignables, les températures de fusion dans des creusets ne pouvant pas dépasser les 1200 °C²⁰⁰. Notre analyse couvrant l'ensemble de l'Europe de l'Ouest soutient l'hypothèse de Thornton *et al.* (2010) plutôt que celle d'Amzallag (2009) : le type de réacteur utilisé s'adapterait aux minerais exploités, et les creusets ne succéderaient clairement aux fours que dans certaines régions.

Un four est nécessaire pour fondre des minerais sulfurés, tandis qu'un creuset est suffisant pour fondre des carbonates de cuivre (cf II/1.c). Un abandon des creusets n'est donc pas nécessaire dans les régions méditerranéennes où les carbonates de cuivre sont abondants. Il n'est donc pas surprenant que des vases-fours et des creusets soient utilisés dans l'ouest de la Méditerranée pour fondre des carbonates de cuivre.

De nombreux fours ont été utilisés à la même période dans l'est de la Méditerranée. Les métallurgistes de l'est de la Méditerranée ne seraient pas nécessairement plus spécialisés, peut-être employaient-ils des fours car les carbonates sont plus couramment associés à des sulfures dans ces régions.

De grands centres miniers associés à de grands centres métallurgiques ?

Une augmentation de la dimension des ateliers et des mines pourrait se produire vers 1900 av. J.-C. mais les minerais extraits de grands centres miniers ne pas toujours fondus dans de grands ateliers. Deux cas illustrent particulièrement bien notre propos.

²⁰⁰ Dans le cadre d'expérimentations Hanning *et al.* (2010) sont parvenus à dépasser une température de 1200°C dans un creuset à l'aide d'une ventilation forcée par six soufflets.

Au Pays de Galles, la faible dimension des fosses associées aux très grandes mines de Great Orme (Williams, 2013) indique qu'une production minière intense pourrait être traitée et fondue dans des petits réacteurs dispersés autour de la mine et non pas dans un grand atelier regroupant de grands fours ;

Thornton (2009) a documenté deux traditions métallurgiques très différentes et néanmoins contemporaines à Tepe Hissar (atelier chalcolithique du nord-est de l'Iran). Dans la partie domestique du site, l'analyse de nombreux fragments de creusets de fusion et de scories métallurgiques a démontré l'existence d'une tradition très développée de production de cuivre arsénié sans l'utilisation de fours. À seulement 100 m de ce site, dans une zone d'ateliers multiartisans, l'analyse de fragments de fours et de scories contemporains a mis en évidence une tradition bien établie de production de cuivre, de cuivre au plomb et de plomb visant probablement à être exportés. Des technologies impliquant d'une part des creusets et d'autre part des fours, ont donc été employées dans différentes parties du même établissement pendant plus de 500 ans. Une tradition domestique de cuivre arsénié (consommé localement) pourrait ainsi coexister avec une tradition à plus large échelle de cuivre, cuivre-plomb et plomb destinés à être exportés.

Dimension de l'unité de production

Dimension des mines

La dimension de l'unité de production correspondrait au volume de la mine mais, certaines mines étant exploitées sur de longues périodes, il apparaît plus pertinent de prendre en compte le volume extrait par an. Ce critère nous indique si de grandes mines sont ouvertes très rapidement mais il présente de nombreuses limites (qui reprennent celles déjà évoquées dans l'étude de la saisonnalité des exploitations) :

- Rien n'indique que les mines sont exploitées sur toute la durée estimée par leur datation : il peut y avoir des arrêts d'activité et des reprises où la dimension de l'unité de production est beaucoup plus importante ;
- L'estimation du volume des mines est complexe et sujette à une marge d'erreur très importante.

En gardant en tête ces limites, trois niveaux de découpage peuvent néanmoins être proposés :

- Progression lente : < 1 m³/an ;
- Progression moyenne : entre 1 et 10 m³/an ;
- Progression rapide : > 10 m³/an.

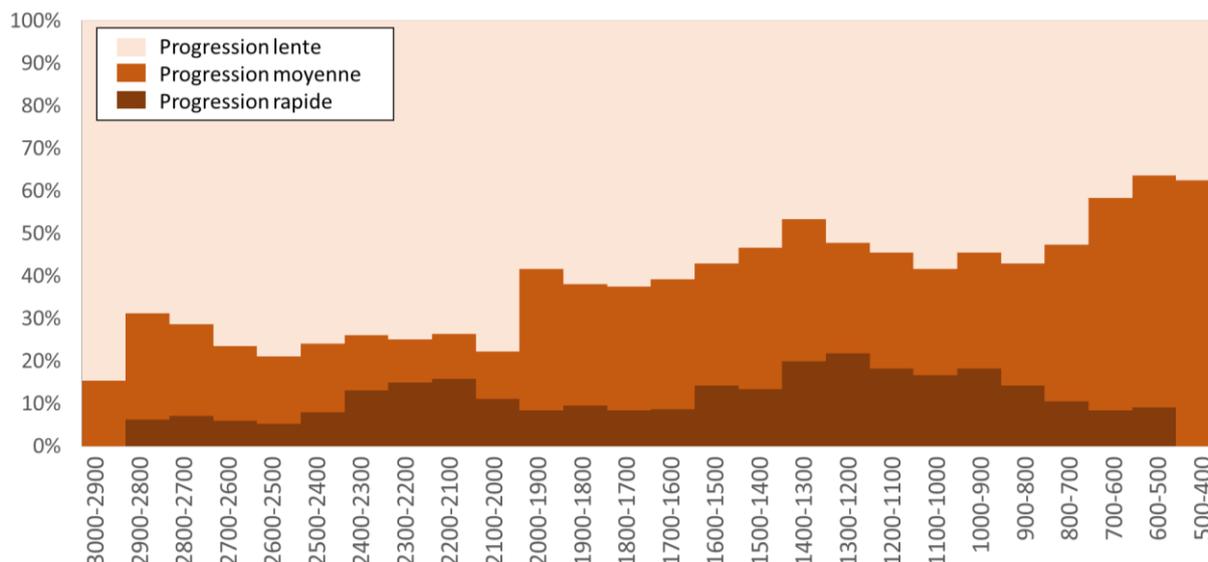


Figure 136 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=78).

Le volume de roches percées par an augmente au cours du temps : la progression semble légèrement plus rapide, passant de 15 % de mines moyennement à rapidement creusées en 3000 av. J.-C. à 58 % à la fin de l'âge du Bronze. Le nombre de mines creusées rapidement augmente entre 1600 et 1200 av. J.-C. (au Bronze moyen) avant de diminuer²⁰¹. Ce critère (le volume extrait) indiquerait donc une spécialisation croissante depuis le Néolithique/Chalcolithique sans présenter d'accélération nette au plein âge du Bronze.

La vitesse de progression dépend cependant beaucoup de la dureté de la roche encaissante. Néanmoins, ne considérer que les encaissants résistants ne permet pas non plus de souligner une augmentation des volumes de roche abattus par an (Figure 137). L'âge du Bronze (2000-800 av. J.-C.) se caractérise d'ailleurs par un plateau.

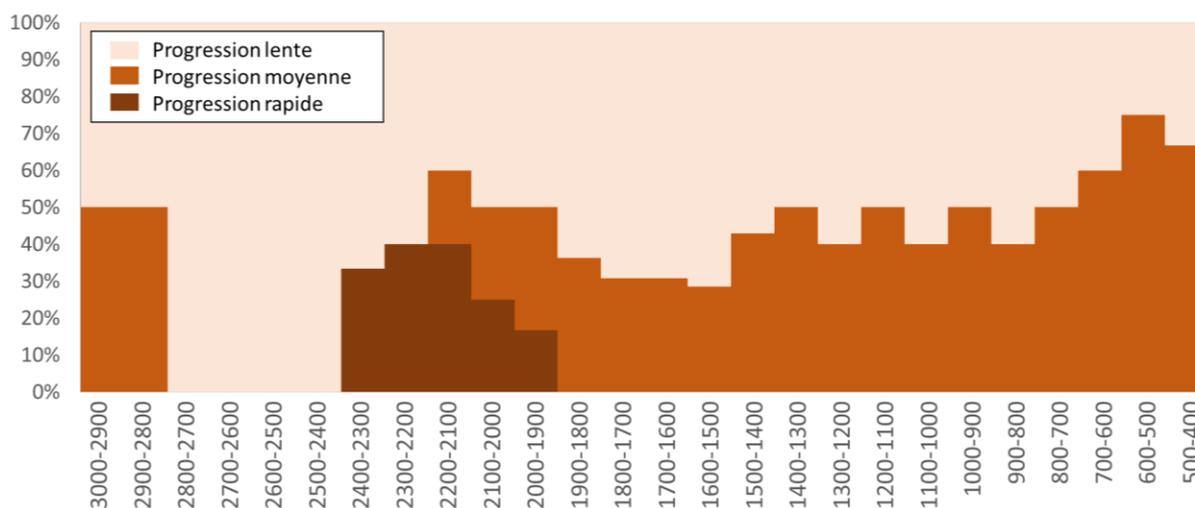


Figure 137 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour les mines de cuivre à encaissant résistant (n=28).

²⁰¹ La progression observée est principalement due à l'augmentation du nombre de mines présentant une vitesse de progression moyenne.

La prise en compte uniquement des mines présentant des roches encaissantes dans lesquelles la progression est supposée plus aisée (cavités karstiques, zones d'altération supergène, schistes) ne montre pas une augmentation nette de la vitesse de progression (Figure 138).

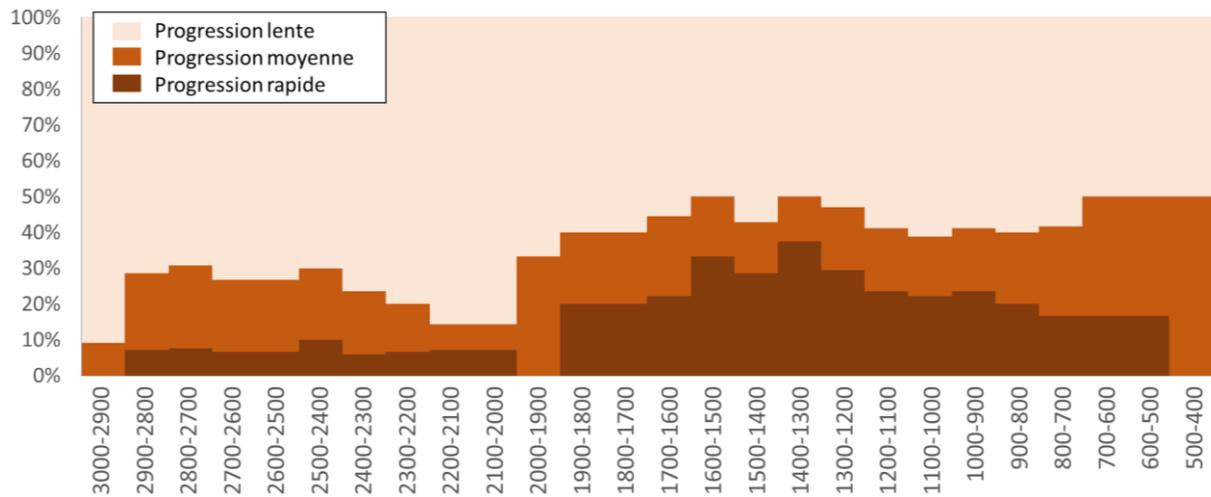


Figure 138 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour les mines de cuivre à encaissant peu résistant (n=54).

La dimension des mines ne serait pas que lié à la dureté des roches encaissantes et donc à géologie locale mais pourrait dépendre de stratégies d'extraction au cas par cas (Figure 139).



Figure 139 : Répartition des mines à progression rapide (à gauche, n=11), moyenne (au centre, n=18) et lente (à droite, n=49) : des mines présentant un fort nombre de m³ abattus par an côtoient des mines où la progression est lente dans chacune des grandes régions exploitées à l'âge du Bronze.

Dimension des ateliers

Plusieurs critères peuvent être retenus pour définir l'accroissement possible de la dimension des unités de production au cours du temps.

La dimension des ateliers pourrait se corrélérer à la quantité de scories retrouvées mais cela serait oublier que (i) la réduction de carbonates de cuivre ne produit que peu de scories alors que la pyrometallurgie des sulfures en produit en revanche beaucoup et que (ii) les scories peuvent être refondues pour en extraire le cuivre résiduel. Nous ne pouvons donc pas utiliser cette information.

Il semble plus intéressant de prendre en compte l'unité de production en elle-même soit l'atelier.

Cinq catégories peuvent être proposées :

- Abri ;
- Domestique ;
- Petit atelier ;
- Atelier moyen ;
- Grand atelier.

Estimer la dimension des ateliers est subjectif mais distinguer les productions « domestiques » et les grands ateliers dédiés au travail des métaux est intéressant car de nombreux auteurs indiquent que, dans le Levant, les productions de métaux chalcolithiques seraient clairement réalisées avec une division du travail minimale. La métallurgie d'extraction (et d'élaboration) serait effectuée en contexte domestique puis le travail des métaux se spécialiserait progressivement pour être ensuite réalisé dans des ateliers dédiés (Shalev, 1994 ; Kerner, 2008 ; Golden, 2010 ; Abdel-Motelib *et al.*, 2012 ; Milevski, 2013).

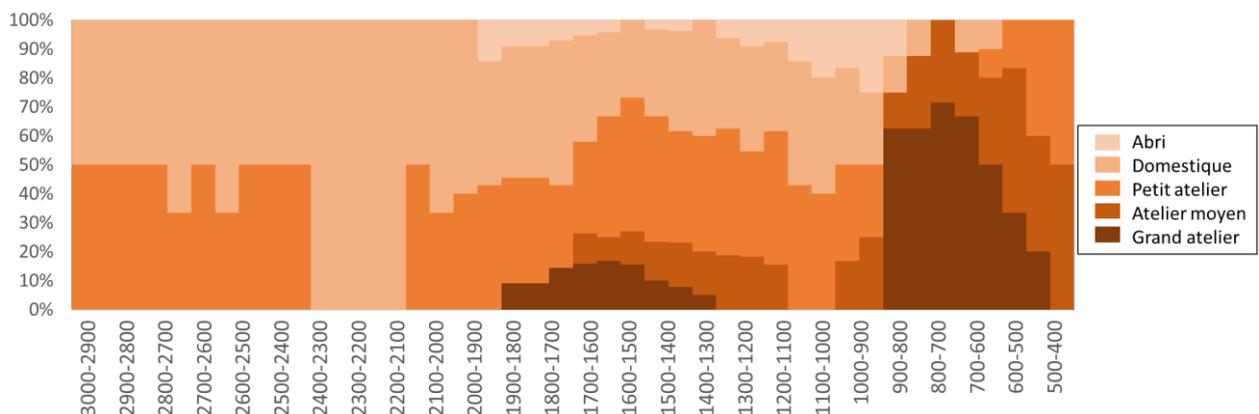


Figure 140 : Pourcentage relatif des dimensions d'unités de production pour l'ensemble des ateliers de métallurgie extractive du cuivre considérés (n=73).

Les résultats obtenus montrent cependant que de nombreux petits ateliers spécialisés sont déjà en activité dans les Balkans (ils représentent un peu moins de la moitié des exploitations) et que tel est à nouveau le cas au cours de la seconde moitié du III^e millénaire (Figure 140). Une augmentation très brutale du nombre de grands ateliers dédiés à la fonte de minerais de cuivre s'observe entre 1900 et 1400 av. J.-C. puis après 900 av. J.-C. Le pourcentage de sites d'ateliers d'extraction en contexte domestique est alors extrêmement bas, marquant une rupture assez nette avec les périodes précédentes.

Cependant, les grands ateliers ne sont pas uniformément répartis en Europe.

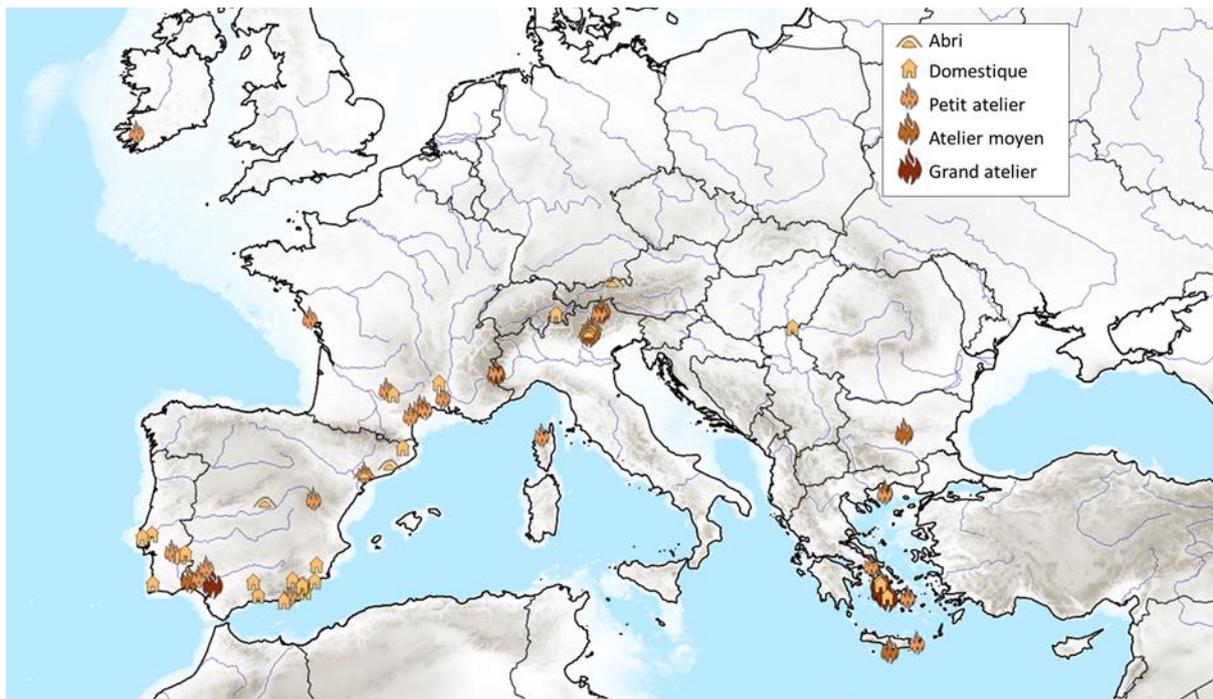


Figure 141 : Répartition des différents types d'unités de production de métallurgie extractive du cuivre entre 3000 et 2000 av. J.-C. (n= 70).

Au Chalcolithique, les ateliers semblent de taille assez réduite bien que la présence de très grands ateliers mérite d'être soulignée dans le pourtour égéen, dans les Alpes et dans le sud de la péninsule Ibérique (Figure 141).

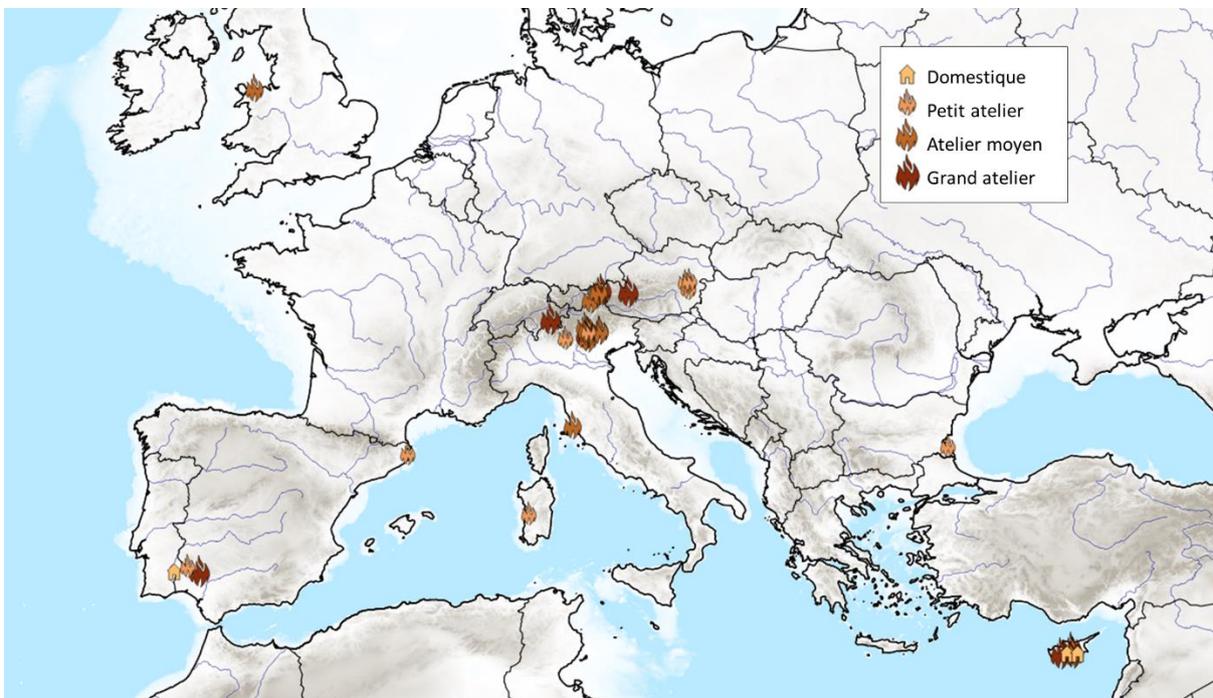


Figure 142 : Répartition des différents types d'unités de production de métallurgie extractive du cuivre après 1500 av. J.-C. (n =33).

De grands ateliers sont présents dans la zone alpine dès le Bronze moyen mais dans le sud-ouest de la péninsule Ibérique (*Pyrite Belt*) et à Chypre, on trouve des ateliers en contexte d'habitat à proximité d'ateliers de grande dimension (Figure 142). Des niveaux d'organisation des productions et donc de spécialisation différents pourraient donc coexister dans ces régions.

Niveau de technicité

Technicité de l'exploitation minière

Plusieurs éléments pourraient permettre d'estimer le niveau de technicité nécessaire à l'exploitation d'une mine en roche, comme la teneur en minerai du gisement ou la technicité nécessaire à son exploitation.

La teneur du gisement pourrait constituer une première piste : des gisements plus pauvres en cuivre pourraient demander plus d'efforts d'exploitation pour obtenir un rendement similaire à celui d'un gisement plus riche. Cependant, ce critère dépend beaucoup des types de gisements et donc de la géologie locale²⁰² et n'est donc pas pertinent pour définir une éventuelle spécialisation croissante à l'échelle de l'âge du Bronze en Europe de l'Ouest.

Un autre critère envisageable pourrait être la technicité du creusement. Il serait alors possible de considérer qu'il est plus complexe d'exploiter une mine souterraine qu'une mine peu profonde à ciel ouvert. Néanmoins (i) il n'y a pas de raison d'ouvrir une mine souterraine si le gisement affleure uniquement en surface et (ii) nous avons montré que les mineurs étaient capables de s'adapter à l'exploitation de gisements très divers depuis le Néolithique (cf V/2.a). L'idée de regrouper les mines selon les types de creusements (ramassage de surface, puits, mines à ciel ouvert, exploitations souterraines) ne produit pas de résultat probant car les types d'extraction sont déjà maîtrisés au Néolithique. Les types de creusement reflètent donc les morphologies des gisements exploités :

- Ciel ouvert (représenté majoritairement par des tranchées) ;
- Puits (et rares tranchées très profondes) ;
- Souterrain complexe.

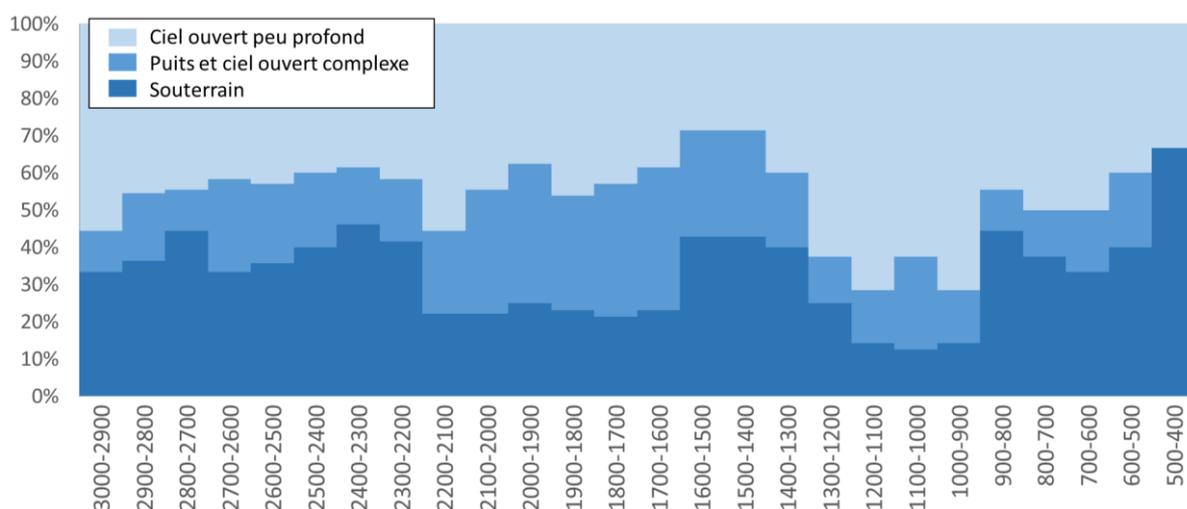


Figure 143 : Pourcentage relatif des différents types de creusement pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82). Il n'y a pas d'augmentation de la quantité de mines souterraines exploitées.

Il en va de même pour le type d'encaissant : les mineurs sont capables d'exploiter des roches très résistantes dès le Néolithique et un découpage en trois groupes ne souligne pas une augmentation du nombre de mines dans des encaissants résistants (Figure 144).

²⁰² Les gisements sédimentaires pauvres en cuivre du Pays de Galles s'isolent des riches zones d'altération supergène exploitées en péninsule Ibérique.

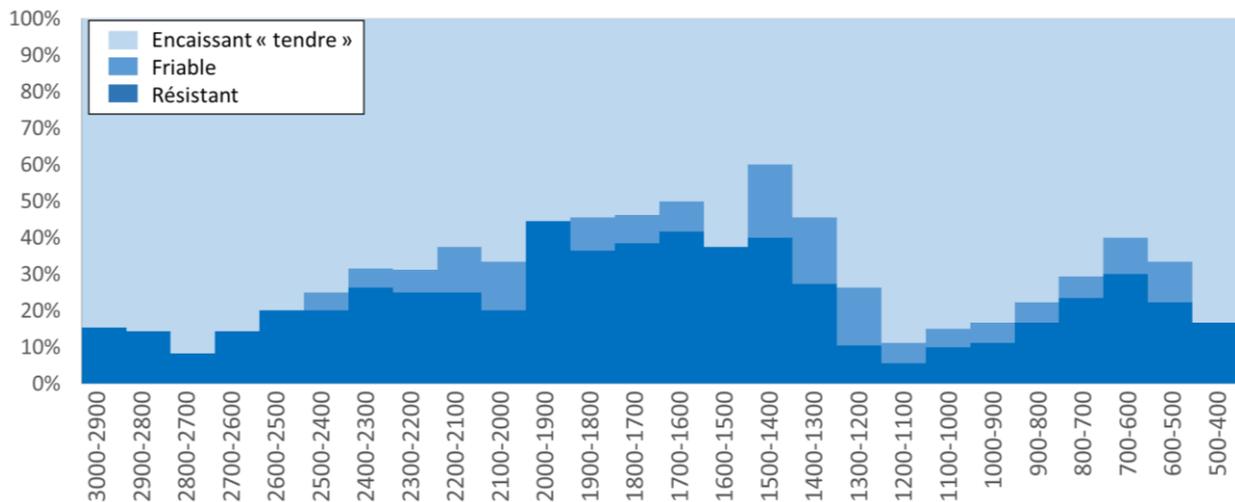


Figure 144 : Pourcentage relatif des différents types d'encaissants pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82).

Ce critère reflète lui aussi des disparités régionales. Par exemple, la diminution du nombre de mines dans des roches dures vers 1300 av. J.-C. est imputable à l'augmentation du nombre de mines en exploitation dans la péninsule Ibérique exploitant les riches zones d'altération supergène locales.

Le niveau de technicité des ateliers est difficilement évaluable

Étudier le degré de technicité des ateliers pose également une difficulté notable. Il aurait été pertinent d'estimer combien d'étapes de la chaîne opératoire ont été réalisées sur un même site et en particulier les processus de métallurgie d'extraction et d'élaboration²⁰³. La fonte de minerai et le travail du bronze par un même groupe d'individus impliquent des savoir-faire certes complémentaires mais surtout des maîtrises techniques importantes. Toutefois, malheureusement :

- Les documents publiés ne permettent pas toujours d'établir une distinction claire entre les deux types d'ateliers (Genz, 2000 ; Bourgarit, 2019) ;
- Dans certaines régions telles que le sud du Portugal, les petits établissements producteurs de bronze sont difficiles à retrouver (Figueiredo *et al.*, 2010)²⁰⁴ ;
- Nous n'avons initialement pas pensé à recenser cette information à notre base de données.

Estimer la qualité et la quantité des artefacts produits pourrait également permettre de déterminer si des artefacts plus élaborés sont produits dans des ateliers d'élaboration très spécialisés, distincts des ateliers d'extraction comme cela est supposé par Genz (2000) et par Norgaard et Reiter (2020). Ces grands ateliers exporteraient leurs productions sur de plus grandes distances. Néanmoins, les interrogations soulevées par Figueiredo *et al.* (2010) concernant les productions d'artefacts du Bronze final au Portugal pourraient indiquer qu'un biais archéologique majeur pourrait fausser cette étude : les grands sites de métallurgie d'extraction spécialisés (comme ceux présents dans de

²⁰³ Il est difficile de déterminer si la minéralurgie (tri et concassage des minerais) mais aussi la pyrométallurgie (fonte des minerais concassés pour obtenir du cuivre sous forme de métal) étaient ou non effectuées par les mêmes individus que ceux impliqués dans l'extraction minière. Strahm (1988) considère à ce sujet que les métallurgistes de métier apparaissent vers l'âge du Bronze, avec la fonte de minéraux de cuivre sulfurés (du fait de la difficulté de maîtrise technique des processus d'oxydation puis de réduction). De plus, en étudiant le sud de l'Espagne, Lull *et al.* (2010) précisent que des sites spécialisés dans la production de cuivre apparaissent à partir du II^e millénaire av. J.-C. Selon ces auteurs, l'accès au métal pourrait alors être restreint à certains groupes de spécialistes.

²⁰⁴ L'auteur précise que ces ateliers emploient peut-être des processus pyrométallurgiques simples.

nombreuses zones orientales/méditerranéennes) et les petits établissements ne présentent pas les mêmes degrés de visibilité. Or, à ce stade de la recherche, il n'est pas possible de déterminer si l'augmentation du nombre d'artefacts en circulation au Bronze final pourrait être issue de productions significatives de petits sites d'habitat fondant des minerais et élaborant des artefacts (comme c'est le cas à Baiões).

Un dernier critère que nous pourrions proposer consiste à observer les minerais fondus. En effet, comme déjà mentionné, la fonte de sulfures de cuivre tels que la chalcopirite nécessite un niveau de maîtrise technique élevé pour séparer le cuivre du fer. Il serait donc envisageable de supposer une spécialisation croissante des productions à échelle européenne à mesure que le nombre de sites exploitant des chalcopirites augmente. Cependant, les types de minerais fondus dépendent largement de la géologie locale. Il est donc préférable d'observer l'évolution des types de minerais fondus (oxydes et/ou carbonates de cuivre, cuivres gris, chalcopirites) par grandes régions.

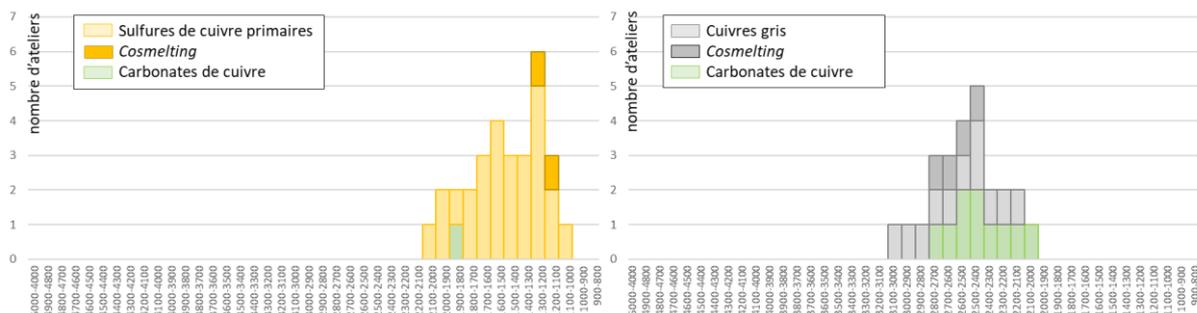


Figure 145 : Nombre d'ateliers par types de minerais de cuivre fondus, à gauche à Chypre, à droite, dans le Massif central.

V/5.c Des disparités régionales très marquées

Des pratiques et des stratégies d'exploitation différentes selon les régions

Nos premières observations montrent que la question de la spécialisation des tâches ne peut se poser qu'à une échelle régionale car les pratiques (dimension des exploitations, techniques employées, volumes produits) ne sont pas homogènes à l'échelle de l'Europe de l'Ouest. Les variations observées ne témoigneraient pas nécessairement d'une maîtrise technique ou d'une spécialisation plus importante mais certainement plus de pratiques adaptées au type de gisement et donc différentes d'un point de vue technique.

En péninsule Ibérique, les riches zones d'altération supergène sont largement exploitées et les minerais oxydés qui en sont extraits peuvent être fondus avec de simples creusets et/ou vases/fours car il n'est pas nécessaire d'atteindre des températures importantes. Fondre des chalcopirites demande d'utiliser d'autres réacteurs dans les Alpes et dans le Pays de Galles. Cette même contrainte présente des variantes : des fours ont été découverts dans des ateliers spécialisés dans les Alpes orientales alors qu'au Pays de Galles, la métallurgie serait pratiquée dans des fosses (ventilées à l'aide de soufflets) localisées de manière opportuniste aux abords des mines. Deux minerais potentiellement similaires seraient ainsi fondus à l'aide de réacteurs différents dans des aires de taille très différente.

Spécialisation du travail métallurgique par région

Spécialisation du travail métallurgique par région

Les relations entre les critères que nous avons pris en compte (dans le cas de la métallurgie, il s'agit de la dimension des ateliers, du type de minerai fondu et du type de réacteur employé pour fondre

les minerais) peuvent être étudiées en utilisant une Analyse des Correspondances Multiples (ACM). En effet, une ACM permet de traiter des données sous forme qualitatives (soit du texte) ce que peu de traitements statistiques multivariés permettent.

Les résultats de l'ACM sont présentés sous forme de graphiques où les catégories des variables sont représentées par des points dans un plan factoriel. Plus les points sont éloignés de l'origine (le centre du graphique) et plus ils contribuent à l'inertie des axes. Autrement dit, plus un élément étudié est localisé dans un coin du diagramme, plus il permet de distinguer des spécificités métallurgiques différentes. Les points situés dans un même quart du graphique tendent à être associés. Par exemple, les ateliers de grande et moyenne dimension apparaissent souvent ensemble avec la fonte de chalcopyrrite et la présence de fours en batterie (ils se projettent dans le quart en haut à gauche du graphique). À l'opposé, l'emploi de creusets et de vase-fours est associé à la fonte conjointe de carbonates de cuivre et de cuivres gris et est réalisé dans des ateliers domestiques (ces variables se projettent dans le quart en haut à droite du graphique).

Chaque atelier étudié est représenté par un losange dans le graphique. La position du losange indique à quelles variables (points) l'atelier est le plus associé. Par exemple, les ateliers de la péninsule Ibérique se projettent dans le quart en haut à droite du graphique et sont donc caractérisés l'emploi de creusets et de vase-fours dans des ateliers domestiques dans lesquels sont fondus des carbonates de cuivre souvent accompagnés de cuivres gris.

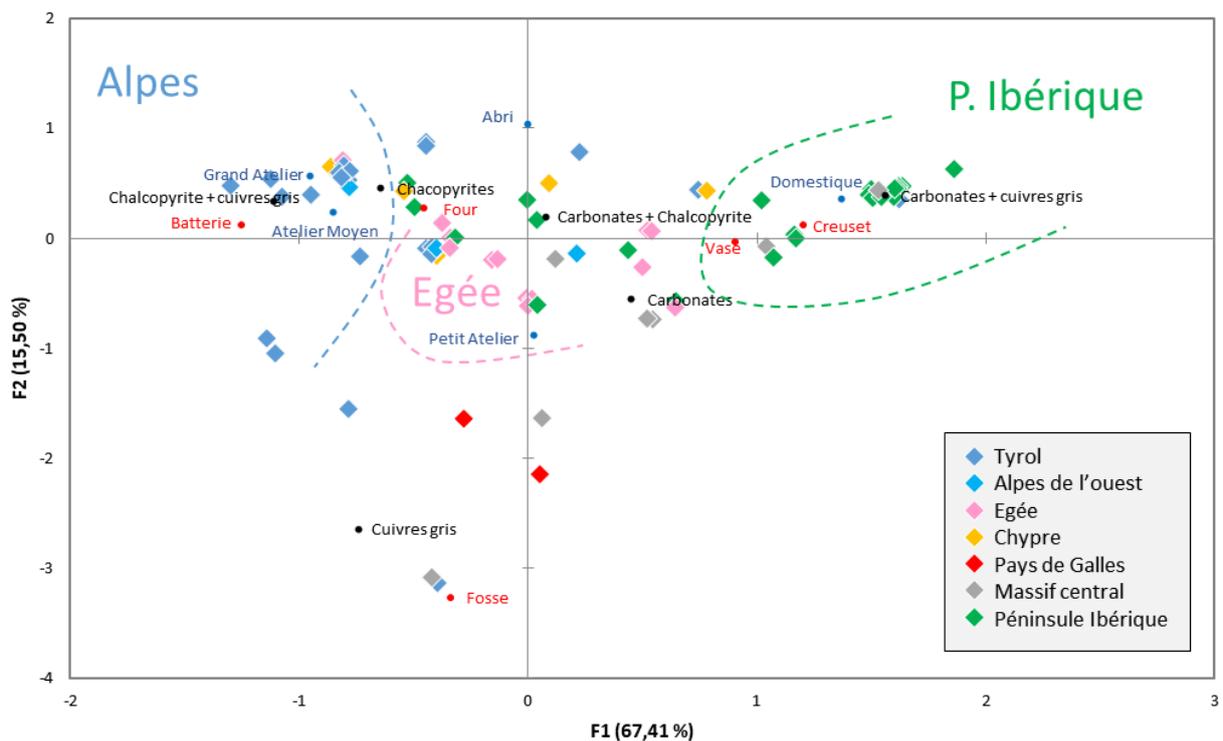


Figure 146 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) réalisée avec les différents critères de spécialisation précédemment définis pour la métallurgie. Plus un atelier (un losange) est proche d'un point (une variable), plus cette variable le caractérise. De la même manière, plus deux points sont proches, plus ils se corréleront. Par exemple, la proximité de « Chalcopyrrites » et « Four » indique que ces dernières sont très majoritairement fondues dans des fours.

Les résultats de l'ACM montrent des disparités régionales et donc, des pratiques différentes car les losanges correspondant aux ateliers des diverses régions se regroupent clairement dans des secteurs différents du graphique :

- Dans les Alpes, de très grands ateliers équipés de fours et d'aires de grillage permettent d'extraire le cuivre à partir de chalcopyrites et de cuivres gris ;
- En Égée, des fours sont employés pour fondre des chalcopyrites parfois accompagnées de carbonates de cuivre dans de petits ateliers ;
- Les ateliers de métallurgie extractive de péninsule Ibérique se caractérisent :
 - o Majoritairement par la réduction dans des creusets et vases-fours, de minerais carbonatés, en contexte domestique ;
 - o Plus rarement dans de petits ateliers où des fours sont employés pour fondre des chalcopyrites parfois accompagnées de carbonates de cuivre ;
- Les ateliers chypriotes se répartissent dans l'ensemble du graphique, ce qui pourrait souligner une hétérogénéité importante des pratiques métallurgiques sur l'île.

Il est alors possible de proposer une réponse aux hypothèses de Kuijpers, 2008 (p.19) selon lesquelles les compétences métallurgiques peuvent avoir été limitées (i) soit intentionnellement, (ii) soit en raison de la zone relativement restreinte dans laquelle le processus était réalisé. L'hypothèse la plus juste semble être la seconde : les différences de pratiques métallurgiques s'expliquent en grande partie par la diversité des minéraux exploités²⁰⁵. Les métallurgistes réalisent sans nul doute de nombreux tests afin d'adapter au mieux les processus métallurgiques.

Une spécialisation des pratiques métallurgiques au cours du temps dans les régions ?

Les conditions géologiques expliquent la diversité des minerais de cuivre présents dans une région et, par conséquent, les processus métallurgiques employés. L'évolution de la spécialisation des activités minières au fil du temps doit donc être étudiée région par région.

Cependant, peu de régions présentent un nombre important de sites d'ateliers bien documentés, et il faut que la période d'exploitation soit suffisamment longue pour observer d'éventuelles évolutions. Ce dernier point est crucial. Par exemple, les 17 ateliers recensés en Égée présentent des datations très resserrées entre 3000 et 2000 av. J.-C. Nous ne pouvons donc conduire une Analyse des Correspondances Multiples que pour trois régions où ont été identifiés de nombreux ateliers sur des périodes chronologiques plus que millénaires :

- Chypre (n= 10, de 2000 à 800 av. J.-C.) ;
- Dans l'ensemble de la péninsule Ibérique (n = 29, de 3000 à 800 av. J.-C.) ;
- Dans les Alpes occidentales et orientales (n = 44, de 3000 à 800 av. J.-C).

À Chypre, une spécialisation semble émerger, car les ateliers datés entre 2000 et 1600 av. J.-C. sont de faible dimension alors que la majorité des ateliers de la période 1600-800 av. J.-C. sont de grands ateliers centralisés (les losanges noirs se projettent dans le quart gauche dans la (Figure 147)). Mais l'existence d'un petit atelier peu spécialisé durant cette période souligne des variations internes à l'île²⁰⁶.

²⁰⁵ Mais aussi de leur gangue, ce que nous n'avons que peu abordé.

²⁰⁶ Une production domestique utilisant des creusets pour réduire les carbonates perdure dans un atelier de l'âge du bronze (quart droit du graphique).

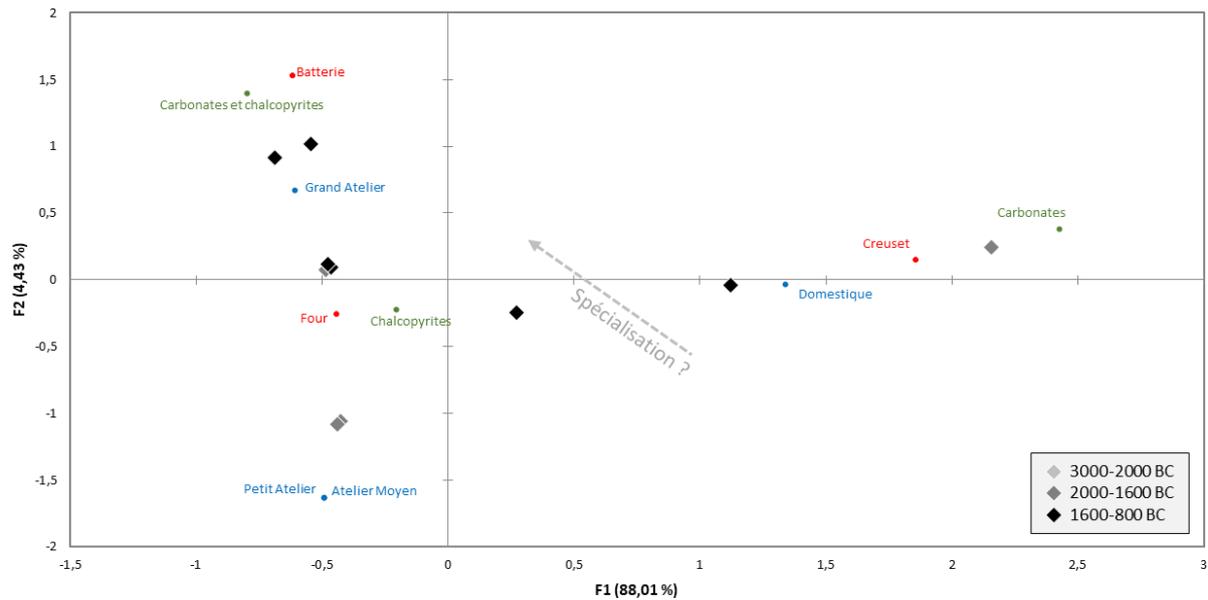


Figure 147 : Étude de la spécialisation des ateliers chypriotes de métallurgie extractive du cuivre. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et la fonte de sulfures de cuivre (chalcopyrithes)).

La spécialisation n'est en revanche pas évidente dans le cas de la péninsule Ibérique car peu d'ateliers datés d'après le II^e millénaire av. J.-C. présentent des données très précises. Comme souligné par Rovira (2011), la méthode d'obtention du cuivre ne semble pas avoir changé au cours du Bronze ancien et moyen²⁰⁷. Il semble néanmoins que la taille des ateliers pourrait augmenter (la moitié des ateliers les plus récents se projettent vers la droite dans l'ACM tracée (Figure 148).

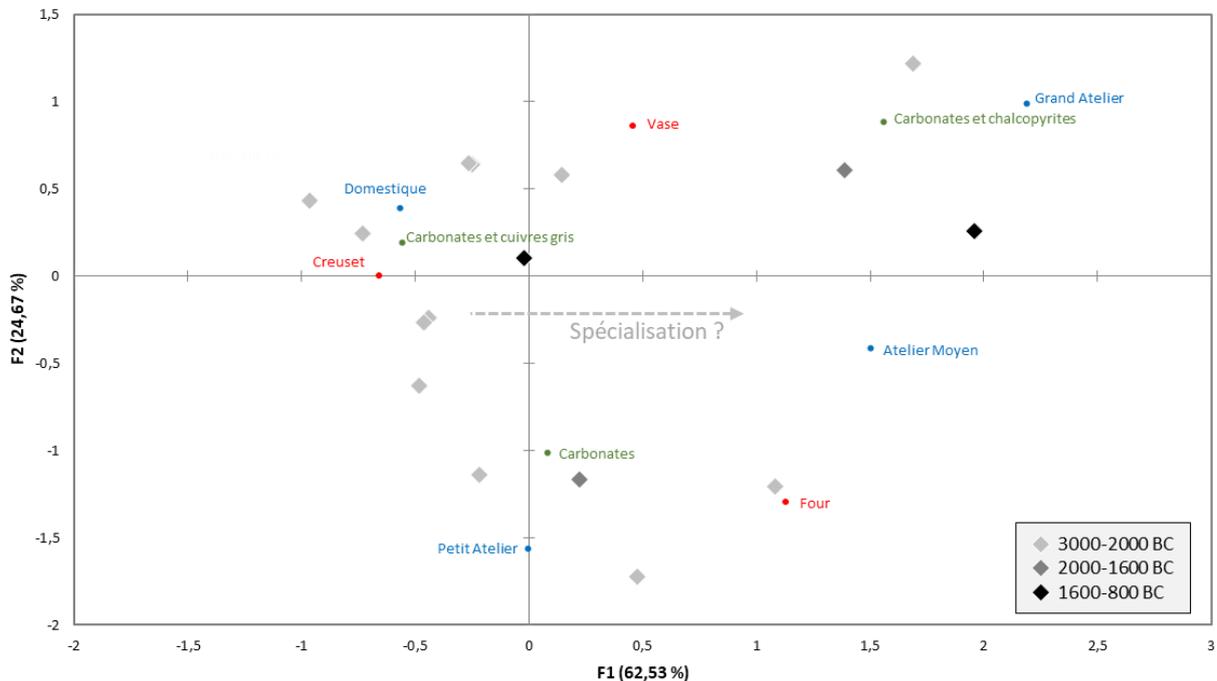


Figure 148 : Étude de la spécialisation des ateliers ibériques de métallurgie extractive du cuivre. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et la fonte de sulfures de cuivre).

²⁰⁷ La fusion était réalisée sous une atmosphère assez réductrice mais tout de même légèrement oxydante, une condition qui correspond assez bien au processus de fusion au creuset dans un feu ouvert, et ce processus semble perdurer (Rovira, 2011). Les productions nourriraient une demande domestique, les exploitations ne seraient pas annuelles (Gauss, 2013).

Enfin, peu d'ateliers chalcolithiques sont connus dans les Alpes centrales et de l'est. Si ces derniers étaient probablement moins spécialisés, il semblerait que la taille des ateliers augmente sensiblement dès le début du II^e millénaire av. J.-C. Cette augmentation de la taille des ateliers serait accompagnée de méthodes de production plus standardisées que dans d'autres régions (les losanges noirs sont moins dispersés que dans le cas de Chypre et de la péninsule Ibérique).

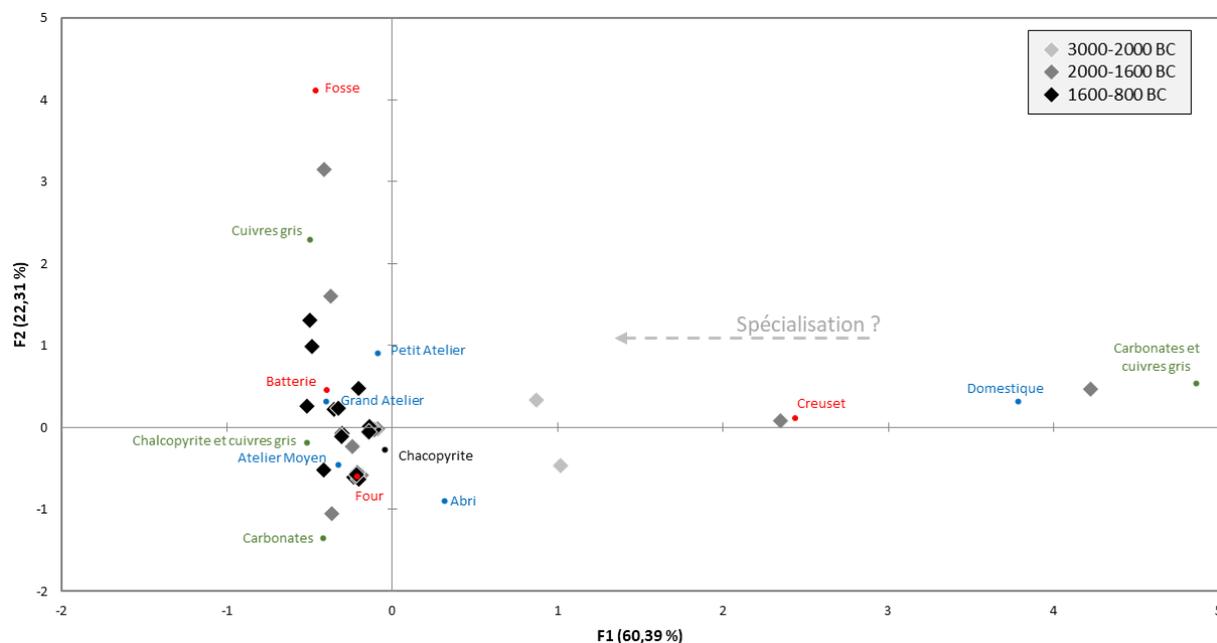


Figure 149 : Étude de la spécialisation des ateliers des Alpes centrales et de l'est. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et fonte de sulfures de cuivre).

En conclusion, concernant les ateliers, les différences de pratiques pyrométallurgiques régionales se corrént bien avec la géologie locale. À l'échelle de l'Europe de l'Ouest, on distingue une augmentation de la taille des ateliers mais il faut bien voir que cette dynamique est (i) propre à chaque région et (ii) qu'il existe des ateliers de dimensions différentes et aux pratiques variées au sein d'une même grande région. Les gisements localisés dans une même région sont globalement comparables mais présentent des différences qui demandent d'adapter les pratiques aux spécificités de chaque minéralisation²⁰⁸. Si la géologie explique en partie les pratiques métallurgiques, elle ne peut pas être le seul facteur expliquant les différences observées. D'autres facteurs environnementaux (disponibilité des ressources en bois, en matériaux réfractaires...) mais aussi des facteurs humains (traditions métallurgiques, disponibilité de la main-d'œuvre...) rentrent très probablement en jeu.

Spécialisation du travail minier par région

Spécialisation du travail minier par région

Trouver des critères pour définir la spécialisation du travail minier a été plus difficile que pour les ateliers car l'exploitation minière est quasi-exclusivement dépendante de critères géologiques. Nous

²⁰⁸ Cette variabilité est importante à l'échelle régionale comme locale. Par exemple, si le cuivre est rare dans les mines du Laurion, ce dernier peut être présent dans des gisements de type skarn riches en arsenic, dans des gisements de type porphyres peu concentrés en cuivre et très pauvres en arsenic mais aussi dans les zones d'enrichissement supergène qui les surplombent et qui sont en revanche très riches en malachite (Voudouris, 2016).

avons pu retenir quatre critères de distinction : le type de creusement, la vitesse de creusement, la quantité de cuivre produite et le minéral principalement extrait de la mine.

La réalisation d'une ACM prenant en compte ces quatre variables indique que (Figure 150) :

- Le type de creusement (souterrain, tranchée, ou encore puits) n'influence quasiment pas le modèle et ne permet pas de distinguer les régions entre elles : les points correspondants à ces variables se projettent au centre du graphique et ne contribuent pas à définir la structure du nuage de points ;
- La lecture de la partie gauche du graphique nous permet de constater qu'une progression (vitesse de creusement) lente se corrèle à des productions faibles à moyennes et à l'extraction de carbonates de cuivre (associés ou non à des chalcopyrites ou des cuivres gris) ;
- À l'inverse, les mines où les productions seraient les plus importantes seraient celles où la progression est la plus rapide (quadrant en haut à droite du graphique).

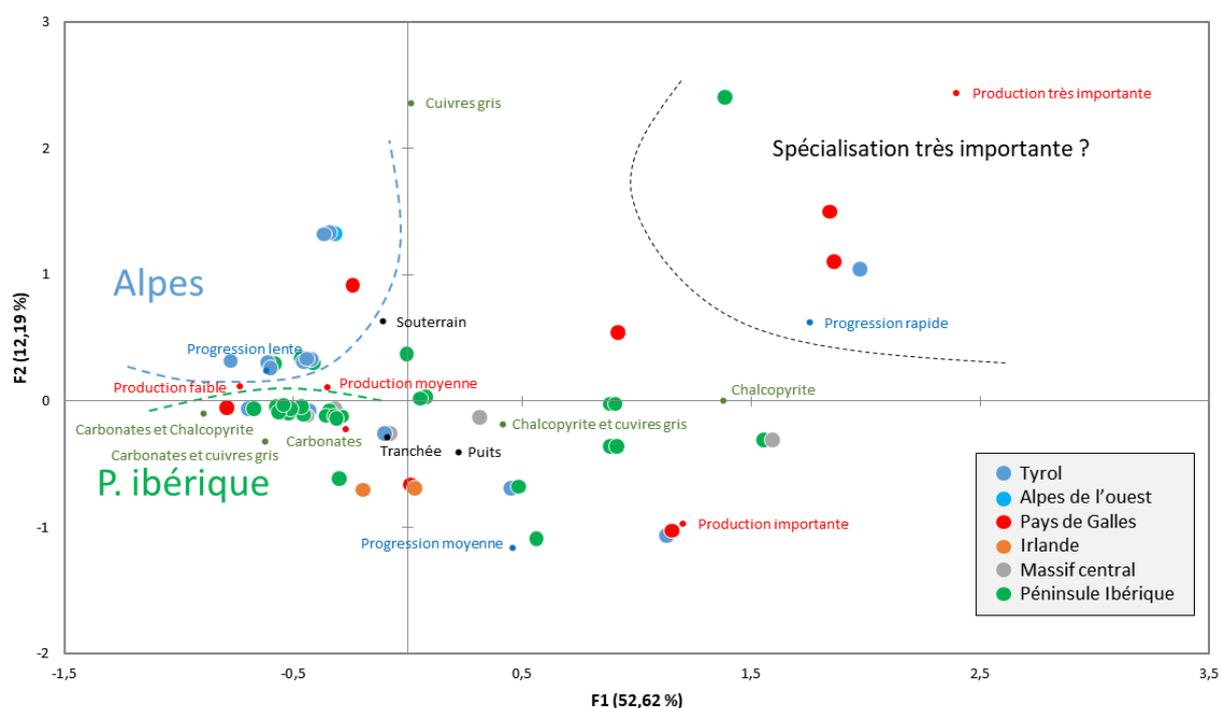


Figure 150 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) réalisée avec les différents critères de spécialisation précédemment définis pour l'extraction minière. Plus une mine (un rond) est proche d'un point (une variable), plus cette variable la caractérise. De la même manière, plus deux points sont proches, plus ils se corrèlent. La distance entre les ronds empilés a été volontairement exagérée pour faciliter la lecture.

Les mines des différentes régions (ronds de couleur) ne se séparent pas nettement dans des nuages de points distincts. Les Alpes se séparent difficilement de la péninsule Ibérique et cette distinction est principalement basée sur la présence de carbonates de cuivre dans les mines ibériques. Les mines du Massif central ne se distinguent pas des mines de la péninsule Ibérique. Les mines du Pays de Galles sont éparpillées dans le diagramme, ce qui est cohérent avec les observations réalisées concernant leur potentiel de production supposé très variable.

Quelques rares mines s'isolent néanmoins dans le quart en haut à droite du digramme du fait d'une productivité et de vitesses de progression importantes. Ces dernières ne sont pas issues d'une même région et ne datent pas de la même période²⁰⁹. Nous pouvons conclure qu'il y aurait eu quelques

²⁰⁹ Les deux mines du Pays de Galles sont celles de Great Orme et d'Erglodd et la mine de Great Orme débute son activité environ 250 ans après celle d'Erglodd.

mines à forte production dans les grandes régions exploitées en Europe de l'Ouest (le Pays de Galles, les Alpes de l'est et la péninsule Ibérique) et qu'il existait, dans une même région, des mines très spécialisées et des mines plus artisanales.

En conclusion de cette étude, si une spécialisation croissante n'est pas aisée à mettre en avant, les ACM ont permis de souligner des différences régionales (et infrarégionales) de pratiques. Ces différences se marquent assez bien pour les ateliers (les ateliers des différentes régions étudiées se différencient bien à l'aide d'une ACM) mais les régions s'individualisent mal en ce qui concerne les mines. Peut-être est-ce lié aux critères techniques pris en compte : nous avons précédemment supposé que les mineurs disposent des connaissances nécessaires pour exploiter des gisements très différents dès le Chalcolithique (cf V/1.d). Cette maîtrise précoce de l'ensemble des techniques minières ne permet sûrement pas de mettre en avant des progrès techniques au cours de l'âge du Bronze (car il n'y en aurait que peu²¹⁰).

V/5.d Un ou plusieurs systèmes miniers ?

Les modèles actuels concernant l'exploitation minière protohistorique et ses productions (Hanks et Doonan, 2009 ; Stöllner, 2012 ; Vandkilde, 2019 ; Caraglio, 2020 ; Norgaard et Reiter, 2020) cherchent à définir des niveaux d'organisation souvent subdivisés en trois grandes catégories : (1) activités saisonnières dans des ateliers familiaux travaillant les métaux de manière opportuniste ; (2) groupes spécialisés produisant peu mais à l'année ; (3) production centralisée impliquant de grands volumes de production et une organisation sociale du travail. Cette étude montre que, contrairement aux modèles proposés (et notamment à celui de Stöllner, 2012), il n'y aurait que très peu d'évolution des techniques de production à travers le temps. Au contraire, des régions au potentiel de production important sont contemporaines de régions au potentiel plus faible et des exploitations de petite taille côtoient des exploitations très spécialisées dans ces mêmes régions.

Comme déjà souligné lors de l'estimation de la capacité de production de cuivre (cf V/3.c), certaines régions possèdent un degré de spécialisation tel qu'il serait envisageable d'y considérer, *a minima*, l'existence de groupes très organisés dédiés uniquement à la réalisation d'une étape de la chaîne opératoire du cuivre. À l'inverse, certaines régions sembleraient conserver un modèle de production à travers le temps et ne pas pouvoir assurer de production importante dans la très grande majorité des sites connus. Il n'est donc pas possible de considérer la production de cuivre de l'âge du Bronze en Europe de l'Ouest comme évoluant dans une direction commune.

Pour Obón Zúñiga (2020), la diversité des processus métallurgiques employés dans des territoires distants refléterait la valeur que les sociétés accordaient au métal. Il suggère que les changements sociétaux conditionneraient les changements technologiques en matière de métallurgie et non l'inverse²¹¹. Nous proposons cependant que les facteurs sociétaux ne soient pas les seuls à prendre en compte et seraient même secondaire. Le facteur géologique joue sans nul doute un rôle majeur dans l'exploitation des ressources. La présence ou non de fours ne découlerait pas uniquement d'une volonté de produire une quantité importante de cuivre mais serait également dépendante du minerai présent localement. Il en va de même pour la morphologie des chantiers miniers qui s'adaptent aux gisements.

²¹⁰ En conclusion, si spécialisation des tâches il y a eu, il se pourrait que cette dernière ait eu lieu au début du Néolithique pour ce qui concerne les mines.

²¹¹ Selon Obón Zúñiga (2020), les progrès métallurgiques seraient lents dans certaines régions car ils ne seraient pas liés à un changement socio-économique significatif.

Enfin, loin d'être anodine, la disponibilité des autres ressources que minières mais nécessaires à l'exploitation joue probablement un rôle majeur dans l'organisation des productions. La présence de très grands ateliers centralisés a ainsi pu être reliée à la disponibilité du bois dans le Sinaï (Tallet *et al.*, 2011) et ne découle donc pas uniquement d'une volonté politique ou d'un contexte économique.

Ainsi, le modèle classique selon lequel les sociétés décident d'exploiter du métal pour répondre à une demande accrue est erroné car il n'inclut pas de facteurs géologiques. Tout au plus prend-il en compte des facteurs environnementaux. Il suppose que toutes les régions minières présentent une spécialisation croissante or, cette dernière varie peu. Enfin, le modèle classique suppose que les exploitations présentaient une certaine homogénéité (en termes de tonnages extraits et de processus employés) alors que des exploitations très différentes pouvaient coexister à quelques kilomètres de distance. Peut-être étaient-elles exploitées par des groupes aux traditions différentes, il est cependant certain qu'il coexiste à l'âge du Bronze des exploitations que l'on attribue à un modèle chalcolithique et d'autres à un modèle prétendument plus évolué (Figure 151).

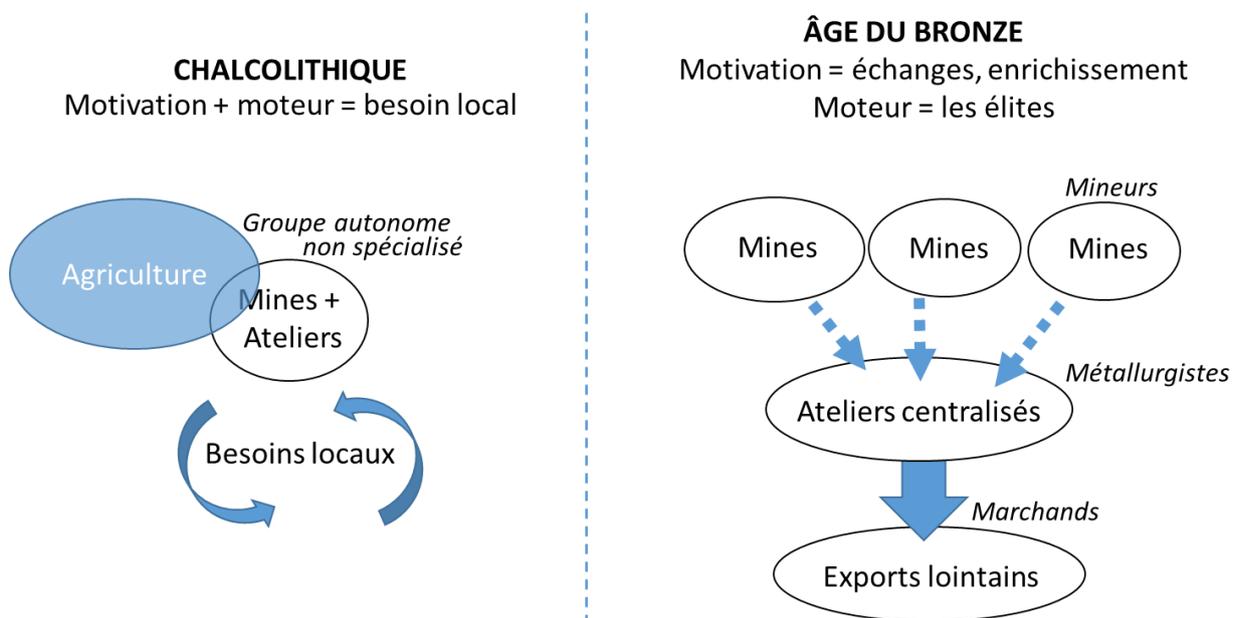


Figure 151 : Modèle synthétique des systèmes miniers du Chalcolithique et de l'âge du Bronze en Europe de l'Ouest tels qu'ils sont généralement décrits dans la littérature.

Différents modèles de systèmes miniers pourraient être proposés, mettant en avant combien les moteurs de la production et ses contraintes varient non seulement au fil du temps mais surtout en fonction des différents sites de production. La présence des matériaux nécessaires à l'exécution de l'ensemble de la chaîne opératoire minière sur un même site permet de réaliser toutes les étapes de production, tandis que l'absence de l'un de ces matériaux entraîne une organisation différente. Par exemple, la présence d'eau est nécessaire pour laver le minerai et cette activité est donc souvent réalisée en fond de vallée alors que l'exploitation minière a plutôt lieu dans les versants. De même, la centralisation de la fonte des minerais en un seul lieu est courante dès lors que les matériaux nécessaires à la métallurgie ne sont pas disponibles à proximité de la zone de traitement minéralogique où le minerai est lavé. Ainsi, si les

moteurs de la production sont essentiellement socio-économiques²¹², les contraintes de développement sont principalement, et dans leur immense majorité, d'ordre géologique et environnemental.

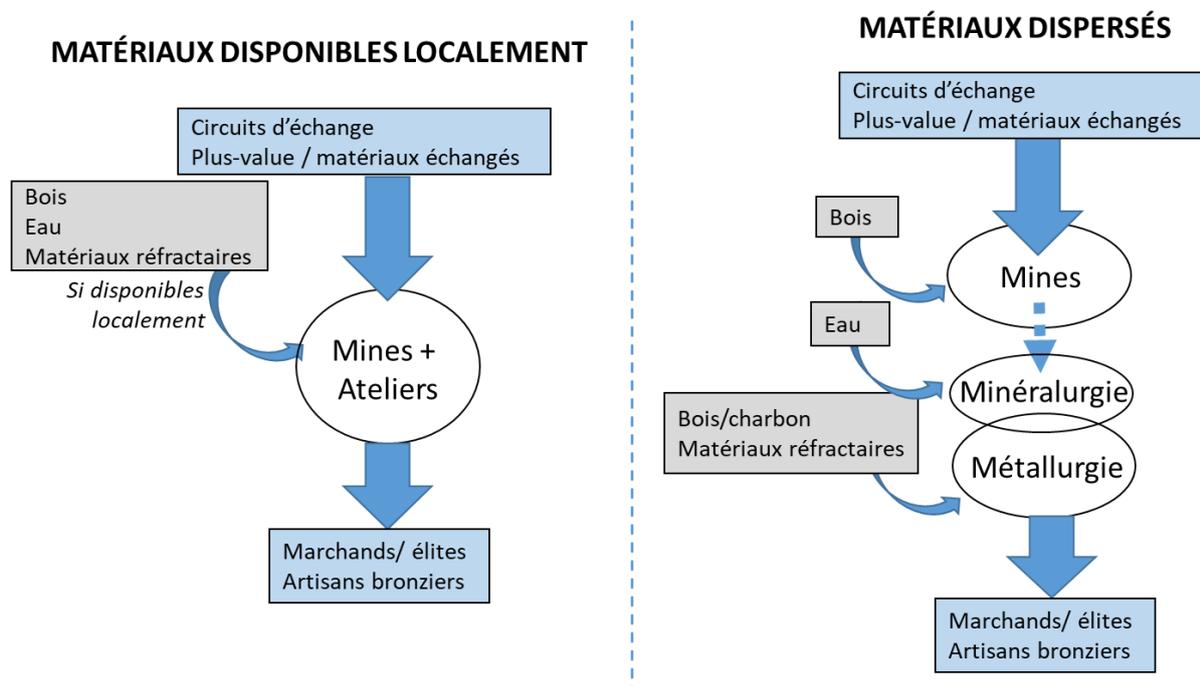


Figure 152 : Implication de la présence de certains matériaux sur l'organisation spatiale des étapes de la chaîne opératoire minière

Le type de gisement exploité est également un élément primordial influant non pas sur l'organisation de la chaîne opératoire mais sur les processus employés (par exemple abattage par le feu, grillage des sulfures). La dureté de la roche encaissante, la forme du filon, la richesse du gisement, mais aussi les minerais extraits jouent un grand rôle dans l'organisation de la chaîne opératoire minière.

Dans la *Pyrite Belt* (sud de la péninsule Ibérique), les encaissants sont tendres et les gisements très riches (il s'agit majoritairement de SMV surplombés de riches zones d'enrichissement supergène). Pour autant, on y trouve majoritairement de nombreuses mines à ciel ouvert de faible volume d'extraction qui ne sont peut-être pas actives toute l'année. Un modèle incluant une multitude de petites exploitations demandant peu de force de travail et peu de connaissances techniques s'apparenterait alors faussement à un modèle archaïque, de type néolithique.

Des gisements comparables sont exploités à Chypre où l'organisation du travail est très différente. De grands ateliers spécialisés et centralisés exploitent massivement les gisements de cuivre de l'île. Les paysages et les ressources disponibles pour la métallurgie sont proches dans ces deux régions méditerranéennes (gisements volcaniques (VMS) surmontés d'épaisses zones d'altération et ressource en bois de même nature). Cependant les mines atteignent les zones de sulfures primaires dans le cas de Chypre et les minerais sont fondus dans de grands ateliers centralisés.

Les différences de modes d'exploitation sont alors certainement à chercher dans le moteur des échanges : les grandes civilisations protoétatiques de l'est de la Méditerranée ne présentaient pas les mêmes niveaux de complexité socio-économique que les sociétés situées plus à l'ouest.

²¹² Le rôle du commerce est sans nul doute très important. Ce point sera questionné plus en détail dans la seconde partie où nous précisons que certaines zones minières semblent présenter des distances d'export plus importantes que d'autres et, plus encore, que certaines possèdent des situations géographiques très favorables.

Dans les îles Britanniques, les gisements de cuivre sont assez pauvres (il s'agit en général de petites veinelettes dans des gisements sédimentaires) mais les volumes d'extraction par an seraient plus importants qu'en péninsule Ibérique. Les gisements exploités dans le Tyrol sont globalement plus riches que ceux des îles Britanniques mais plus pauvres que dans la péninsule Ibérique. L'exploitation souterraine de ces gisements de haute altitude dans des roches souvent très résistantes demande une maîtrise technique importante. Pour autant, c'est, avec Chypre, la zone où la production serait la plus intensive et la plus spécialisée.

Ainsi, les conclusions de cette première partie montrent que la répartition des exploitations dans de grandes régions de production ne s'explique pas par des limitations d'ordre technique. Si l'organisation des productions diffère selon les grandes régions productrices, c'est en partie afin de s'adapter au mieux à l'environnement géologique.

Cependant, il n'est pas possible d'expliquer l'organisation des espaces miniers sans chercher à percevoir le moteur des productions : le devenir du métal. Certains axes d'échange pourraient être plus pérennes et permettre une meilleure circulation des productions. Les routes commerciales pourraient par exemple être plus développées en Méditerranée de l'est, favorisant la production chypriote alors que les exportations de cuivre au départ des îles Britanniques pourraient souffrir d'un certain isolement géographique. Par ailleurs, le fait que certaines régions présentent des productions autres que le cuivre pourrait indiquer que ces régions trouvent un intérêt économique plus important dans la production d'autres ressources métalliques : en péninsule Ibérique de l'argent²¹³ et du plomb sont produits ; du plomb est produit dans les îles Britanniques alors que dans l'est des Alpes et à Chypre le cuivre semble être le seul métal exploité.

²¹³ Ces deux ressources sont parfois produites dans un même atelier tel que décrit à Baños de la Encina - Peñalosa où l'on trouve des galènes et des minerais de cuivre dans l'atelier (Hunt Ortiz *et al.*, 2011).

Conclusion de la première partie

Les données disponibles concernant les zones d'exploitation minière sont souvent limitées du fait même de l'élément étudié : les mines. Ces structures sont complexes à détecter puis à fouiller mais un recensement des ateliers de métallurgie extractive permet d'avoir une vision plus complète des zones en exploitation. Les datations des sites d'extractions parfois peu précises mais fournissent des informations précieuses pour étudier les changements concernant les types de production et les zones de production.

Les productions aurifères sont encore très mal comprises tant les découvertes de sites d'extraction sont rares. Cela est également le cas, dans une moindre mesure, pour les productions d'argent et d'étain. Cela s'explique en partie par la valeur économique importante de ces ressources entraînant d'importantes reprises minières qui effacent les traces des activités passées. Dans le cas de l'or et de l'étain, leur possible exploitation alluvionnaire rend également complexe l'identification de ces structures dans les paysages²¹⁴. Les exploitations de cuivre sont en revanche nombreuses à avoir été découvertes et, si elles souffrent elles aussi de reprises minières, le nombre important d'exploitations documentées permet une étude plus poussée des productions.

La quantité d'exploitations recensées permet d'émettre des quelques hypothèses. La première d'entre elles concerne l'organisation de la production du métal, soit la localisation des grandes zones de production à travers le temps. Les grandes régions cuprifères exploitées au Néolithique ne sont plus exploitées à l'âge du Bronze pour l'immense majorité d'entre elles. Les grandes zones minières très spécialisées (par exemple dans les Alpes et très probablement Chypre), ne présenteraient qu'une exploitation très restreinte au Néolithique alors que certaines grandes régions productrices néolithiques (par exemple le sud du Massif central) ne semblent plus exploitées à la fin de l'âge du Bronze. Plus encore, la répartition spatiale des mines diffère énormément entre le Chalcolithique et la fin de l'âge du Bronze : les productions de cuivre se concentrent dans de grandes régions productives à la différence de l'étain qui semble avoir été exploité dans l'ensemble des régions stannifères.

De grandes régions telles que le Massif armoricain ou encore le Massif central ne produiraient plus de cuivre au Bronze moyen. L'absence d'exploitation du cuivre tout comme l'abandon de mines ne sont pas liés à des difficultés techniques car les techniques d'extraction permettant d'exploiter des gisements très différents sont connues dès le Chalcolithique. L'hypothèse la plus probable permettant d'expliquer l'arrêt de l'exploitation du cuivre serait alors que les exploitants miniers pourraient avoir commencé à produire d'autres ressources (notamment de l'or et de l'étain). Ceci leur aurait apporté plus de bénéfices dans un monde interconnecté où la concurrence comme les alliances devaient être fortes. La qualité (présence ou non d'impuretés) du cuivre produit ne semble pas être un facteur justifiant une absence d'exploitation minière. Si des changements importants sont à signaler concernant les types de minéraux de cuivre fondus, ces changements n'étaient pas strictement liés à une évolution des processus métallurgiques mais dépendaient également du type de métal souhaitant être obtenu (avec ou sans arsenic) et des minéraux fondus (carbonates ou sulfures de cuivre). Les métallurgistes sont donc eux

²¹⁴ Concernant l'étain, les granites dans lesquels les minerais d'étain se forment sont difficiles à exploiter en roche, mais les surfaces altérées de ces derniers constituent des gisements exploitables par les mineurs protohistoriques. Les exploitations alluvionnaires sont souvent détruites par les reprises minières et sont complexes à identifier dans les paysages, ce qui explique leur faible nombre et nécessite de prendre en compte des indices indirects de leur présence. Elles seraient cependant significativement plus nombreuses que les mines en roche, mais cette hypothèse ne s'appuie que sur un nombre restreint d'exploitations fouillées et repose principalement sur des exploitations supposées.

aussi capables d'adapter leurs pratiques aux minéralisations locales afin de produire un cuivre adapté à la demande.

Les modèles selon lesquels, à l'âge du Bronze, la quantité de cuivre produite serait beaucoup plus conséquente car impliquant des processus de plus en plus complexes et de la main-d'œuvre nombreuse et très qualifiée, ne se confirment que pour quelques régions minières en Europe de l'Ouest (Chypre, le Pays de Galles, les Alpes centrales et de l'est). Il semble probable que certaines régions souvent citées comme produisant du cuivre en grande quantité à l'âge du Bronze ne pouvaient pas fournir du métal en grande quantité. Ainsi, si la péninsule Ibérique est régulièrement considérée comme un centre de production important dans le cadre d'études de provenance du cuivre, il semble que les réelles capacités de production cuprifère de cette région à l'échelle de l'Europe restent à évaluer. Bien que cette dernière occupe une position géographique offrant des possibilités d'exports terrestres et maritimes importants, les mines et ateliers d'extraction y sont moins « industrialisés » que dans le Tyrol autrichien qui n'a été pris en compte que relativement récemment dans le cadre de grandes études de provenances. Les gisements ibériques sont pourtant plus riches en cuivre que les gisements alpins car ces derniers sont recouverts par d'épaisses zones d'enrichissement supergène.

La géologie explique en grande partie la présence de traditions régionales différentes²¹⁵ mais elle ne permet pas d'expliquer à elle seule la diversité des capacités de production. Des mines et des ateliers de capacité de production différente et employant des technologies différentes coexistent à seulement quelques dizaines de kilomètres de distance. Les populations travaillant dans ces sites n'étaient probablement pas les mêmes. Le modèle traditionnellement admis d'une spécialisation des tâches croissante impliquant une homogénéisation des pratiques (potentiellement dans le but de produire du surplus) ne semble pas validé puisqu'une grande diversité de techniques coexiste jusqu'à la fin de l'âge du Bronze.

Enfin, notre étude révèle une organisation de la production structurée par grandes zones géographiques, espacées d'environ 1000 à 1500 km. Cette organisation ne peut pas s'expliquer par des limitations d'ordre technique. Elle ouvre la question des moteurs de l'exploitation qui ne peuvent qu'être d'ordre socio-économiques.

Dans la seconde partie de ce manuscrit, nous proposons donc de tenter de tracer le devenir des productions des zones minières en activité à travers le temps afin de vérifier la fiabilité des hypothèses émises mais aussi d'apporter des éléments de réflexion concernant la répartition des zones minières. Nous comparerons pour cela les signatures isotopiques du plomb de gisements à celle d'artefacts à une échelle européenne.

Le but de la seconde partie de ce manuscrit sera donc multiple. Il s'agira tout d'abord de vérifier si les grandes zones de production identifiées jusqu'à présent constituaient réellement les principales zones de production. Il n'est effectivement pas à exclure que les isotopes du plomb permettent d'identifier d'autres zones (où les mines ne sont que supposées ou inconnues) productrices de métal. Nous chercherons également à tracer jusqu'où les zones minières ont exporté et si les grands axes d'échange du cuivre et du plomb sont sensiblement les mêmes. Cette démarche nous permettra de

²¹⁵ Les gisements sont affectés par des successions de phénomènes géologiques. Des phénomènes très localisés et de faible ampleur peuvent avoir des conséquences importantes sur une zone minière (basculement des structures, modifications des teneurs, enrichissement/appauvrissement en certains éléments...) et les nombreux gisements d'une même région ne sont clairement pas identiques. Ils sont cependant supposés plus semblables entre eux qu'ils ne le sont avec des gisements de régions distantes où les phénomènes géologiques affectant les gisements sont supposés varier fortement. Dans le cas des mines de cuivre protohistoriques, l'un de ces phénomènes est la présence ou non d'épaisses zones d'enrichissement supergène.

déterminer si les régions où la production calculée est considérable sont également celles qui exportent sur de longues distances, et de discerner les régions qui pratiquent des échanges mutuels. En effet, dans l'hypothèse où les mineurs et les métallurgistes sont capables d'exploiter presque tous les types de gisements, des variations dans les itinéraires des grands axes de commerce ne pourraient être attribuées à un manque de compétences techniques. Ces variations dans les itinéraires et les flux pourraient plutôt mettre en lumière des différences de compétitivité, incitant les producteurs à se spécialiser dans l'exploitation des ressources à partir desquelles ils peuvent se procurer des métaux, ou bien résulter de relations diplomatiques étroites unissant certaines régions.

Deuxième partie

Exportation des productions de cuivre et de plomb

I/ Introduction : des échanges interconnectant les sociétés dès le Néolithique

I/1 Des échanges économiques et culturels dès le Néolithique

Des échanges entre populations européennes distantes existent dès le IV^e millénaire av. J.-C. comme le témoigne la circulation d'artefacts en matériaux lithiques :

- En Europe, les haches fabriquées à partir de jade extrait dans les Alpes entre la fin du V^e et la fin du IV^e millénaire av. J.-C. voyagent sur des distances pouvant atteindre environ 2 000 km à vol d'oiseau (Pétrequin *et al.*, 2012 ; Klassen *et al.*, 2017 p.945 ; Kadrow, 2022) ;
- De grandes haches en silex produites dans les grands bassins sédimentaires sont échangées sur environ 150 à 200 km de distance dans le nord du bassin parisien dès le IV^e millénaire av. J.-C. (Collet et Bostyn, 2011 ; Denis, 2019) ;
- L'obsidienne était exportée dès le VI^e millénaire avant J.-C., sur des distances allant jusqu'à environ 150 km en Méditerranée (Ibáñez *et al.*, 2016 ; Tykot, 2017 ; Orange *et al.*, 2018), dans les Balkans (Maric, 2015) aussi encore au Proche-Orient (Khalidi *et al.*, 2012).

Ce mécanisme d'interconnexion et de changement social est très certainement rendu possible par le fait que les sociétés néolithiques productrices de denrées alimentaires connaissent un accroissement démographique rapide (de Becdelièvre *et al.*, 2022 ; Frahm et Carolus, 2022). La sédentarisation de ces sociétés agricoles et le développement de villages et de villes a encouragé la spécialisation économique et l'apparition de centres de production et d'échange. Des objets artisanaux, des denrées alimentaires, et d'autres biens produits en surplus pouvaient alors être échangés avec d'autres groupes.

Les productions exportées sont diverses et des artisans spécialisés capables de produire des objets complexes émergent dans ces sociétés. Ils ne se limitent pas à la production de haches en jade ou aux artefacts en silex : certains ateliers produisent des céramiques en série (Vuković, 2011 ; Caro *et al.*, 2018 ; Hinz et Heitz, 2022), d'autres des perles en variscite (Alarashi et Borrell, 2020) et d'autres encore du sel (Weller, 2015). La spécialisation des productions concernerait également les matières non minérales telles que le goudron d'écorce de bouleau en Provence durant la première partie du IV^e millénaire av. J.-C. (Rageot *et al.*, 2021). Bien que les productions ne soient pas toujours parfaitement identiques (Salanova, 2012), l'existence de producteurs hautement spécialisés dans certaines productions et l'échange de ces productions sur des distances conséquentes permettent d'affirmer que, dès la fin du Néolithique, des productions ont été élaborées pour être échangées entre communautés distantes.

Le cuivre est échangé dès le V^e millénaire en Europe de l'Est (Klassen *et al.*, 2017), mais selon Bostyn et Vaquer (2018), ce n'est qu'à partir d'environ 2500-2300 av. J.-C. qu'ont été mis en place des réseaux d'échange de métaux à grande distance. Ils illustrent cette hypothèse par la répartition spatiale des poignards en cuivre de type Ciempozuelos et des pointes de flèches de type Palmela dont l'exportation depuis une source supposée ibérique (représentée par une étoile dans la Figure 153) se calquerait sur de possibles grandes voies de communication maritimes, fluviales et/ou terrestres.

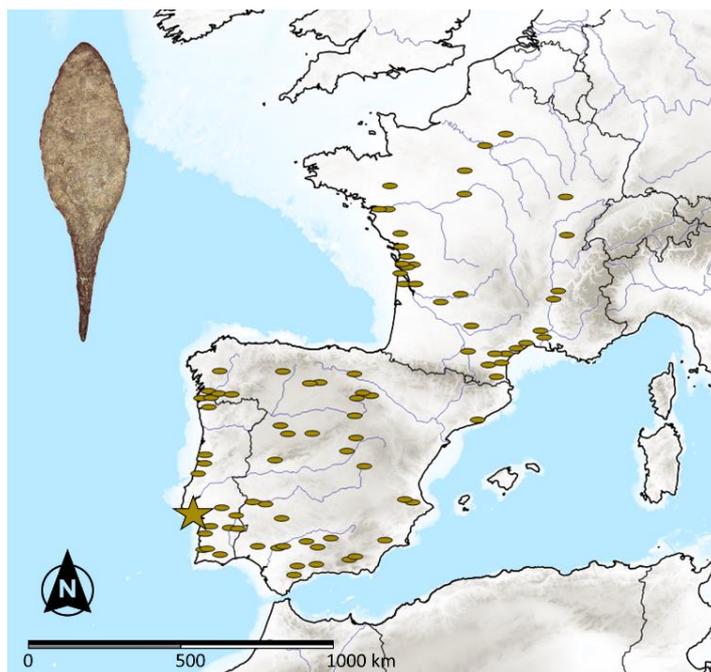


Figure 153 : Répartition des pointes de flèche de type Palmela. D'après Laporte et Gomez de Soto, 2008.

La circulation du cuivre (allié ou non) sur de grandes distances marque le début d'une « économie du métal »²¹⁶. Le cuivre n'est cependant pas le seul métal en circulation. Bien que plus rares, l'or et plus sporadiquement l'argent sont également échangés dans les îles Britanniques (Standish *et al.*, 2015), les Carpates (Makkay, 1995), la péninsule Ibérique (Nocete *et al.*, 2014 ; Lull *et al.*, 2014 et 2021), en Europe centrale (Primas, 1995) ou encore dans le monde égéen (Wagner *et al.*, 1980 ; Maran, 2021).

Ces échanges à l'échelle de l'ensemble de l'Europe de l'Ouest sont accompagnés d'échanges culturels et une nouvelle hiérarchisation sociale visible notamment dans les pratiques funéraires (Manning, 1993 ; Ripoche, 2017). Des mouvements de population ont lieu à l'échelle de l'ensemble de l'Europe comme le montrent les résultats de récentes études génétiques (Haak *et al.*, 2015 ; Cassidy *et al.*, 2016 ; Olalde *et al.*, 2018). Si des groupes culturels existaient bien avant 2500 av. J.-C.²¹⁷, la fin du Néolithique se caractérise par l'émergence de grands groupes de populations. Ces regroupements ont été opérés sur la base que des populations partagent des caractéristiques culturelles (notamment marquées par des typologies céramiques et/ou des pratiques funéraires communes) sur de vastes espaces géographiques. Plusieurs grands groupes (et de très nombreux groupes de taille plus restreinte) ont été définis en Europe entre 2500 et 2000 av. J.-C. En Europe de l'Ouest, la découverte de pots/gobelets en forme de cloches, décorés avec des motifs géométriques élaborés a conduit à la mise en évidence d'une culture dite campaniforme. Le Campaniforme n'est pour autant pas un phénomène homogène : des variations régionales importantes existent et il n'a pas été identifié dans l'ensemble de l'Europe (Besse, 2004 ; Lemerrier, 2006 ; Caraglio, 2020, voir Figure 154).

²¹⁶ Les métaux deviennent des ressources centrales pour les activités sociales, culturelles et économiques. L'économie du métal est marquée par l'extraction et la métallurgie des minerais, la fabrication d'objets en métal, ainsi que par le commerce à longue distance de ces produits, jouant un rôle crucial dans les interactions entre les différentes sociétés.

²¹⁷ Citons par exemple la culture de Varna (~4600-4200 av. J.-C.) exploitant de manière très précoce le cuivre et l'or des Balkans.

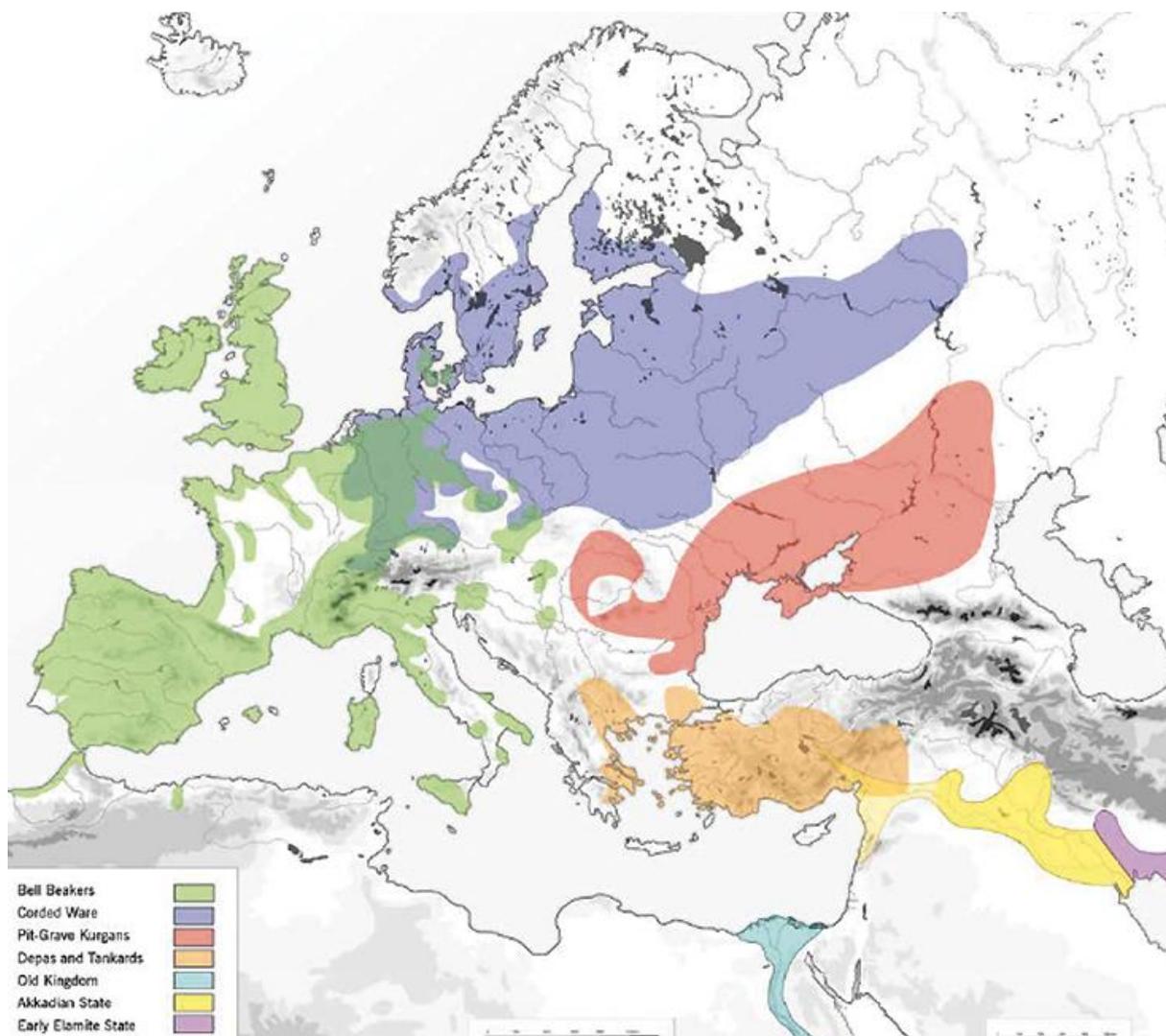


Figure 154 : Types d'assemblages de vases à boire datés entre 2400 et 2200 av. J.-C. Source : Caraglio (2020).

En Europe occidentale, la fin du Campaniforme inaugure le passage à l'âge du Bronze en Europe de l'Ouest (Lemerrier, 2018) et laisse place vers 1600 av. J.-C. à de grands complexes culturels dont les centres de gravité resteront inchangés jusqu'au milieu du 3e siècle apr. J.-C. (Brun, 2007). De nouvelles pratiques funéraires mais aussi de nouvelles productions céramiques voient le jour. La propriété supposée collective des ressources agropastorales évoquée dans les modèles néolithiques tranche avec une société articulée par des flux de biens de prestige, reflétant une nouvelle hiérarchisation sociale débutée à la fin du Néolithique/Chalcolithique et se poursuivant à l'âge du Bronze. La transition entre le Chalcolithique et le début de l'âge du Bronze n'est donc marquée :

- Ni par un changement marqué d'organisation sociale ;
- Ni par l'apparition de cultures communes ;
- Ni par la présence d'échanges à grandes distances.

Assurément, tous ces éléments sont hérités de la toute fin du Néolithique. La transition entre le Néolithique et l'âge du Bronze est ainsi progressive et non pas brutale²¹⁸. Le principal changement est

²¹⁸ Au point que certains chercheurs proposent de faire débuter l'âge du Bronze au Campaniforme (Marcigny *et al.*, 2022)

l'apparition du bronze à l'étain qui remplace très progressivement (Pernicka *et al.*, 2003) les alliages de cuivre-arsenic/(antimoine) et ceci est peut-être indépendant des changements de sociétés.

I/2 L'âge du Bronze en continuité avec le Chalcolithique

Comme nous venons de l'énoncer, le terme d'« âge du Bronze » se caractérise par l'apparition de l'alliage bronze mais aucune rupture franche (en termes de modes de vie, pratiques, économie, croyances...) ne se marque entre la fin du Néolithique et l'âge du Bronze (voir notamment Lehoërff, 2011).

I/2.a Des échanges interrégionaux contrôlés par des élites

L'âge du Bronze se distingue du Néolithique/Chalcolithique par une circulation des biens sur de très longues distances et par une forte interconnexion des sociétés à l'échelle européenne et une liaison de l'Europe avec le Proche-Orient. Un exemple intéressant permettant de l'illustrer concerne la femme dite d'Ølby (1400-1300 av. J.-C.) dont la sépulture découverte au Danemark contenait les restes d'une peau d'animal, des textiles en laine (Broholm et Hald, 1935), des perles d'ambre de la Baltique, des perles bleues en verre d'Égypte, ainsi qu'une quantité importante d'artefacts en bronze qui auraient été élaborés dans des ateliers différents (Vandkilde et Northover, 1996 ; Randsborg, 2006 ; Reiter et Frei, 2021). Le mobilier funéraire de cette femme issue de l'élite témoigne de la diversité de biens de prestiges échangés sur de très grandes distances.

Si les premières chefferies²¹⁹ apparaissaient au V^e millénaire (Brun, 1999) et que des tombes élitaires sont déjà connues au Chalcolithique (Jeunesse, 2016), la présence d'une élite qualifiée d'aristocratique²²⁰ par Johnson et Earle (1987), est l'un des éléments les plus caractéristiques de l'âge du Bronze (Brun, 1998). L'émergence de ces élites peut s'expliquer en partie par le rôle central qu'elles jouent dans la production de ressources et de produits finis (métalliques ou non²²¹), ainsi que dans les échanges, dont la richesse de leurs sépultures témoigne. La création de réseaux d'échange nécessite de forger de nombreuses relations interpersonnelles et des alliances diplomatiques (Kristiansen et Suchowska-Ducke, 2015) potentiellement scellées par des mariages intercommunautaires (Mittnik *et al.*, 2019 ; Reiter et Frei, 2021). Les élites n'occupaient donc pas uniquement un rôle de gestionnaire au sein de leur population d'appartenance, mais jouaient également un rôle prépondérant dans les relations intersociétales.

Des élites guerrières représentaient et défendaient le pouvoir local (Kaňáková Hladíková, 2018). Si les guerriers existaient déjà au néolithique²²², ces guerriers spécialisés ont joué un rôle de plus en plus

²¹⁹ Structure politique centralisée où le pouvoir est détenu par un chef héréditaire ou élu, qui exerce une autorité significative sur la redistribution des ressources, la médiation des conflits et la cohésion sociale (voir Iversen, 2017).

²²⁰ Groupe restreint de personnes qui détiennent une position dominante dans la société, en grande partie grâce à leur naissance et leur lignée. Les élites aristocratiques contrôlent des réseaux de patronage et de clientélisme, par lesquels elles maintiennent et étendent leur influence sociale et politique.

²²¹ L'or, l'argent, le cuivre, l'étain, l'ambre, le sel, le verre, le parfum, la laine, les peaux, les textiles, les fourrures, les coquillages ou encore le verre sont autant de ressources échangées sur de grandes distances à l'âge du Bronze (Earle *et al.*, 2015).

²²² Meller (2017) oppose ce qu'il appelle des combattants héroïques du Néolithique tardif à des soldats au service de leurs élites à l'âge du Bronze. Des fosses communes témoignant de massacres sont connues au Néolithique (voir notamment l'étude de Schroeder *et al.*, 2019) cependant la violence néolithique est initiée par des querelles

important pour défendre la production de ressources et des points stratégiques des routes commerciales (Earle *et al.*, 2015)^{223,224}.

Il n'existe pour autant pas de modèle précis de gouvernance par les élites : elles ne s'implantent certainement pas toutes de la même manière et ne règnent certainement pas non plus de façon similaire. Un élément intéressant permettant d'en témoigner concerne les tombes dans lesquelles ces élites reposent : le caractère ostentatoire de ces dernières est plus ou moins affirmé selon les régions et les périodes de l'âge du Bronze (Brun, 2007).

I/2.b De nombreux témoins d'interconnexion entre sociétés distantes

Des objets standardisés

Les modèles visant à expliquer et définir les échanges entre grandes régions sont nombreux mais il est certain que les échanges se marquent par une standardisation accrue des artefacts (Kuijpers et Popa, 2021) mais aussi par la circulation de lingots (conçus pour le transport et le stockage du métal en vue d'une refonte).

Au Chalcolithique des nodules de cuivre informes sont parfois exportés (Billard *et al.*, 1991), mais des lingots commencent déjà à circuler. En France, le plus vieux lingot trouvé est celui d'Eckwersheim dans le Bas-Rhin. Daté de la fin du Néolithique 3800-3600 av. J.-C. (Culture de Munzingen), il est constitué de cuivre avec présence de traces d'arsenic (Burger *et al.*, 2017)²²⁵. Cependant, les lingots de cuivre ne deviennent réellement courants en Europe occidentale qu'au Bronze moyen. Ils prennent des formes variées selon leurs régions de production et ces formes peuvent évoluer au cours du temps (Figure 155). Des lingots de typologie comparables peuvent parfois varier en forme et en poids à l'exemple des lingots dits plan-convexes dont la forme correspond à l'empreinte de la fosse de réduction dans laquelle les minerais sont fondus (Modl, 2019). Ces lingots sont directement issus de la métallurgie extractive primaire et sont donc à différencier des lingots ayant été moulés pour leur donner une forme tels que les lingots peau de bœuf quant à eux très standardisés. Certains objets tels que des haches sont également parfois interprétés comme des lingots. Ces dernières présentent souvent un manque de finition et pourraient avoir été coulées dans d'anciens moules correspondant à des productions dépassées d'un point de vue utilitaire et/ou esthétique (Delrieu *et al.*, 2015).

claniques tandis que les conflits majeurs sont datés de la fin de l'âge du Bronze et de l'âge du Fer (Peter-Röcher, 2007 p. 187-190 ; Meller, 2017). Un exemple permettant de l'illustrer est un champ de bataille découvert dans la vallée de Tollense (Allemagne) dont le nombre de guerriers ont participé à la bataille vers 1300 av. J.-C. est estimé entre 2000 et 6000 (Jantzen *et al.*, 2011 ; Terberger, 2017).

²²³ Selon les mêmes auteurs, ils ont également certainement mené des raids en vue de s'appropriier les richesses et les propriétés d'autres élites que celles qu'ils défendaient.

²²⁴ En Scandinavie, les gravures représentant des navires et des guerriers brandissant des armes sont contemporaines de la participation des communautés locales à des échanges à longue distance pour l'approvisionnement en métal (Ling *et al.*, 2018).

²²⁵ L'analyse de composition élémentaire de ce petit lingot de forme rectangulaire (1x15x0,5cm) montre qu'il aurait été fondu dans la région de Mondsee en Autriche (Bostyn et Vaquer, 2018).

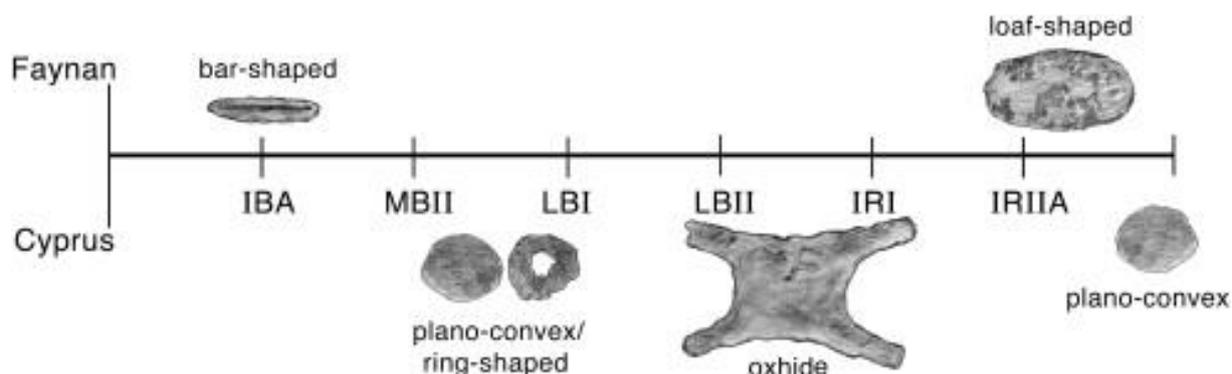


Figure 155 : Évolution des types de lingots issus de deux zones minières produisant du cuivre : Chypre et le district de Faynan (Jordanie, Levant). Source : Yahalom-Mack et al., 2014.

La découverte d'épaves indique que plusieurs types de lingots circulent dans un même bateau (Wang *et al.*, 2016). Ce fait traduit qu'un même navire peut transporter des productions issues de plusieurs zones de production mais il n'est pas non plus à exclure que la forme des lingots puisse correspondre à des usages différents et provenir d'une même zone de production. Les lingots en barre sont ainsi parfois interprétés comme une forme secondaire obtenue à partir d'un lingot plus large dans le but de produire des épées ou des dagues (Wheeler *et al.*, 1975). Il existe également des lingots de cuivre alliés (bronze ou bronze au plomb) produits dans des ateliers de fondeurs.

Outre les lingots, la standardisation se marque également par l'apparition des premiers poids de mesures (vers 3000 av. J.-C. au Proche-Orient et 2000 av. J.-C. en Europe). Ces derniers ne seraient utilisés à grande échelle qu'aux environs de 1200 av. J.-C. (Ialongo *et al.*, 2021). Bien que la forme et le matériau dans lequel est confectionné le poids varient selon les régions, la masse de ces derniers serait standardisée autour de 9-10 g en Europe (Figure 156).

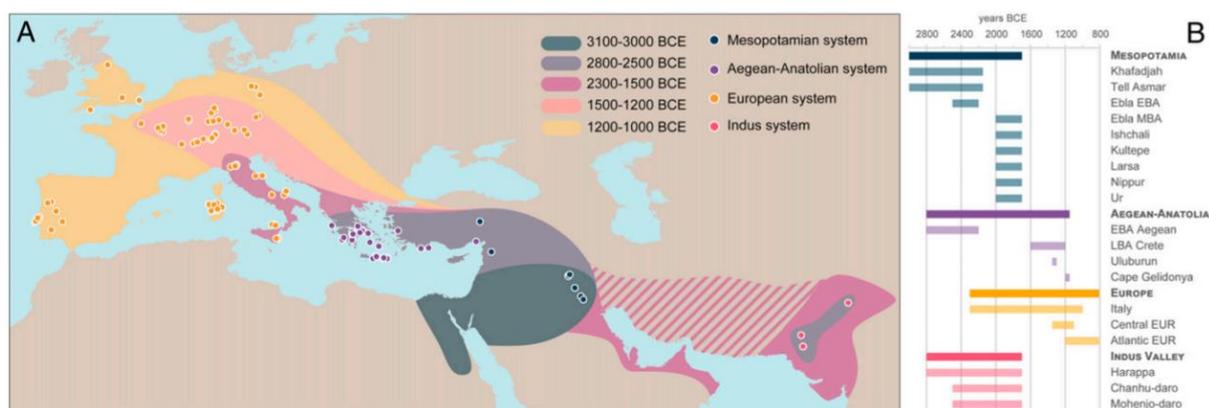


Figure 156 : Apparition et répartition des poids de mesure en plomb. Source : Ialongo et al., 2021.

Des mouvements de populations

L'interconnexion des sociétés et les relations d'alliances qu'elles tissent ont certainement été à l'origine de déplacements²²⁶.

Seuls des échanges de gènes entre populations relativement voisines ont récemment été mis en évidence au cours du III^e millénaire dans le nord du Levant (Skourtanioti *et al.*, 2020), dans les Balkans

²²⁶ Des conflits, des maladies ou encore le changement climatique pourraient également expliquer en partie le déplacement de populations.

(Freilich *et al.*, 2021), dans les îles Britanniques (Booth *et al.*, 2021), dans le sud de l'actuelle Allemagne (Mittnik *et al.*, 2019) comme dans l'ensemble de l'Europe centrale (Knipper *et al.*, 2017 ; Juras *et al.*, 2020 ; Papac, 2022). Seules les populations méditerranéennes²²⁷ et les populations des steppes de l'Oural (Haak *et al.*, 2015 ; Scorrano *et al.*, 2021) se déplaceraient alors massivement.

Tout comme les échanges à très grande distance, les brassages génétiques entre populations clairement distantes n'apparaîtraient à l'échelle de l'ensemble de l'Europe et de l'Asie qu'à partir du début de l'âge du Bronze (~2200 à 1800 av. J.-C.) (Allentoft *et al.*, 2015 ; Szécsényi-Nagy *et al.*, 2017). Ces mouvements ne suivent pas une dynamique claire. Les études montrent que les brassages génétiques seraient en grande partie induits par l'arrivée de femmes issues de populations distantes (Knipper *et al.*, 2017 ; Mittnik *et al.*, 2019 ; Villalba-Mouco *et al.*, 2022) et peu par le déplacement d'individus de sexe masculin. La plupart des déplacements de ces femmes sont multidirectionnels et peuvent être est-ouest comme ouest-est : des études menées en Bulgarie indiquent l'arrivée de femmes d'Europe de l'Ouest à l'âge du Bronze (Modi *et al.*, 2019) alors que le génome de peuples des steppes a été découvert dans des populations d'Europe de l'Ouest jusque dans les îles Britanniques (Cassidy *et al.*, 2016).

La circulation de différents métaux

Si les sociétés se hiérarchisent depuis la fin du Néolithique et plus encore, à partir du 16^e siècle av. J.-C. (Kristiansen et Suchowska-Ducke, 2015), c'est, comme nous venons de l'énoncer, en partie du fait des vastes réseaux de communication en place. Les régions d'Europe, aussi bien centrales que périphériques, sont alors interconnectées et les sociétés de l'âge du Bronze sont les premières à être liées par leur co-dépendance à l'égard des ressources minérales inégalement réparties dans l'espace géographique.

Une théorie intéressante émise par Earle *et al.* (2015) suggère que chaque région se spécialiserait dans la production de certaines ressources locales en fonction du bénéfice qu'elles pourraient en obtenir. Cette hypothèse est basée sur les travaux de Ricardo (1817) et plus précisément, sur sa loi des avantages comparatifs. Cette dernière veut que, dans un contexte de libre-échange, chaque région vise à se spécialiser dans la production dont elle peut tirer le plus de profit. Beaucoup d'effort de production et donc de main-d'œuvre sont alors consacrés à la production d'une ressource précise. Les régions délaisseraient donc certaines productions pour se consacrer principalement à l'exploitation des ressources (et des produits finis) pour lesquelles elles posséderaient un « avantage comparatif » par rapport aux régions avec lesquelles elles échangeaient. Par exemple, une région abritant des gisements d'étain (tel que le complexe atlantique) possède une ressource rare pouvant être échangée contre d'autres biens, exportés depuis d'autres régions (par exemple de l'ambre scandinave ou encore du sel alpin). Dans un tel modèle économique, de l'étain serait échangé contre du cuivre même si du cuivre est présent à proximité des gisements d'étain car l'étain possède une plus grande valeur d'échange.

²²⁷ Les populations ibériques (Villalba-Mouco *et al.*, 2021) et potentiellement l'ensemble des populations méditerranéennes (Modi *et al.*, 2022) connaissent déjà des brassages entre populations distantes au III^e millénaire. Une partie de ce brassage pourrait même impliquer des populations africaines (Olalde *et al.*, 2019).

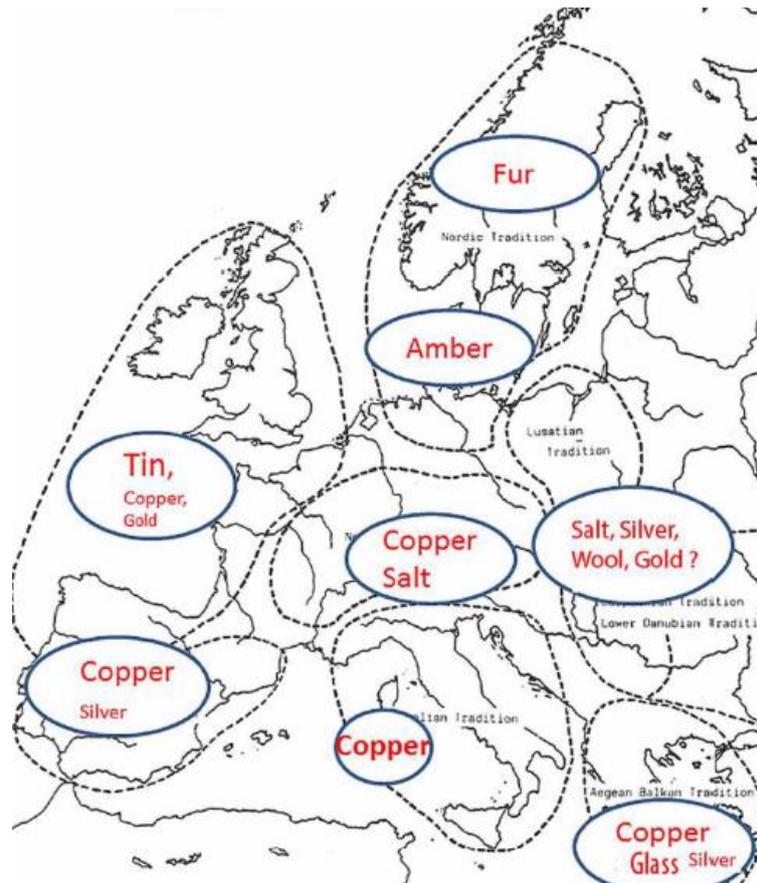


Figure 157 : Ressources disponibles dans les diverses régions d'Europe dont l'exploitation pourrait constituer un avantage comparatif. Source : Earle et al., 2015

Ce modèle reste théorique car il présente la faiblesse de ne pas reposer sur une connaissance précise des zones de production telles que les mines, et les ateliers métallurgiques (Figure 157). Des données économiques et commerciales sont également indispensables pour valider ou réfuter ce modèle de spécialisation. Il est nécessaire que nous évaluions les preuves de commerce à longue distance, y compris les routes commerciales et les points de redistribution.

II/ Les isotopes du plomb pour tracer la provenance d'artefacts : apports et limites

II/1 Comment tracer la provenance d'un artefact cuivreux protohistorique ?

La détermination de l'origine géographique du métal ayant servi à la réalisation d'un artefact est une question majeure dans le cadre de la reconnaissance des systèmes économiques anciens, en particulier pour les périodes protohistoriques pour lesquelles il n'existe pas de traces écrites. Dans cet objectif, trois approches sont classiquement appliquées dans l'étude d'un artefact cuivreux : une étude typologique, une caractérisation de sa composition élémentaire et une analyse isotopique du plomb. Chacune de ces études apporte des informations permettant de proposer des hypothèses plus ou moins assurées de l'origine géographique des productions métalliques, en particulier celles à base cuivre.

II/1.a La typologie de l'artefact comme indicateur d'une aire de production et de diffusion

Les archéologues se sont intéressés dès la fin du 19^e siècle à la typologie des artefacts et à leur évolution (Mordant et Wirth, 2017). Si le type d'un objet répond avant tout à une fonction d'utilisation, il peut varier selon les techniques de façonnage employées et ces techniques peuvent constituer un marqueur socioculturel. La forme de l'objet, sa taille, ses décors... sont alors des éléments stylistiques qui peuvent se rapporter à une période chronologique mais également à une aire géographique.

Certains artefacts présentent ainsi des détails que l'on n'identifie que dans certaines régions. La répartition de ces artefacts indique l'espace géographique dans lequel ce type d'objet a été consommé. Ces espaces peuvent être de dimensions variables. Si les haches à douille armoricaines (Tribouillard, 2018) ou encore les *ösenringen* (lingots en forme d'anneau) nord-alpins (Junk, *et al.*, 2001 ; Radivojević *et al.*, 2019) sont présents dans des aires de dimension régionale, les lingots peau de bœuf sont en revanche échangés dans la quasi-totalité de l'espace méditerranéen (Stos-Gale *et al.*, 1997 ; Kassianidou, 2001 ; Pinarelli, 2004 ; Stos-Gale, 2011 ; Kassianidou, 2013).

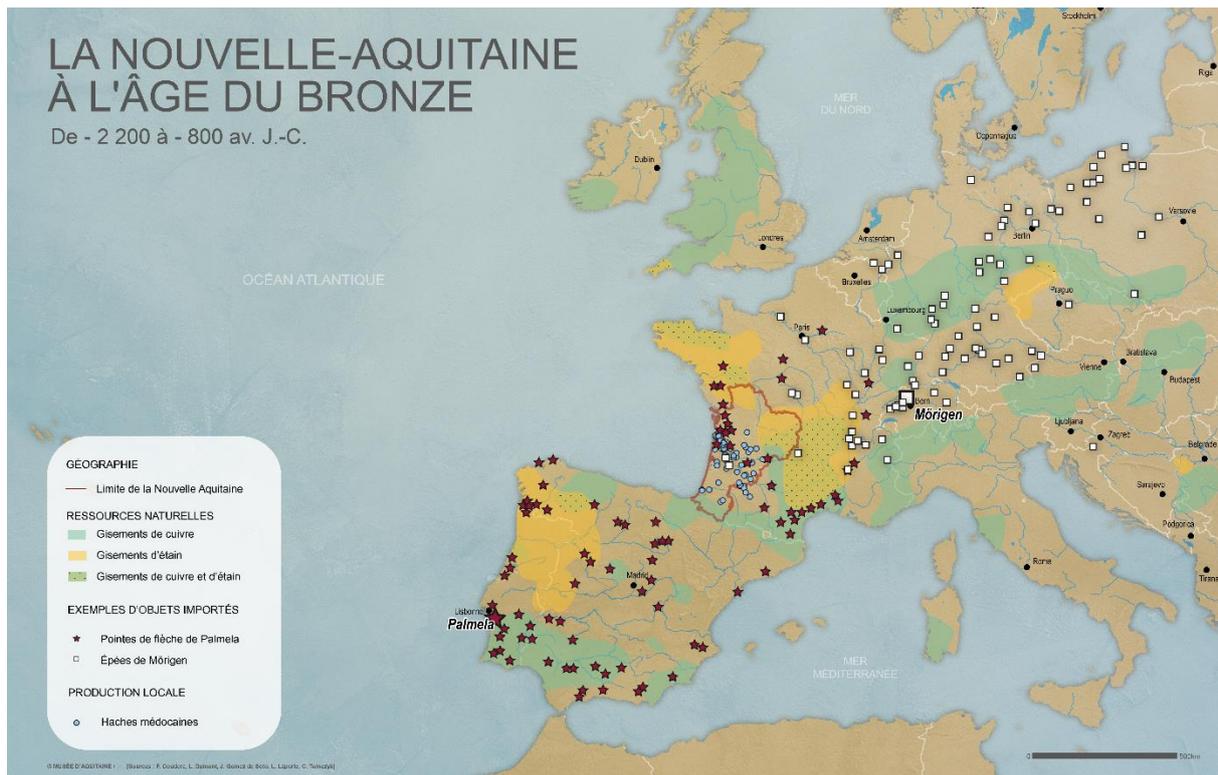


Figure 158 : Participation à une carte réalisée en collaboration avec le musée d'Aquitaine soulignant les vastes aires de répartition des pointes de flèche de Palmela (dans le sud-ouest de l'Europe), des épées de Mörigen (dans le nord-est européen) et des haches à rebords médocaines dont l'aire de répartition est restreinte à l'actuelle Aquitaine.

L'analyse typologique permet ainsi parfois de déterminer de grandes aires culturelles dans lesquelles les artefacts ont circulé. Des cartes de répartition permettent alors souvent de déterminer les secteurs où ces artefacts sont majoritairement présents (Figure 158). Les ateliers métallurgiques où ces artefacts sont produits sont également parfois retrouvés. Un exemple particulièrement intéressant est celui des haches à douille du type de Frouard dont des moules ont été retrouvés dans la zone de diffusion elle-même proche de mines de cuivre connues (Lachenal, 2022). Si le centre des productions est localisé dans une région minière, il est alors possible de considérer que des minerais locaux ont été exploités. Néanmoins cette supposition n'exclut pas de possibles erreurs. Un exemple connu concerne la Crète (Wheeler *et al.*, 1975) initialement perçue comme un grand producteur de cuivre (Faure, 1966 ; Branigan, 1974 ; Stos-Gale, 1992 ; Stos-Gale et Gale, 2006 ; Betancourt, 2006) et même un temps considérée comme la source des lingots de type peau de bœuf (Merrillees, 1974) et ce alors que l'île est dépourvue de cuivre en quantité notable (Liard, 2010 ; Spanakis, 2015)²²⁸.

De plus, si la typologie classique est un outil d'analyse précieux pour l'archéologue, elle peut s'avérer parfois insuffisante. En effet, des études morphométriques fines ont permis de démontrer que dès le Bronze moyen, les haches à talon bretonnes et normandes présentent des types très proches,

²²⁸ Cette erreur a pour source le fait qu'un nombre conséquent de lingots ont été trouvés en Crète et que des personnes identifiées comme crétoises portent des lingots dans des peintures de tombes égyptiennes. Des gisements présumés de cuivre sur l'île sont cités comme la source des métaux utilisés pour produire les lingots et les objets de fabrication locale (Faure, 1966 ; Gale et Stos-Gale, 1986). Cependant, afin de vérifier les rapports sur les gisements de cuivre, des prospections ont été menées par Muhly et George Rapp durant l'été 1974 mais aussi par les services géologiques locaux (Liard, 2010 ; Spanakis, 2015). Un certain nombre de gisements de cuivre mentionnés dans la littérature ne sont représentés que par de discrètes taches vertes sur les roches et certains sont de la serpentine et non du cuivre. Seuls deux sites (Miamou et une mine près de Chrysostomos pourraient avoir produit du cuivre dans de très faibles quantités).

difficiles à distinguer sans avoir recours à des analyses morphométriques statistiques (Muriel et Marilou 2019)²²⁹ et que des imitations produites dans des régions différentes pouvaient être produites et circuler (Forel *et al.*, 2009 ; Monna *et al.*, 2013). Ce phénomène d'imitation semble toucher des productions de nature et de fonction différentes dans l'ensemble de l'Europe dès 1 500 avant notre ère. Trois exemples peuvent illustrer notre propos : à la même période, des productions d'épées scandinaves copiaient puis réinterprétaient des modèles hittites (Flohr Sørensen, 2012), des motifs de biens de prestige chypriotes étaient copiés en Sardaigne (Vagnetti et Schiavo, 1989), des motifs de scarabées découverts dans le sud du Levant copiaient des modèles égyptiens (Ben-Tor, 2007 p.117-121). À la fin de l'âge du Bronze le montage des poignées des épées de type Mörigen témoignerait du fait qu'elles auraient été produites dans plusieurs ateliers localisés dans l'ouest et le nord-est de l'Europe (Mordant, 2022).

Il est donc complexe d'interpréter simplement la répartition d'un type d'artefact comme le reflet d'échanges à longue distance en partie du fait de l'existence possible de copies ou de réinterprétations locales. De plus, la typologie d'un artefact ne permet que rarement de définir sa région de production. Elle ne permet pas non plus de définir directement la région d'origine des minerais utilisés car des artefacts cuivreux peuvent être produits dans une région à partir de cuivre issu de gisements lointains. Ainsi, seules des analyses géochimiques permettent de confirmer des hypothèses de provenance concernant l'origine du métal utilisé.

II/1.b La composition de l'artefact comme témoin des processus métallurgiques employés

Un premier type d'analyse géochimique ayant connu son essor dans les années 1960 est l'analyse en composition élémentaire des artefacts et des déchets de production. La première étape de ce type d'analyse consiste à faire la distinction entre les éléments d'alliage (dont les teneurs sont généralement supérieures à 5 %) et les éléments présents dans des quantités inférieures à 1 % dont la présence est considérée comme accidentelle^{230,231} et héritée des minerais de cuivre fondus dont sont issus les métaux (Pernicka, 2014 ; Liu et Pollard, 2022)

Les éléments d'alliage confèrent des propriétés à un objet pour qu'il assure une fonction précise. La composition des différents éléments d'alliages (voir Bourgarit et Mille, 2014) permet de documenter les pratiques de métallurgie d'élaboration et de déterminer, par exemple, si les artisans bronziers de certaines régions ajoutaient sensiblement plus de plomb ou d'étain dans les alliages. Cela demande cependant de ne considérer dans l'analyse que des artefacts de même type²³².

Les éléments hérités des minerais fournissent une information différente. Certains de ces éléments sont des constituants majeurs des minéraux. Parmi les plus courants, la chalcopirite contient du fer et du soufre alors les cuivres gris contiennent également de l'arsenic et/ou de l'antimoine et parfois

²²⁹ Les auteurs relient ce fait à des influences stylistiques convergentes.

²³⁰ La présence d'étain dans des quantités inférieures à 2 % pourrait indiquer que l'artefact a été produit par recyclage. Dans le cas du plomb de telles quantités peuvent être liées à la fonte de minerais de cuivre riches en plomb et/ou à des recyclages.

²³¹ Entre 1 et 5 % il est complexe de définir si la présence d'un élément est ou non intentionnelle à l'exception de certains éléments qui ne sont pas naturellement associés au cuivre tels que l'étain et le plomb pour lesquels des teneurs de plus de 2 % sont considérées être un ajout volontaire (Johannsen, 2016).

²³² L'ajout de plomb au bronze est courant pour couler des objets longs et alors que des objets plus massifs (une épée par exemple) ne contiendront que très peu de plomb : les différences de teneurs en plomb ne seraient pas alors liées à des tendances régionales mais uniquement au type d'artefact produit.

des quantités notables d'argent. En plus de ces constituants majeurs, les minéraux contiennent des éléments traces qui diffèrent selon les types de gisements. Par exemple, les chalcopyrites issues de gisements ultramafiques contiennent du Ni sous forme de traces alors que cet élément est absent des gisements hydrothermaux (pour plus de détails voir George *et al.*, 2018 ; Marfin *et al.*, 2020 ; Torró *et al.*, 2022 et Caraballo *et al.*, 2022).

Dans le cas du cuivre et des alliages cuivreux, l'analyse des teneurs en argent, en arsenic, en antimoine mais aussi en nickel²³³ est particulièrement intéressante pour regrouper de nombreux artefacts selon leur composition (citons par exemple Pernicka, 2014 ; Bray *et al.*, 2015 ; Ling *et al.*, 2019 ; Radivojević *et al.*, 2019). Ces analyses élémentaires permettent de distinguer les cuivres issus de la fonte de minerais de cuivre à antimoine et/ou arsenic (Figure 159 ; Pernicka, 1990 ; Nørgaard *et al.*, 2019).

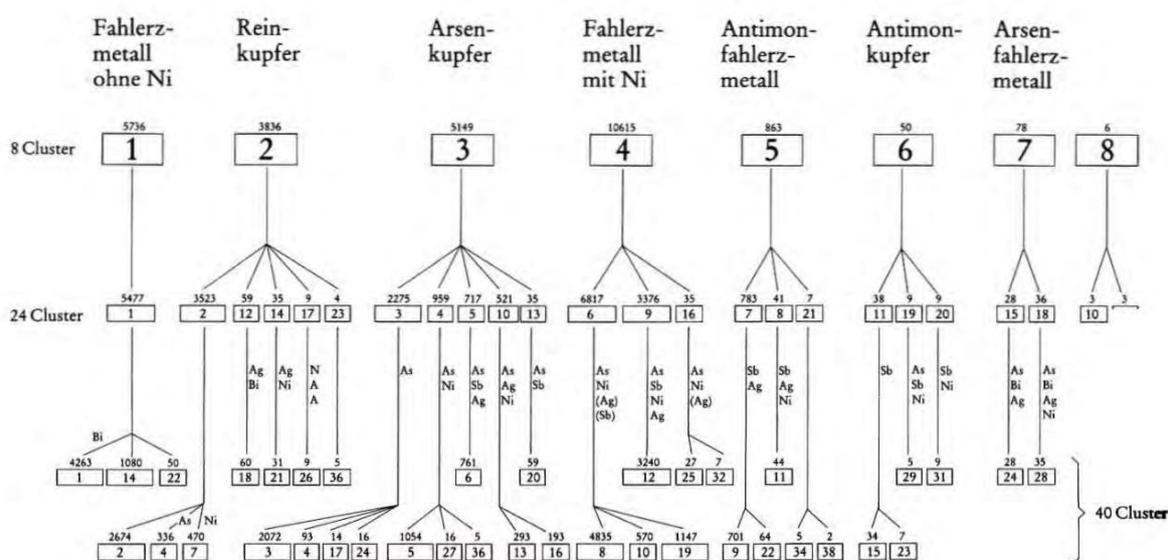


Abb. 42 Aufteilung von ca. 26500 Metallanalysen prähistorischer Kupferartefakte mittels Clusteranalyse.

Figure 159 : Groupes de compositions définis par Pernicka (1990).

L'efficacité de ces analyses géochimiques a conduit de nombreux chercheurs (Pollard, 2018 ; Radivojević *et al.*, 2019) à comparer les analyses réalisées sur des centaines de milliers d'artefacts depuis les travaux précurseurs d'Otto et Witter (1952) jusqu'aux grands projets européens dont le SAM project de l'Université de Stuttgart (Junghans *et al.*, 1960 ; 1968) ou encore la base FLAME (Krause, 2003). Très rapidement diverses méthodes statistiques impliquant pour la grande majorité d'entre elles des Analyses en Composantes Principales (ACP) ont été appliquées pour identifier des groupes géochimiques (Junghans *et al.*, 1968, Chernykh 1970 ; Ottaway 1982 ; Baxter, 1995 et 1999 ; Pernicka, 1999 ; Visco *et al.*, 2015 ; Nørgaard *et al.*, 2019 ; Costa *et al.*, 2021). Ces analyses permettent de regrouper les artefacts de certaines régions qui possèdent des associations d'éléments dans des proportions semblables. Des aires d'approvisionnement et des centres de productions de cuivre ont alors pu être proposés lorsque ces centres se situaient dans des régions minières.

Cependant, outre le fait que la précision des analyses peut être très variable selon le type de matériel de mesure et l'hétérogénéité du métal, l'interprétation de ce type d'analyse est rendue complexe par le fait qu'elles sont très sensibles (i) aux hétérogénéités des minerais, (ii) aux températures de fonte et (iii) aux refontes et recyclages.

²³³ D'autres éléments et en particulier le fer, le bismuth, le cobalt, le manganèse, le soufre et l'or sont également parfois pris en compte (Bray, 2022)

Influence des processus métallurgiques sur les compositions élémentaires

Dans l'hypothèse où les minerais fondus seraient très homogènes en termes de composition et permettraient donc d'obtenir du cuivre présentant une composition constante, il faut prendre en compte que les processus métallurgiques et en particulier les températures de chauffe modifient les compositions élémentaires.

Par exemple, l'arsenic et l'antimoine sont des éléments volatils qui vaporisent sous l'effet d'un grillage et/ou d'une chauffe importante et ce, même en conditions réduites où les départs d'éléments sous forme de gaz sont très limités. En revanche, l'argent ou encore le nickel vont quant à eux se retrouver concentrés dans les métaux après le départ des éléments volatils (McKerrell et Tylecote, 1972 ; Merkel, 1983 ; Budd, 1991 ; Pollard *et al.*, 1991 ; Sabatini, 2015 ; Rademakers *et al.*, 2020 ; Bray, 2022). Certains éléments disparaissent du métal en fonction du temps qu'ils passent sous forme liquide (Bray et Pollard, 2012) et une abrasion importante lors du façonnage peut entraîner des effets de ségrégation (McKerrell et Tylecote, 1972). Des minerais issus d'un même gisement et fondus sur un même site peuvent produire du cuivre aux compositions différentes en éléments traces si les températures de chauffe ne sont pas parfaitement identiques et si le procédé métallurgique est mal maîtrisé.

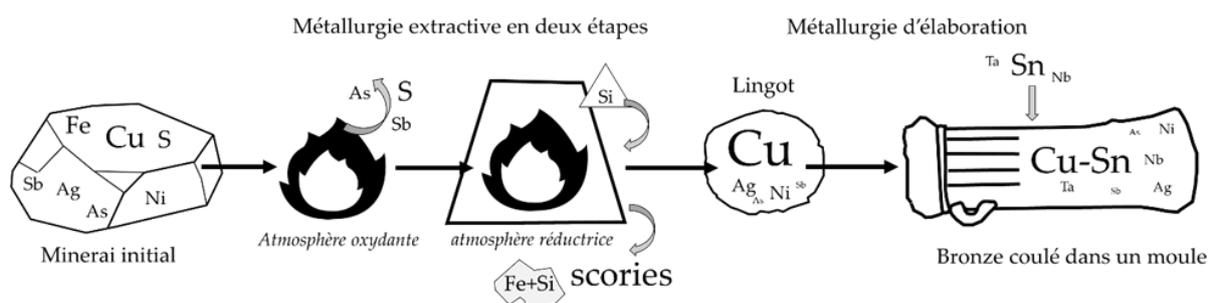


Figure 160 : Schéma simplifié des modifications de compositions élémentaires pouvant se produire depuis l'extraction d'un minerai de cuivre sulfuré jusqu'à la production d'artefacts en bronze.

Si de l'étain est ajouté au cuivre, la composition en éléments traces ne sera que légèrement modifiée car les minerais d'étain ne présentent pas les mêmes éléments traces que les minerais de cuivre (voir Wang *et al.*, 2022 pour plus de détails). En revanche, si du plomb est ajouté comme élément d'alliage, la similarité des éléments traces présents dans ces minéraux et dans les minerais cuivreux rend complexe l'étude chimique des artefacts. Il en va de même si des artefacts sont refondus pour obtenir de nouveaux objets (on parle alors de recyclage) car les concentrations en éléments seront à nouveau modifiées et correspondront à des mélanges.

Influence des « mélanges de sources » sur les compositions élémentaires

Un autre problème qui peut se poser pour identifier la ou les sources de minerais exploitées concerne le mélange éventuel de minerais ou de métaux lors de refontes liées à un recyclage d'artefacts. La théorie couramment admise veut que ces mélanges conduisent *in fine* à des compositions qui s'homogénéisent et deviennent semblables en moyennant les compositions (voir, par exemple Ling *et al.*, 2019 ; Artioli *et al.*, 2020 ; De Ceuster et Degryse, 2020). À l'inverse, il est supposé que si certains éléments traces dans les artefacts affichent des concentrations très élevées ou très faibles (permettant alors la discrétisation de groupes de compositions élémentaires), l'hypothèse d'un mélange peut être

exclue (Charles, 1980 ; Pernicka, 2014 ; Bray *et al.*, 2015 ; Radivojević *et al.*, 2019 ; Bray, 2022). Néanmoins, en fonction des résultats analytiques, il demeure très complexe d'identifier les recyclages et se sont plutôt des cuivres très riches en impuretés qui sont identifiés comme issus de recyclages.

II/1.c Les isotopes du plomb de l'artefact comme traceur d'un gisement d'origine

Un second type d'analyse géochimique couramment employé pour identifier la provenance d'un artefact métallique consiste en la caractérisation de sa signature isotopique du plomb. Cette signature est utilisée depuis les années 1960 (Grögler *et al.*, 1966 ; Brill et Wampler, 1967) et s'est largement développée dans les années 1980 (Gale, 1980 ; Wagner *et al.*, 1980 ; Pernicka *et al.*, 1981 ; Stos-Gale et Gale, 1981 ; Pernicka *et al.*, 1984) pour identifier le gisement d'où provient le cuivre contenu dans un artefact.

Contrairement aux analyses typologiques et de composition élémentaire, les isotopes du plomb permettent de définir une zone de production. Comme les méthodes précédemment citées, de nombreuses limites existent pour ce type de détermination de provenance : elles produisent souvent un résultat exact en termes de non-provenance mais les résultats sont imprécis lorsqu'il s'agit de trancher entre deux provenances possibles tant les signatures de certaines régions géologiques pourtant géographiquement distantes peuvent être similaires (on parle alors d'*overlaps* de signatures). De plus, la question du recyclage évoquée pour les analyses élémentaires se pose également dans le cas des isotopes du plomb car il modifie tant la composition de l'artefact que la composition isotopique du métal issu du mélange.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons pourtant choisi de nous concentrer sur ce type d'analyses car c'est le seul permettant de tracer l'origine des métaux et donc les exportations des mines. Nous allons en lister les limites et les apports et essayer de proposer des traitements statistiques permettant de proposer des provenances avec un degré de précision accru.

II/1.d De meilleures hypothèses de provenance obtenues en croisant les données

Aucune méthode de traçage de provenance n'est donc complètement pertinente en elle-même et le croisement des résultats obtenus par plusieurs indicateurs constitue la meilleure manière de conforter des hypothèses de provenances.

Les trois types d'études que nous venons d'évoquer contribuent à définir la provenance du cuivre contenu dans des artefacts mais toutes possèdent des limites. La typologie peut permettre de circonscrire des aires de diffusion d'un type d'artefact mais il est parfois difficile d'attribuer une aire géographique de production à des artefacts dont la typologie est proche (des imitations d'objets difficiles à identifier sans analyses morphométriques précises peuvent être produites dans des régions différentes). Les compositions élémentaires en éléments traces sont héritées des types de minerais de cuivre fondus et dépendent des processus métallurgiques employés pour les fondre. Elles témoignent donc des chaînes opératoires qui peuvent être propres à chaque région minière mais elles sont également sensibles aux variations de composition des minerais et aux augmentations des températures de chauffe. Elles ne permettent parfois pas d'attribuer précisément une composition élémentaire spécifique à une zone géographique. Les isotopes du plomb permettent d'identifier la région minière d'origine du cuivre contenu dans les artefacts mais ces analyses sont régulièrement limitées en particulier par le fait que des régions minières distinctes puissent avoir des signatures isotopiques similaires.

Des études typologiques approfondies, de composition élémentaire et d'isotopie du plomb sont cependant rarement menées pour un même artefact si ce n'est dans le cas d'artefacts exceptionnels (citons par exemple le disque de Nebra étudié par Ehser *et al.*, 2011 ; Pernicka, 2013 ; Pernicka *et al.*, 2016 et 2020 ; Krause, 2021 et Berger *et al.*, 2022). Ainsi, comme déjà souligné par Pollard et Bray (2018 p156), la majorité des artefacts analysés en isotopie du plomb n'ont pas fait l'objet d'analyses en composition élémentaires. Les auteurs indiquent que ce biais est relié au fait que peu de laboratoires sont équipés du matériel permettant de réaliser ces deux types d'analyses. Il est donc malheureusement courant de ne disposer que de données typologiques, de compositions élémentaires ou isotopiques²³⁴ ce qui, couplé à la durée limitée d'une thèse et à la difficulté de récupérer un nombre très conséquent de données d'analyses publiées nous a poussés à n'aborder qu'un seul aspect du traçage de sources : les signatures isotopiques du plomb²³⁵.

II/2 Limites des études de provenance s'appuyant sur les isotopes du plomb

II/2.a Comment se forment les isotopes du plomb, pourquoi sont-ils caractéristiques d'un gisement ?

Plomb primitif et plomb radiogénique, indicateurs de l'âge de la fermeture du gisement

Le plomb peut être primitif ou radiogénique. Le plomb primitif est celui présent depuis la création de la terre. Il s'agit du ²⁰⁴Pb. Les autres isotopes du plomb sont dits radiogéniques car ils sont issus de la désintégration radioactive d'autres éléments chimiques, en l'occurrence l'uranium (U) et le thorium (Th). La désintégration radioactive de l'uranium et du thorium s'effectue par une série de transformations qui constitue une chaîne (Figure 161). Les éléments constituant les maillons de cette chaîne (produits intermédiaires) sont instables et se désintègrent rapidement. Ils sont de trop courte durée de vie pour être intéressants dans l'étude des événements géologiques (Houtermans, 1946) : ²¹⁰Pb a une demi-vie (temps au bout duquel la moitié de l'isotope s'est désintégrée) de 22 ans, ²¹¹Pb de 36 min, ²¹²Pb de 10h, ²¹⁴Pb de 26 min.

²³⁴ La base de données Oxalid regroupe plus de 3500 analyses isotopiques du plomb d'artefacts mais seuls 24 % d'entre eux ont également fait l'objet d'analyses de composition élémentaire.

²³⁵ Les interprétations proposées auraient été plus pertinentes en ne sélectionnant que les données présentant ces trois informations mais le nombre d'artefacts considéré aurait été trop fortement limité.

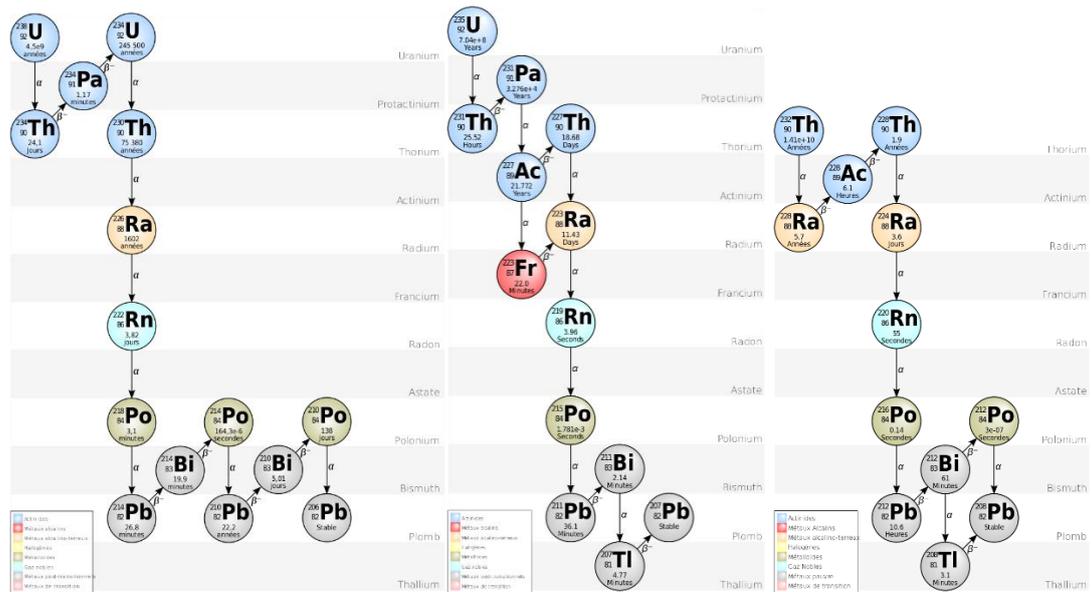


Figure 161 : Chaînes de désintégration de l' ^{238}U (à gauche) de l' ^{235}U (au centre) et du ^{232}Th (à droite).
Source de l'image : Wikipédia.

En revanche, l'élément correspondant au dernier maillon de la chaîne de désintégration est stable (il ne se désintègre pas en un ou plusieurs éléments fils). Les isotopes radiogéniques du plomb qui correspondent aux formes finales de la désintégration d'éléments pères sont le ^{206}Pb , le ^{207}Pb et le ^{208}Pb . Plus précisément, ^{206}Pb et ^{207}Pb sont issus de la désintégration radioactive de l'uranium (U)²³⁶ et ^{208}Pb de celle du thorium (Th)²³⁷ : $^{235}\text{U} \Rightarrow ^{207}\text{Pb}$; $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}$; $^{232}\text{Th} \Rightarrow ^{208}\text{Pb}$.

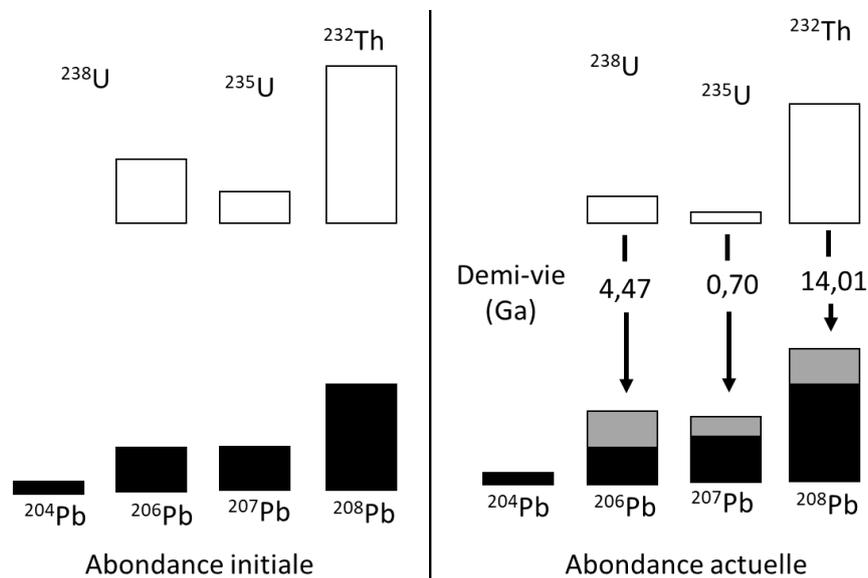


Figure 162 : Schéma simplifié de la désintégration de l'uranium (U) et du thorium (Th) en ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb .
Modifié d'après Marcoux, 1986 p.17 ; Pernicka, 1990 ; Ceyhan, 2003.

²³⁶ L'uranium a trois isotopes naturels : ^{234}U (abondance relative de 0,01 %), ^{235}U (0,72 %), et ^{238}U (99,3 %) avec des demi-vies respectives de $2,5 \times 10^5$ ans, $0,7 \times 10^9$ ans, et $4,5 \times 10^9$ ans.

²³⁷ Le thorium n'a qu'un seul isotope naturel : ^{232}Th avec une demi-vie de 14×10^9 ans.

Les demi-vies des éléments pères étant différentes, les isochrones sont différentes pour chaque rapports isotopiques du plomb (Figures 163 et 162 ; voir également les travaux de Stacey et Kramers, 1975 et de Cumming et Richards, 1975)²³⁸.

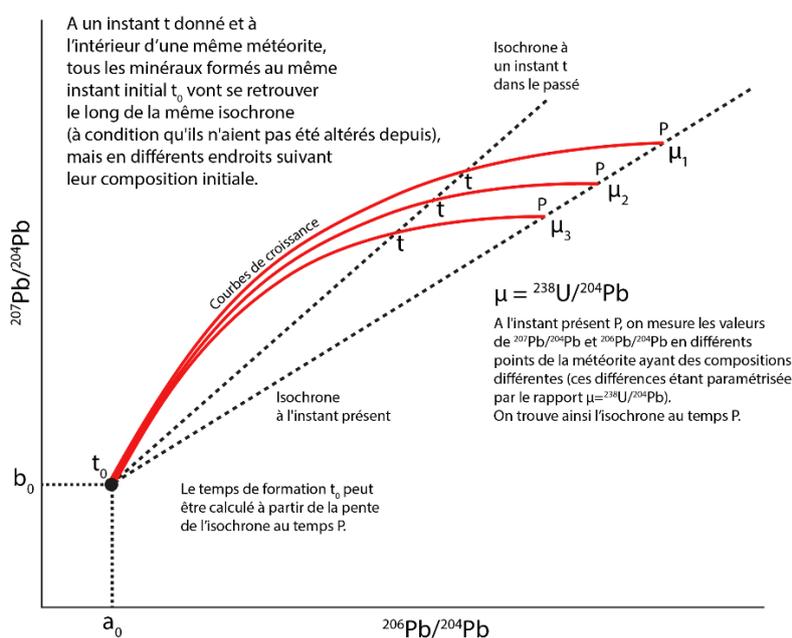


Figure 163 : Exemple d'isochrone isotopique en différents endroits d'une même météorite : les courbes de croissance montrent que le rapport ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ augmente initialement plus vite que le rapport ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$.
Source : Observatoire de Paris.

Si des mélanges de plombs formés dans des environnements différents se produisent, les signatures isotopiques du plomb ne sont pas conservées (Zartman et Doe, 1981). Ces cas sont assez courants notamment dans les zones d'accrétion²³⁹, les zones ayant subi une orogénèse²⁴⁰ mais encore dans le cas de phénomènes hydrothermaux secondaires. Les signatures mesurées ne correspondent alors plus aux signatures des systèmes initiaux mais à celles d'un nouveau système clos.

Une signature isotopique du plomb est donc une combinaison de plombs multi-stades que Marcoux (1986) caractérise sous le terme de « mélange de plombs ». Dans le cas d'un gisement, la composition isotopique du plomb correspond donc à un mélange impliquant du plomb de(s) la roche(s) encaissante(s) et du ou des fluides minéralisateurs d'âges pouvant être différents. La signature isotopique est cependant « gelée » (García de Madinabeitia *et al.*, 2021) au moment de la fermeture du gisement soit à partir du moment où il n'y a plus d'échanges de fluides.

Plombs radiogéniques issus du thorium ou de l'uranium, marqueurs des différents types de gisements

L'uranium et le thorium (respectivement à l'origine du ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$ et du ${}^{208}\text{Pb}$) coexistent dans la nature en raison de la similitude de leurs propriétés chimiques et du fait qu'ils possèdent tous deux la même valence (IV). L'uranium est cependant plus mobile que le thorium en raison de sa capacité à former l'ion uranyle (UO^{2+}) en milieu oxydé. L'ion uranyle possède une valence de VI et est soluble

²³⁸ Les premiers travaux concernant les modèles d'évolution du plomb sont attribués à Holmes (1946) et Houtermans (1946).

²³⁹ Zones où les plaques tectoniques s'éloignent les unes des autres (contextes dits d'extension).

²⁴⁰ Soit la mise en place de chaînes de montagnes (contexte de compression).

dans l'eau, ce qui le rend mobile et permet à l'uranium de quitter le système (Russell et Farquhar 1960 ; Faure 1986). L'évacuation de l'uranium augmente alors la concentration en thorium tandis que la proportion d'uranium augmente dans les systèmes où l'uranium est déposé. Les teneurs en thorium et uranium initiaux ne sont donc pas identiques dans tous les gisements.

Ainsi, les variations d'abondance du thorium et de l'uranium en fonction du type de roche et de l'âge de la roche combinées à : (i) la vitesse de désintégration des isotopes parents (U et Th) ; (ii) les rapports initiaux parent-fils ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ et $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$) dans le réservoir source ; (iii) la composition isotopique initiale du plomb du réservoir et (iv) la durée de l'évolution du réservoir avant le fractionnement du plomb du système par des processus géochimiques, expliquent la variation de la composition isotopique du plomb dans les gisements du monde entier (Sangster *et al.*, 2000).

II/2.b Conversion des abondances naturelles en rapports isotopiques

Différences d'abondances naturelles

L'abondance de chaque isotope dépend de nombreux facteurs et n'est donc pas constante : certains isotopes sont naturellement plus abondants que d'autres (Figure 164).

L'isotope présent dans la quantité la plus faible est l'isotope primitif : le ^{204}Pb . Il ne représente qu'environ 1,4 % du plomb total. Le ^{206}Pb et le ^{207}Pb sont tous deux issus de la désintégration de l'uranium et présentent des abondances naturelles moyennes proches (24,1 % et 22,1 %). La plus grande proportion de plomb est issue de la désintégration du thorium. Ce dernier est moins dispersé dans la croûte terrestre que l'uranium car il est beaucoup moins soluble et y est beaucoup plus abondant²⁴¹. Son isotope fils, le ^{208}Pb , représente ainsi environ 52,4 % du plomb total.

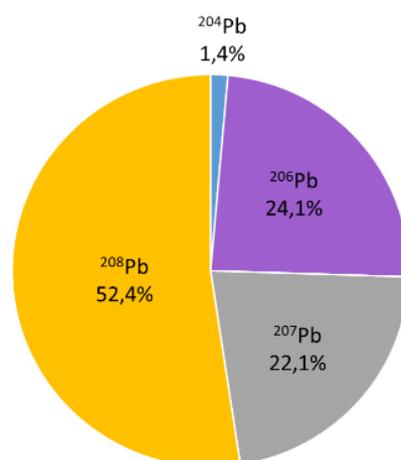


Figure 164 : Abondances naturelles moyennes des isotopes du plomb

Plusieurs rapports isotopiques couramment utilisés

Afin d'être analysées dans des diagrammes bivariés, les abondances des quatre isotopes stables du plomb sont transformées en rapports isotopiques. Cinq combinaisons sont régulièrement utilisées : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (le rapport $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ou son inverse n'est jamais employé).

²⁴¹ L'abondance crustale du thorium est de 9,6 mg/kg et celle de l'uranium de 2,7 mg/kg (Ghazi et Millette, 2006).

Les études de provenance ont initialement utilisé les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (et une majorité d'entre elles continuent d'utiliser ces rapports) alors que les études de géosciences et une partie des études archéométriques actuelles normalisent les isotopes radiogéniques sur l'isotope non radiogénique : le ^{204}Pb (Figure 165).

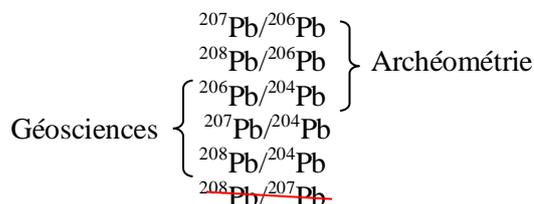


Figure 165 : Rapports isotopiques du plomb couramment utilisés.

Le motif évoqué historiquement pour justifier une normalisation sur le ^{206}Pb est la très faible abondance naturelle du ^{204}Pb couplée au fait qu'il présente une possible confusion de spectre avec le ^{204}Hg par les premiers outils de mesure datant des années 1960. La quantification du ^{204}Pb a ainsi été initialement considérée comme hasardeuse et les rapports isotopiques impliquant le ^{206}Pb ont initialement été préférés à ceux impliquant le ^{204}Pb (Gulson *et al.*, 2018). Néanmoins, cette interférence souvent citée peut être résolue par des calculs de corrections utilisant le ^{202}Hg (citons par exemple Nobre Silva *et al.*, 2009 ; Stone *et al.*, 2019 ; Gilbert et Glorie, 2020 ; Irrgeher *et al.*, 2023 ; Thomas, 2023) et/ou par des prétraitements chimiques avant analyse (Weiss *et al.* 2004 ; Chillrud *et al.*, 2005 ; Doherty et Buckley, 2021). Les spectromètres de masse à source solide (TIMS) développés dans les années 1980 tout comme les spectromètres de masse multicolecteurs (à plasma et à couplage inductif) (MC-ICPMS) des années 2000 peuvent ainsi mesurer avec précision les rapports isotopiques normés à l'isotope ^{204}Pb dont l'abondance est la plus faible (Taylor *et al.*, 2015). Les rapports isotopiques sont donc de plus en plus régulièrement normalisés sur le ^{204}Pb (primitif).

II/2.c De quels métaux peut-on tracer l'origine ?

Les processus métallurgiques n'entraînent pas de fractionnement isotopique

Comme nous venons de le voir, les isotopes du plomb permettent de caractériser l'histoire géologique d'un gisement (voir Marcoux (1986) : « Un échantillon de plomb enregistre dans sa composition isotopique la longue chaîne de son histoire géologique depuis son milieu primitif de genèse, ses associations éventuelles en milieu uranifère et thorifère jusqu'aux processus de dépôt qui ont élaboré son visage final »). Cette signature devient « fixe »²⁴² dès lors que les processus métallogéniques²⁴³ ne sont plus actifs (García de Madinabeitia *et al.*, 2021). Les signatures enregistrées dans les minerais ne seront alors modifiées ni par leur fonte lors des processus métallurgiques (Cui et Wu, 2011 ; Pernicka, 2014), ni par l'altération que peuvent subir les objets produits (Snoek *et al.*, 1999) car ces processus n'entraînent pas de fractionnement isotopique. La signature du minerai est donc conservée dans le lingot produit à partir de ce dernier et par extension, la signature du minerai est conservée dans les objets issus de ce lingot.

Néanmoins, si dernière cette affirmation est très couramment admise, elle n'est appuyée que par peu d'études expérimentales. Une étude récente de Rademakers *et al.* (2020) se base sur l'analyse de minerais de cuivre dont ils ont mesuré le rapport isotopique initial puis qu'ils font fondre selon un

²⁴² Le fractionnement isotopique cesse mais la décroissance radioactive continue de se produire.

²⁴³ Processus de formation des gisements.

procédé métallurgique employé au Moyen Empire à Ayn Soukhna (Égypte)²⁴⁴. Le métal produit expérimentalement présentait alors un fractionnement généralement négligeable sauf dans le cas de minerais très pauvres en plomb trace où un fractionnement notable s'est produit. Dans le cas de minerais de plomb-argent, Budd *et al.* (1995) précisent que si tous les tests en coupellation montrent qu'il n'y a pas de fractionnement isotopique, ces derniers indiquent qu'il n'est pas à exclure qu'il pourrait y en avoir s'il y a grillage des galènes²⁴⁵ et qu'il est donc important d'étudier les processus métallurgiques dans leur ensemble.

Un traceur peu pertinent pour l'or et de l'étain mais efficace pour le cuivre et le plomb

Les études de provenance peuvent être théoriquement réalisées sur des artefacts de compositions variées et ne concernent pas que l'étude d'artefacts métalliques. L'argile qui compose des céramiques (Renson *et al.*, 2013 ; Wu *et al.*, 2022) ; les enduits qui recouvrent les céramiques (Wolf *et al.*, 2003 ; Goemaere *et al.*, 2022) mais encore le verre (Brill *et al.*, 1974 ; Henderson *et al.*, 2005 ; Degryse *et al.*, 2006) font souvent l'objet d'analyses isotopiques²⁴⁶.

Néanmoins, si les métaux sont régulièrement analysés par isotopie du plomb, peu d'entre eux sont adaptés pour ce type d'étude.

Des difficultés d'analyses pour l'or et l'étain du fait de leurs faibles teneurs naturelles en plomb

Les isotopes du plomb sont très peu efficaces pour rechercher la provenance des métaux dont la teneur naturelle en plomb est très faible.

Cela est le cas notamment de l'étain. Le réseau cristallin du minerai d'étain, la cassitérite (SnO₂), n'incorpore pas beaucoup d'ions plomb (Pb²⁺) (voir Farthing, 2002 ; Molofsky *et al.*, 2014 ou encore Berger *et al.*, 2019)²⁴⁷. La cassitérite possède de très faible teneur en plomb (10 à 500 ppm) et la signature isotopique du plomb y est alors si discrète que le seul processus de réduction métallurgique conduit à un partitionnement des concentrations en plomb avec les autres minéraux constituant le minerai et que la volatilisation du plomb durant le processus métallurgique, même si elle est très faible, conduit à une variation importante (> 1 %) des rapports isotopiques entre cassitérites et lingots d'étain (Clayton, 2001)²⁴⁸.

Cela est également le cas de l'or dont les teneurs en plomb sont naturellement très faibles (Standish *et al.*, 2013 ; Jansen *et al.*, 2021). L'utilisation de mercure (Hg) pour récupérer ce dernier est également régulièrement signalée comme problématique car la présence d'inclusions de mercure peut rendre la mesure du ²⁰⁴Pb complexe du fait de la difficulté alors accrue de calculer les interférences entre ²⁰⁴Hg et le ²⁰⁴Pb (Hauptmann et Klein, 2009 ; Bendall *et al.*, 2009 ; Standish *et al.*, 2015).

²⁴⁴ Il s'agit d'un système de four combinant les opérations de grillage et de réduction dans une opération unique.

²⁴⁵ Le recensement des ateliers mené dans le cas de cette thèse montre cependant qu'à ce jour aucune aire de grillage n'a été trouvée pour les périodes étudiées. Cette opération n'est pas nécessaire et pourrait même être contreproductive car un mauvais contrôle de la température de grillage des galènes mène à la formation d'oxydes de plomb dont l'argent ne peut pas être directement extrait (Smith, 2006).

²⁴⁶ Dans le cas du verre, les isotopes du strontium (Sr) sont également souvent analysés en complément de ceux du plomb.

²⁴⁷ La charge et le rayon ionique de l'ion plomb commun dans les solutions aqueuses sont très différents de ceux du Sn⁴⁺ à la coordination octaédrique.

²⁴⁸ L'hétérogénéité des signatures du plomb dans les lingots peut même atteindre 11,5 %.

Des difficultés d'analyses pour l'argent dans le cas d'apport de plomb extérieur pour effectuer la coupellation

Tracer la provenance de l'argent est également assez complexe car sa signature isotopique peut être modifiée si du plomb extérieur est utilisé pour faciliter la coupellation, comme c'est notamment dans le cas de l'exploitation de jarosite ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)²⁴⁹. Si la jarosite n'est pas exploitée au début de l'âge du Bronze, les Phéniciens en découvrent rapidement le potentiel argentifère (Craddock, 2014). Cependant, les jarosites ne contenant pas de plomb, il est nécessaire d'en apporter pour effectuer la coupellation et extraire l'argent (Trincherini *et al.*, 2009 ; Anguilano *et al.*, 2010). Des exportations de plomb des mines de Cartagena sont avérées dès 1100 av. J.-C. Ce plomb est alors mélangé à des jarosites dans des sites distants (Wood et Montero-Ruiz, 2019). La signature du plomb exogène des mines de Cartagena supplante alors celle des gisements d'argent et cette signature exogène peut être tracée jusqu'au Levant dès le IXe siècle av. J.-C. (Eshel *et al.*, 2019 ; Wood *et al.*, 2019). Tracer la provenance de l'argent pour la fin de la période étudiée est donc complexe tant l'importance des tonnages de plomb exogènes produite semble conséquente et les teneurs résiduelles en plomb importantes dans les artefacts en argent²⁵⁰. Ainsi, tracer la provenance d'artefacts en argent demande une connaissance précise des zones de production de plomb.

Un autre élément limitant les études de provenance est le manque d'analyses disponibles réalisées sur des minerais autres que des galènes (sur des jarosites, de l'argent natif ou encore des cuivres gris argentifères par exemple). Il n'est donc pas surprenant que les analyses réalisées sur des artefacts ibériques du III^e millénaire av. J.-C. (culture d'El Agar) ne permettent de proposer aucune correspondance avec les nombreuses galènes analysées en péninsule Ibérique. L'argent pourrait effectivement ne pas être issu de galènes mais plutôt d'argent natif ou encore de cuivres gris n'ayant pas fait l'objet d'analyses isotopiques (Bartelheim *et al.*, 2012).

Bien que plus courantes que les études par isotopie du plomb portant sur l'étain ou encore l'or, les études de provenance d'artefacts protohistoriques en argent demeurent encore assez rares. Les motifs de cette rareté sont complexes à définir car les propriétés intrinsèques du métal sont favorables à ce type d'analyses et que les contextes de production sont assez bien supposés. Une explication pourrait être que les artefacts en argent sont rares et qu'il est aujourd'hui toujours difficile d'obtenir des autorisations pour réaliser des prélèvements.

Des analyses abondantes d'artefacts en cuivre et alliages cuivreux et plus rares pour le plomb

Les objets en cuivre et alliages cuivreux constituent sans nul doute l'immense majorité des artefacts analysés en isotopie du plomb. Le cuivre se prête en effet très bien à ce type d'analyses car il contient naturellement de faibles quantités de plomb. La provenance du cuivre constituant des bronzes peut elle aussi être tracée car l'ajout d'étain extérieur ne modifie pas la signature du plomb qui demeure celle du gisement de cuivre.

Les très faibles concentrations de plomb dans l'étain ajouté, combinées au fait que l'étain est présent en moindre quantité que le cuivre dans les bronzes, conduisent à ce que la signature isotopique

²⁴⁹ La jarosite est un minéral d'altération supergène très fortement argentifère. Elle est notamment abondante dans les mines du Rio Tinto où elle contient en moyenne de 4000 ppm d'argent (Pérez Macías, 1997 ; Craddock, 2014).

²⁵⁰ Il est courant que les artefacts protohistoriques en argent contiennent encore 0,1 à 1,5 % de plomb (Stos-Gale, 2001). Ce plomb peut être issu du gisement même et être lié à une mauvaise séparation du plomb et de l'argent mais il peut également être exogène.

du plomb de l'étain soit généralement²⁵¹ masquée par un simple alliage avec le cuivre (Pernicka *et al.*, 1990 ; Begemann *et al.*, 1999 ; Liu *et al.*, 2018).

Cependant, si l'ajout d'étain n'influe pas le traçage de provenance du cuivre, l'ajout de plomb comme élément d'alliage dans les bronzes ne permet pas de déterminer la source du cuivre contenu dans l'artefact car la signature du plomb masque alors complètement celle du minerai de cuivre. Seule la provenance du plomb peut alors être reconnue (Begemann *et al.*, 2001).

Les toutes premières études de traçage de provenance par isotopie du plomb ont concerné des artefacts en plomb (Grögler *et al.*, 1966 ; Brill et Wampler, 1967) mais le plomb est un métal ayant suscité assez peu d'intérêt par la suite. Ce manque d'intérêt pourrait s'expliquer en partie par le fait que peu d'artefacts en plomb circulent au début de la Protohistoire mais n'est en rien lié à des difficultés d'analyse.

II/3 De nombreuses limites à la détermination des provenances

Il existe des limites au traçage de provenance par isotopie du plomb. Deux d'entre elles sont régulièrement identifiées et reprises dans quasiment toutes les publications (voir notamment Gale et Stos-Gale, 1991 ; Yener *et al.*, 1991 ; Budd *et al.* 1993 ; Baron et Coustures 2018 ; Pollard et Bray 2018 ; Eshel *et al.*, 2019 ou encore Killick *et al.*, 2020) :

- (i) Les signatures de certaines régions sont trop proches pour être individualisées ;
- (ii) Les artefacts peuvent avoir fait l'objet de recyclages et/ou être issus du mélange de minerais provenant de plusieurs gisements.

Cependant, peu d'études abordent de manière exhaustive les limites inhérentes au traçage de sources alors même que les deux limites évoquées sont loin d'être les seules.

II/3.a Problèmes liées à l'histoire de l'artefact

Des mélanges peuvent intervenir lors de la métallurgie d'extraction

Des minerais issus de gisements différents peuvent être mélangés et fondus dans un même réacteur. Cela peut être le cas si un même atelier a centralisé la fonte de minerais de plusieurs mines voisines comme cela s'est produit à Chypre (Knapp *et al.*? 1990 ; Knapp *et al.*, 2001), à Bir Nasb dans le Sinaï égyptien (Tallet *et al.*, 2011), sur le site israélien de Timna (Luria, 2021) et dans certains sites du Tyrol autrichien (Pernicka *et al.*, 2016).

Des ajouts de minéraux extérieurs peuvent également viser à optimiser les processus métallurgiques et la récupération des métaux. Ce sont des fondants qui peuvent correspondre à des éléments de gangue²⁵² et donc provenir du même gisement que le reste des minéraux fondus. Leur signature isotopique est dans ce cas supposée identique à celle des minéraux fondus. En revanche, si des minerais exogènes sont utilisés comme fondants, leur signature sera celle d'un autre gisement. Des cas de fondants issus de formations géologiques différentes sont par exemple connus à Saint-Véran (France)

²⁵¹ Il pourrait cependant y avoir une très rare exception où la signature du plomb contenu dans des bronzes correspondrait à celle de la cassitérite et non à des minerais de cuivre. Cela pourrait être théoriquement le cas si un minerai de cuivre possédant une teneur en plomb exceptionnellement faible et n'étant quasiment pas radiogénique serait allié à de l'étain possédant un plomb hautement radiogénique (Molofsky *et al.*, 2014).

²⁵² L'ajout de silice sous forme de quartz permet de séparer efficacement le fer du cuivre dans le cas de la métallurgie des sulfures de cuivre tels que la chalcopryrite.

où de la riébeckite a été utilisée pour faciliter l'extraction du cuivre des bornites (Barge, 1997 ; Carozza *et al.*, 2008 ; Bourgarit *et al.*, 2010) mais aussi dans le district de Faynan (Jordanie) où du manganèse a été ajouté pour faciliter la récupération du cuivre (Shalev *et al.*, 2006).

Peu d'études ont cherché à définir si l'ajout de fondants extérieurs modifie la signature isotopique des scories dans lesquelles se fixent les fondants. Seule une étude ancienne de Goucher *et al.* (1976) indique que la signature isotopique des scories correspondrait alors à celle d'un mélange de sources. Il est en revanche certain que la prise en compte de scories en tant que référentiel dans les bases de données de signature de minerais peut s'avérer problématique si la signature de la scorie diffère de celle du métal obtenu. Vérifier que la signature des scories est similaire à celle du métal produit demanderait d'analyser les billes de cuivre métallique présentes dans les scories ce qui semble très complexe en raison de la taille de ces billes.

Cas d'étude : les minerais de l'atelier du Planet

Un exemple d'étude permettant de souligner combien il est important de caractériser des minerais archéologiques concerne l'atelier néolithique (~2900-2500 av. J.-C.) du Planet (commune de Fayet, Aveyron). Les minerais retrouvés dans les fosses de l'atelier tout comme les scories y indiquent la fonte de deux types de minéraux :

- (v) Des minerais de plomb-cuivre : des bournonites (PbCuSbS_3) (et sa forme altérée : des bindheimites) ;
- (vi) Des tétraédrites ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13} \pm \text{Ag}$) et des minéraux de cuivre altérés (malachites et azurites).

Les expérimentations menées sur site montrent qu'une ségrégation du cuivre et du plomb se produit à des températures de moins de 1000 °C : le plomb métal se sépare alors du cuivre piégé dans une scorie. L'atelier a ainsi certainement pu produire (i) du plomb et/ou du plomb-cuivre (comme le témoignent un lingot double trouvé et des artefacts en cuivre et plomb) mais encore (ii) des alliages cuivre-antimoine riches en argent²⁵³.

Les deux types minerais fondus ont été identifiés dans plusieurs gisements distants de moins de 5 km de l'atelier et des maillets en pierre y ont été découverts. Nos prospections ont permis de montrer que les bournonites et les tétraédrites sont associées à deux types de gisements distincts (Tableau 27).

<u>Minéralisations permienes</u>	<u>Minéralisations de la transgression triasique</u>
<p>Ces minéralisations sont incluses dans un réseau de filonnets à quartz saccharoïde (\pmbarytine), présentant azurite automorphe + tétraédrites + malachite, rarement bournonite et chalcopryrite et exceptionnellement cinabre.</p> <p>Elles sont encaissées dans une dolomie bréchique (parfois rubanée) d'âge cambrien inférieur. Ces faciès bréchiques, sont disposés en couloirs déterminés par la tectonique transverse N150 produisant un contrôle net des minéralisations.</p>	<p>Ces minéralisations se caractérisent par des fractures recoupant les carbonates cambriens et sont agrandies par dissolution dans lesquelles des siltites se mettent en place. La paragenèse se caractérise par de la barytine + quartz bipyramidés + bournonite (\pm cuivres gris argentifères, chalcopryrite, malachite et cuprite).</p>

Tableau 27 : Courte description des deux épisodes de minéralisation à l'origine des deux types de gisements dont les minerais ont été retrouvés sur le site du Planet (d'après Milesi, 1982 et nos observations de terrain).

²⁵³ Si aucun artefact de cette composition n'a été retrouvé sur site, des analyses pXRF menées en 2021 et 2022 sur des artefacts de la région a permis de préciser que de nombreux artefacts chalcolithiques possèdent un assemblage à cuivre-antimoine-argent-plomb compatible avec une origine du Planet ou du district de Cabrières.

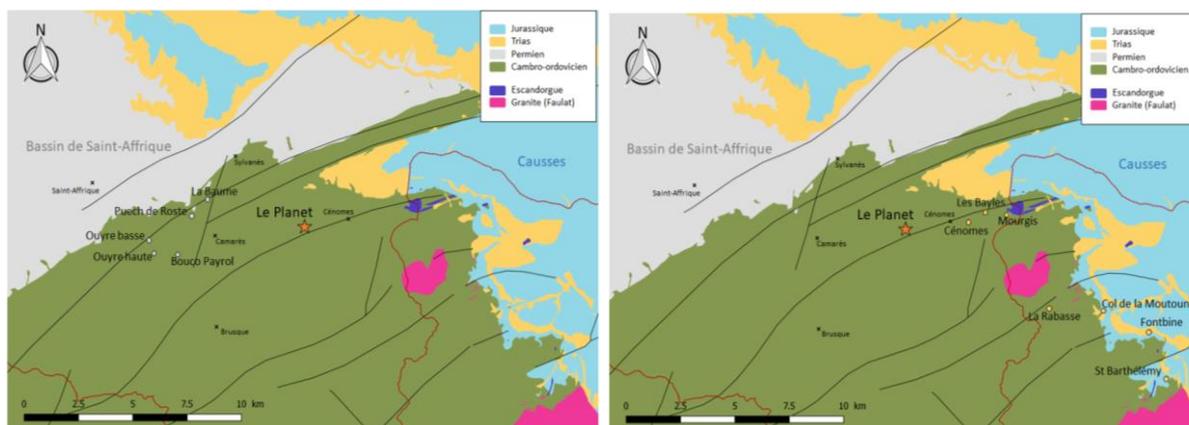


Figure 166 : Carte des gisements analysés : à gauche, minéralisations de la couverture permienne (points blancs) ; à droite, minéralisations en lien avec la transgression triasique (points jaunes). Source : Tomczyk 2020.

Nous avons analysé des minerais issus de ces deux types de gisements en complément des minerais et des scories issues de la fouille de l’atelier (Figure 166).

Si peu d’analyses isotopiques du plomb ont été menées sur les minerais « géologiques », nos premiers résultats permettent d’émettre les premières hypothèses (Figure 167). Tout d’abord, les signatures des gisements de bourmonites et de tétraédrites sont très proches mais les rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des bourmonites semblent sensiblement plus élevés que ceux des tétraédrites. Ensuite, les signatures des gisements ne correspondent pas à celles des matériaux archéologiques : les matériaux archéologiques possèdent des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ beaucoup plus faibles que les minerais échantillonnés dans les filons encore en place. Finalement, les minerais archéologiques, les scories et le lingot de plomb présentent des signatures très homogènes (à l’exception d’une bourmonite archéologique). La similarité des signatures indiquerait que les matériaux archéologiques plombifères et cuprifères sont issus d’un même minerai, probablement issus d’un même gisement au vu de la similarité des signatures isotopiques des bourmonites et des tétraédrites archéologiques.

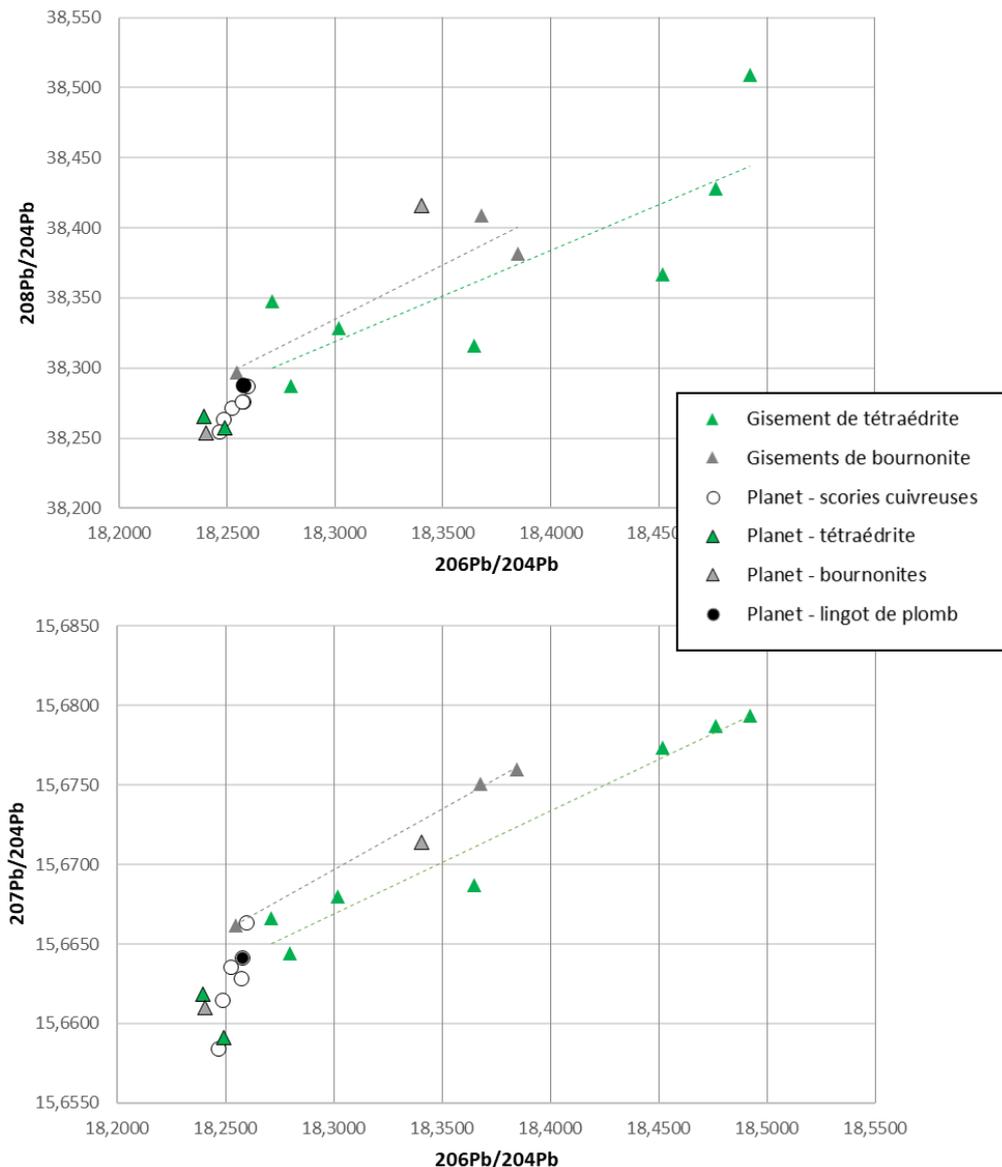


Figure 167 : Rapports isotopiques du plomb mesurés dans le cadre du PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie (financement conjoint PCR et bourse de mobilité Paris 1).

Le gisement d'origine des minerais fondus au Planet n'a pas encore été identifié et doit être recherché, bien qu'il puisse avoir disparu suite à une exploitation complète. Si nous nous étions basés uniquement sur les minerais géologiques analysés, nous n'aurions pas obtenu une signature correspondant à celle de l'exploitation néolithique. En outre, nous aurions probablement conclu que les minerais archéologiques provenaient de deux gisements distincts et représentaient un mélange, car à ce jour, les bournonites et les tétraédrites n'ont pas été identifiées dans un même gisement.

Dans des perspectives archéologiques, il est donc important de ne pas analyser que les minerais encore en place dans les mines mais d'analyser également des minerais en contexte de haldes, d'ateliers de minéralurgie et éventuellement d'ateliers de métallurgie extractive.

Certaines minéralisations ont pu être complètement exploitées et il n'est donc pas possible d'en obtenir des signatures autrement que de par l'analyse de minerais découverts en contexte de halde ou d'atelier. Par exemple, les mines de Cartagena-La Unión dans le sud-est de la péninsule Ibérique ont été exploitées depuis la Protohistoire mais des portions importantes des ouvrages miniers anciens ont

disparu du fait d'une exploitation intensive au XXe siècle (Rico *et al.*, 2009). Les filons encore en place échantillonnés par Baron *et al.* (2017) possèdent des signatures différentes des minerais retrouvés en contexte archéologique (les minerais étaient contenus dans des cuves de lavage découvertes dans le district minier). Ces minerais sont probablement plus caractéristiques des minéralisations exploitées à la période antique que les minerais encore en place.

Du plomb exogène peut être allié au cuivre produit

Comme nous l'avons écrit précédemment, si l'ajout d'étain ne modifie pas la signature isotopique du plomb du cuivre, l'ajout de plomb exogène modifie la signature de ce dernier. Le gisement qui sera tracé par les isotopes sera alors le gisement de plomb et non celui de cuivre. Un exemple intéressant concerne de nombreux artefacts sardes. Le cuivre qui les compose est supposément issu de lingots de cuivre de type peau de bœuf présentant, dans leur immense majorité, une provenance chypriote. Cependant, certains de ces lingots possèdent la signature isotopique de gisements sardes car du plomb de source locale est ajouté comme élément d'alliage (Begemann *et al.*, 2001).

Néanmoins, comme souligné par Kassianidou et Knapp (2005), la présence de plomb n'empêche pas certains auteurs de proposer de rechercher la source du cuivre d'objets contenant pourtant jusqu'à 20 % de plomb. Or, à des teneurs aussi importantes (largement supérieures à 2 %), il est certain que ce n'est pas le gisement de cuivre qui est identifié mais bien celui de plomb.

L'analyse géochimique des artefacts s'avère donc un prérequis nécessaire pour déterminer quel est le métal dont la provenance pourra être recherchée.

Le recyclage : la possible seconde vie des artefacts

Un dernier élément pouvant intervenir au cours de la vie de l'artefact est son possible recyclage. Un objet cassé peut être réparé ou peut être fondu pour élaborer un nouvel artefact. Ces deux possibilités sont dénommées par Delfino (2014) sous les termes de :

- Recyclage total qui implique une refonte pour obtenir un nouvel objet ;
- Recyclage partiel qui correspond au travail « à chaud », ou mécanique, d'un artefact pour le réparer.

Si l'artefact est réparé avec du métal identique à celui qui le compose ou fondu avec du métal de même provenance, la signature isotopique du plomb de l'artefact obtenu sera théoriquement la même que celle de l'artefact d'origine. Cependant, si du métal de source différente est impliqué, la signature isotopique du plomb ne sera pas celle d'un district minier mais d'un mélange (Boni *et al.*, 2000). Ce mélange peut ne correspondre à la signature d'aucun gisement connu ou présenter des similitudes avec une région minière dont aucun des métaux le composant n'est extrait. Dans l'état actuel des connaissances, ces mélanges ne sont pas encore clairement identifiables²⁵⁴.

De rares cas de mélanges ont néanmoins pu être mis en évidence dans le Levant pour des dépôts d'artefacts en argent contenus dans des céramiques (Eshel *et al.*, 2019 b ; Wood *et al.*, 2020). Les isotopes du plomb des fragments en argent contenus dans une même céramique s'alignent alors parfaitement entre deux pôles constitués par les signatures de la péninsule Ibérique et des mines du Laurion (Figure 168).

²⁵⁴ Des essais par Longman *et al.* (2018) sont à signaler mais sont difficiles à mettre en pratique car ils demandent de présupposer des régions impliquées dans la composition du mélange.

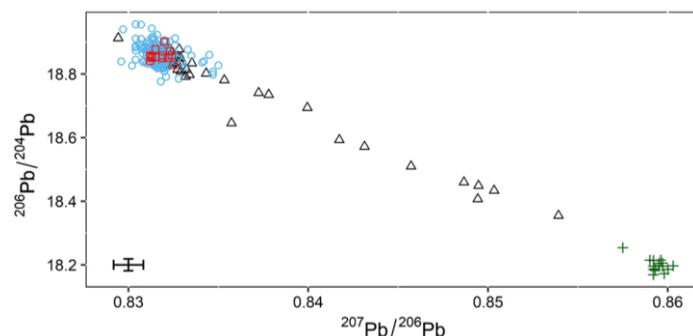


Figure 168 : Rapports isotopiques du plomb du dépôt d'argent de Miqne-Ekron (triangles) et de monnaies athéniennes (carrés rouges). Les signatures de Miqne-Ekron s'alignent le long d'un axe reliant les signatures des minerais du Laurion (cercles bleus) et de la Pyrite Belt ibérique (croix vertes). Source : Wood et al., 2020.

Les compositions élémentaires des artefacts en cuivre pourraient également permettre de supposer des phénomènes de refonte. Ces hypothèses se basent sur le fait que la teneur en argent d'un cuivre refondu n'est pas modifiée alors que sa teneur en arsenic et antimoine diminue car ses éléments se vaporisent (cf II/1.b). Les études utilisant ce raisonnement sont néanmoins rares car elles demandent de comparer de nombreux artefacts issus d'une même mine or, il est complexe d'établir un lien clair entre un artefact et la mine dont est extrait le cuivre qui le compose.

Pour illustrer cette difficulté d'analyse, nous pouvons citer l'étude de Bray et Pollard (2012). Les auteurs ont sélectionné des artefacts de l'âge du Bronze découverts en Irlande qu'ils supposent tous issus du grand district minier de Ross Island (ils considèrent ces mines comme étant les seules en activité sur l'île). Les auteurs observent une baisse significative des teneurs en arsenic et antimoine des artefacts mais des teneurs en argent constantes au cours du temps (Figure 169) ce qu'ils interprètent comme la preuve que les artefacts en cuivre ont été refondus à plusieurs reprises au cours des cinq siècles suivant la fermeture de la mine.

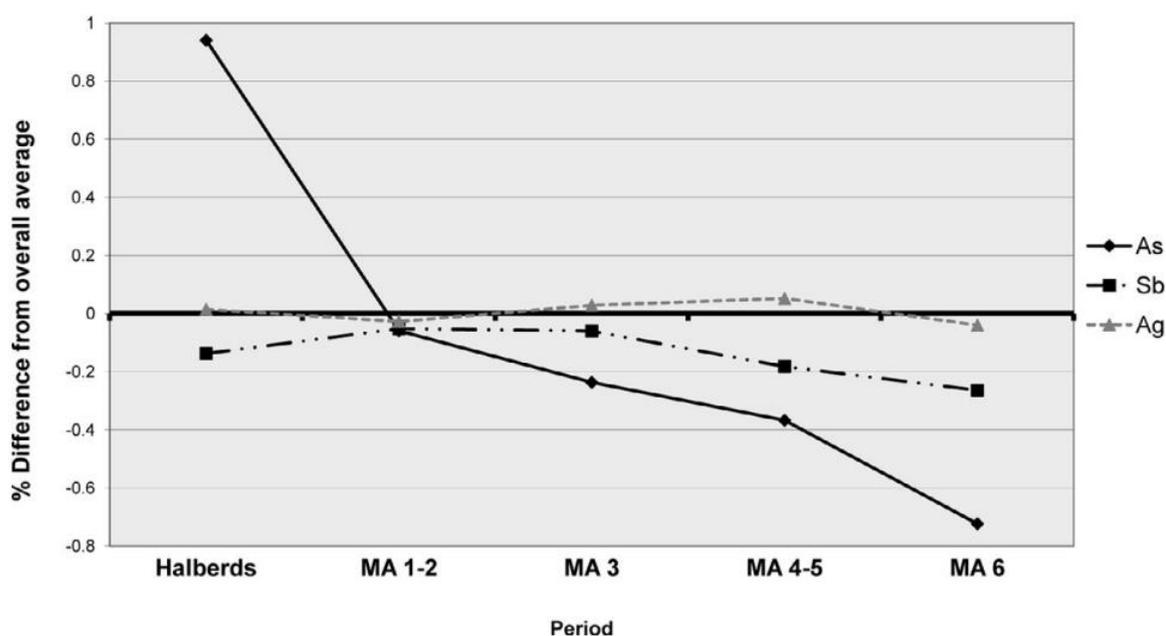


Figure 169 : Évolution par période des teneurs en arsenic (As), antimoine (Sb), et argent (Ag) d'artefacts supposément obtenus à partir de cuivre de Ross Island. La quantité de métal recyclé est supposée croissante au cours du temps depuis le MA1-2 (2500-2200 av. J.-C.) jusqu'au MA6 (1700-1500 av. J.-C.). Source : Bray et Pollard (2012).

Ce résultat peut cependant être critiqué à de nombreux égards. Tout d'abord, cette étude présente la faiblesse de ne pas considérer que les artefacts puissent avoir été produits à partir d'autres mines que celle considérée alors que :

- Les mélanges de cuivres gris de différentes mines peuvent produire des baisses des teneurs en arsenic et antimoine sans que le nombre de recyclages ne soit important (Pernicka *et al.*, 2016) ;
- D'autres mines sont connues dans le sud de l'Irlande à cette période.

De plus, la diminution des teneurs en arsenic et antimoine (et le maintien du taux d'argent) peut être liée à la réalisation de grillage lors de la métallurgie extractive, pratique courante en Europe dès 2000 av. J.-C. La diminution des teneurs en impuretés pourrait donc être volontaire (et être associée à des processus de métallurgie extractive) et non pas être liée à des recyclages. Ainsi, si les analyses en composition élémentaires permettent de formuler des hypothèses, elles manquent dans ce cas de contexte archéologique et l'hypothèse d'une provenance de Ross Island aurait demandé d'être validée par des analyses isotopiques du plomb.

Il en va de même pour une seconde étude portant sur des cuivres à arsenic et antimoine ibériques et d'Europe occidentale du Bronze ancien. Cette étude également conduite par Peter Bray (Bray *et al.*, 2015) indique que les recyclages d'artefacts seraient plus importants à mesure que leur lieu de découverte s'éloigne de leur zone source théorique de production, dans ce cas la péninsule Ibérique. Selon les auteurs, les artefacts découverts en France seraient issus de refontes de cuivres ibériques. Cependant, ces hypothèses ne s'appuient que sur des analyses de composition élémentaires et demanderaient d'être confirmées par des analyses isotopiques du plomb. La question, à ce stade, doit rester ouverte.

Les recyclages sont donc encore extrêmement complexes à identifier formellement même en disposant de compositions élémentaires ou d'analyses isotopiques précises et nombreuses pour une même région. Réaliser de manière systématique ces deux types d'analyses permettrait de croiser les informations et de peut-être confirmer la présence de recyclages.

Des recyclages à partir de 1 300 av. J.-C. ?

L'absence d'études systématiques à grandes échelles conduit au fait que la question de la présence de recyclages divise la communauté scientifique. Comme déjà souligné par Bray (2022), de nombreux chercheurs spécialistes des analyses isotopiques du plomb et des compositions élémentaires ont minimisé la possibilité de recyclages. Par exemple, Pernicka (2014) proposait que dans les économies en expansion la quantité de métal frais serait suffisante pour qu'aucun recyclage n'ait lieu. Il supposait alors que le recyclage n'apparaîtrait que lors de déclin importants de production et serait donc un phénomène assez négligeable durant l'âge du Bronze et ne serait conséquent qu'à partir de la fin de l'Empire romain. De manière plus surprenante encore, Gale et Stos-Gale (2000), se référant à Renfrew (1972), proposent que le recyclage n'aurait probablement pas été une pratique courante à tout moment dans la mer Égée, où il a toujours été courant d'enterrer les objets métalliques avec les morts.

Cependant, certaines études récentes envisagent la présence de recyclages en Europe occidentale à partir de 1300 av. J.-C. (Tableau 28).

PAYS	RÉFÉRENCE	COMMENTAIRE
France	Gachina <i>et al.</i> , 2008	La présence d'impuretés dans un lingot de cuivre indiquerait qu'il est issu du recyclage d'artefact a été découvert en Charente-Maritime
Portugal	Figueiredo <i>et al.</i> , 2010	Les nombreuses impuretés des bronzes du site de Baiões témoigneraient de recyclages
Grèce	Jung et Mehofer, 2013	Les analyses de compositions élémentaires montrent qu'une partie des artefacts d'origine locale seraient issus de recyclages
	Tzachili, 2008	Les faibles teneurs en étain de certains artefacts indiqueraient qu'ils sont issus de recyclages
Autriche	Mödlinger <i>et al.</i> , 2021	Les données géochimiques et la découverte de fragments de bronze prêts à être recyclés indiqueraient que les productions locales ont été refondues avec des artefacts issus de Slovaquie
Suisse	Pernicka, 2014	Des morceaux semi-fondus d'objets métalliques ont été identifiés dans des lingots plano-convexes
	Rychner et Kläntzchi, 1995 (p.62)	La teneur en plomb des bronzes augmente progressivement d'est en ouest : du plomb exogène serait apporté par le recyclage des bronzes au plomb provenant de l'ouest
	Jennings, 2014	Des motifs décoratifs atypiques observés sur des rasoirs indiquent qu'ils ont été découpés dans des anneaux de bras ou de jambe : ces rasoirs à anneaux » sont issus de la récupération d'objets abîmés (recyclage partiel)
Chypre	Havlíček et Kuča, 2017	Des déchets de bronzes destinés à être refondus et réutilisés pour fabriquer des artefacts ont été découverts
Royaume Uni	Fregni 2014, (p. 101) ; Wiseman, 2018	Des fragments de bronzes ont été découverts dans des dépôts, leur taille semble ajustée pour rentrer facilement dans un creuset et les fragments ne peuvent pas être réassemblés
Hongrie	Tarbay, 2016	Des fragments d'artefacts divers (y compris des lingots) défectueux, usés, voire non affinés et destinés à être recyclés ont été découverts dans plusieurs sites en Hongrie
Pologne	Nowak <i>et al.</i> , 2023	Un dépôt de bronzier supposément destiné à être fondu de par sa fragmentation a été découvert à Paszowice
Espagne	Montero Ruiz <i>et al.</i> , 2017	Des dagues façonnées à partir de dagues initiales plus grandes ont été identifiées en Catalogne (recyclage partiel)
Scandinavie	Johannsen, 2016	Des réparations d'objets ont été réalisées avec du bronze dont la composition est différente du bronze initial (recyclage partiel)

Tableau 28 : Liste non exhaustive de recyclages d'artefact cuivreux avérés au Bronze final. Ces recyclages concernent en majorité la totalité des artefacts (impliquant une refonte pour obtenir un nouvel objet) mais les deux derniers ne sont cependant que partiels (impliquant le travail « à chaud », ou mécanique, d'un artefact pour le réparer ou en créer un nouveau).

Les études citées ne croisent que rarement plusieurs types d'informations mais leur nombre important semble souligner la présence de recyclage d'artefacts cuivreux dans presque toutes les régions d'Europe à la fin de l'âge du Bronze.

Il est complexe de définir quel était le pourcentage des artefacts recyclés. La présence de dépôts de nombreux fragments d'artefacts brisés puis enterrés sont très majoritairement interprétés en France comme des dépôts votifs mais sont aussi régulièrement interprétés comme des « *scrap hoard* » destinés à être refondus dans la littérature anglo-saxonne (voir notamment la synthèse de (Dietrich, 2014))²⁵⁵. En admettant l'hypothèse que ces fragments étaient destinés à être fondus, Delfino (2014) mais aussi Huth (2000) supposent qu'ils auraient pu faire l'objet d'échanges sous cette forme. Toujours en supposant qu'une majorité de ces dépôts étaient destinés à être fondus, Wiseman (2018) estime quant à lui, des

²⁵⁵ Dans les modèles anglo-saxons seuls les dépôts d'artefacts non brisés sont considérés comme étant votifs (Brück, 2016).

taux de recyclages de 85 à 95% des artefacts en circulation dans le sud de la Grande-Bretagne dès 1500 av. J.-C. (soit à une période où les mines du Pays de Galles sont largement exploitées)²⁵⁶.

Ainsi, si ces hypothèses sont sujettes à discussion et, s'il reste impossible de déterminer précisément les quantités d'artefacts recyclés à la fin de l'âge du Bronze, il est en revanche indéniable que ce phénomène a existé à l'échelle de l'Europe.

Des recyclages aux périodes plus anciennes ?

La question de l'importance du recyclage pour les périodes plus anciennes est plus complexe à aborder (Ling *et al.*, 2019). Ceci s'explique par la difficulté d'identifier formellement le recyclage. Comme l'ont souligné Needham *et al.* (1989), deux raisons pourraient expliquer ce fait : (i) aucun « *scrap hoard* » n'a été identifié aux périodes anciennes²⁵⁷ et (ii) le recyclage est difficile à identifier s'il concerne des artefacts ayant pour origine une même région. Par exemple, dans la péninsule Ibérique, riche en minerais de cuivre exploités au Chalcolithique, si Amzallag (2009) indique que des recyclages sont courants dès le III^e millénaire av. J.-C., pour Brandherm *et al.* (2022) il n'y a pas de recyclages dans cette région à cette période. Cette contradiction vient probablement de la difficulté d'identifier du recyclage à échelle locale dans les régions métallifères avant la fin de l'âge du Bronze.

La présence de recyclages est cependant plus facilement mise en évidence dans les régions non métallifères ayant des sources d'approvisionnement variées. Par exemple, la composition d'un lingot du Bronze moyen découvert sur l'île de Malte témoigne d'un mélange de sources (Tanasi *et al.*, 2019). Par ailleurs, la composition d'artefacts du Bronze ancien découverts dans le Valais Suisse pourrait correspondre à des mélanges de matériel recyclé (Cattin *et al.*, 2011). De plus, une étude portant sur des artefacts cuivreux scandinaves datés de 2000 à 1700 av. J.-C. indique la présence de recyclages de métaux issus de sources variées tant par leur composition élémentaire que par leur signature isotopique du plomb (Nørgaard *et al.*, 2019). Les études de Bray et Pollard (2012) et de Bray *et al.* (2015) précédemment évoquées indiqueraient également la présence de recyclages au début de l'âge du Bronze mais cette hypothèse demanderait à être confirmée par des analyses isotopiques du plomb.

Il pourrait paraître logique de supposer que du recyclage se produirait de manière moins courante avant le Bronze moyen qu'après ce dernier car au Néolithique/Chalcolithique, les bronzes sont arséniés (ils ne contiennent pas de l'étain mais de l'arsenic et/ou de l'antimoine). Or, l'arsenic et l'antimoine sont des éléments volatils qui vont partir sous forme de gaz lors de refontes, ce qui rend complexe le recyclage de ces alliages car il implique des baisses des teneurs en arsenic et antimoine. L'étain en revanche reste associé au cuivre : la refonte d'un artefact en bronze n'entraîne pas de pertes d'étain. L'adoption du bronze à l'étain au Bronze moyen pourrait donc être concomitante d'une augmentation du recyclage.

Outre le fait d'obtenir un nouvel objet à partir d'un artefact cassé, des recyclages pourraient avoir lieu lors de ruptures de circuits d'échanges.

²⁵⁶ Il estime que tous les objets en bronze éligibles étaient collectés, puis brisés au hasard, puis que des fragments étaient prélevés au hasard dans la masse de métal, avant que les artefacts ne soient temporairement enterrés dans l'intention de le récupérer et de le recycler ultérieurement

²⁵⁷ Ce propos a été repris de la publication évoquée mais mériterait d'être pondéré : en Italie un dépôt de bronzier a été daté de 1750-1600 BP (De Marinis, 1997).

Du recyclage lors des modifications des circuits d'échanges commerciaux ?

Les hypothèses les plus couramment avancées proposent que les recyclages interviennent lors de changements importants dans les circuits d'approvisionnement. La difficulté de se fournir en cuivre et/ou en bronze conduirait à la refonte massive d'objets déjà existants. Delfino (2014) propose ainsi qu'entre 1600 et 1400 av. J.-C. en Italie du Nord peu de recyclages aient lieu, car l'étain contenu dans les bronzes proviendrait des très riches gisements de la péninsule Ibérique et non du nord de l'Italie ; ceci expliquerait que le recyclage n'était pas nécessaire à cette période car l'étain ne ferait pas défaut²⁵⁸.

De plus, Miniaci (2020) lie des remises en circulation importantes d'artefacts en Égypte entre 1710 et 1550 av. J.-C. avec l'effondrement du pouvoir central égyptien à la fin du Moyen Empire. L'auteur suggère que cet effondrement aurait pu entraîner la réutilisation et donc le recyclage d'objets égyptiens plus anciens. Ces observations se limitent toutefois à trois sites (Byblos, Ebla et Kerma), et les constatations concernant l'effacement des inscriptions suivies de nouvelles gravures ne concernent que des artefacts en métaux précieux (or et argent) ainsi que des scarabées en améthyste. Il n'est donc pas certain que le recyclage affecte également des artefacts en alliage cuivreux.

Ces hypothèses peuvent être questionnées à nouveau : il n'est pas avéré que des changements de circuits d'échanges puissent entraîner des pénuries. Pour preuve, Melheim *et al.* (2018) soulignent qu'au Danemark des changements dans l'approvisionnement en métaux entre 1600 et 1100 av. J.-C. n'ont pas induit une augmentation du recyclage. Ainsi, des changements socio-économiques n'impliqueraient pas nécessairement des recyclages plus importants.

Une dimension culturelle et/ou sociale ?

Le recyclage aurait pu revêtir un caractère rituel dans certaines régions. Cela a été probablement le cas pour la culture minoenne de Chypre (1300-1000 av. J.-C.) où des quantités importantes de débris métalliques destinés à être refondus ont été découvertes dans les temples à Kition (Karageorghis et Kassianidou, 1999).

Cependant, d'autres auteurs supposent que l'utilisation d'artefacts issus de recyclages (et dont la composition des alliages serait moins contrôlée) serait limitée à des productions pour des classes les plus pauvres des populations et ne concerneraient que de façon limitée les objets destinés aux élites (Woodward, 1985). Cela semble démontré à l'âge du Bronze en Chine où les élites auraient eu accès à des alliages issus de métal non recyclés alors que les classes inférieures auraient eu accès uniquement à des métaux recyclés (Liu *et al.*, 2020).

II/3.b Limites liées aux signatures de minerais

Similarité des signatures (effet d'*overlaps*)

La critique la plus souvent formulée au sujet des études de provenance utilisant l'isotopie du plomb est liée au fait que certaines zones minières géographiquement éloignées peuvent présenter des signatures isotopiques du plomb similaires. Cette similarité de signatures isotopiques est dénommée sous le terme d'*overlaps* dans la littérature anglophone. Ce phénomène d'*overlaps* a été identifié dès le début des années 90 alors que les analyses de signatures de minerais se multipliaient. Les premières

²⁵⁸ Cette affirmation tient en une ligne, elle n'est pas développée ou appuyée par des analyses et ne s'appuie sur aucune référence.

similitudes signalées ont alors concerné les gisements de l'est de la Méditerranée²⁵⁹ (Figure 170) : les signatures isotopiques du plomb des minerais des Monts Taurus (actuelle Turquie) présentent des similarités importantes avec celles des minerais chypriotes (Yener *et al.*, 1991) mais aussi avec ceux de l'Égée (Gale et Stos-Gale, 1991 ; Budd *et al.*, 1996 ; Eshel *et al.*, 2019). Il ne s'agit cependant pas des seules similitudes de signatures reconnues. En effet, les signatures des minerais des Balkans sont complexes à isoler (Blagoi, 1999) et donc à différencier des gisements de l'est des Alpes (Pernicka, 2013). Les signatures des minerais français sont également très proches de celles des minerais des îles Britanniques (Killick *et al.*, 2020). Néanmoins, l'un des *overlaps* les plus commentés concerne les gisements chypriotes et sardes (Stos-Gale *et al.*, 1997 ; Kassianidou, 2001 ; Pinarelli, 2004 ; Stos-Gale, 2011 ; Kassianidou, 2013). Cette ressemblance est telle que Budd *et al.* (1995) la décrivent comme étant impossible à surmonter par lecture graphique.

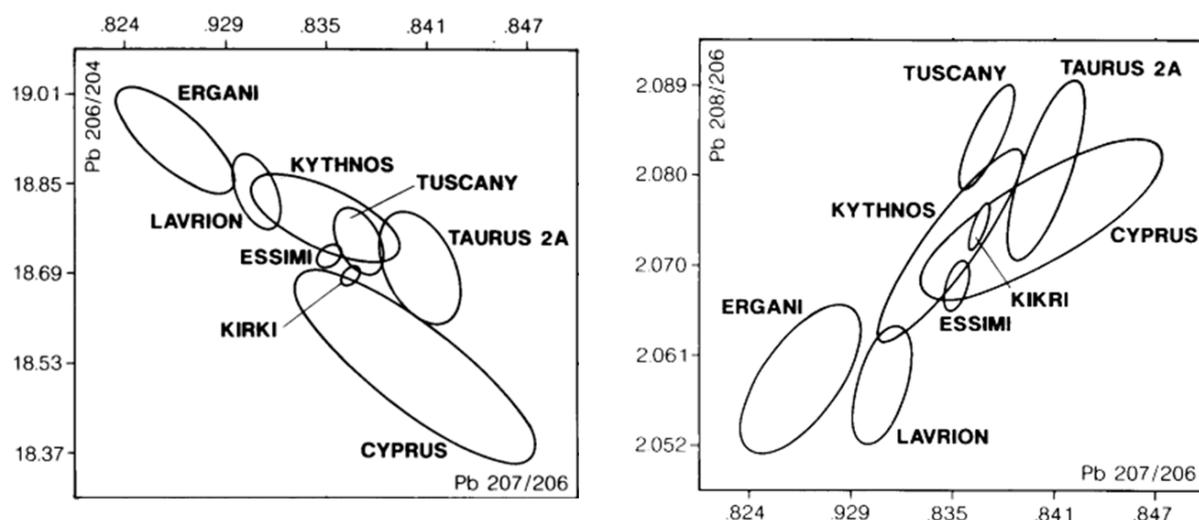


Figure 170 : Ellipsoïdes de confiance édités dans les années 90 soulignant la similarité des signatures isotopiques du plomb des minerais toscans, égéens et anatoliens. Source : Gale et Stos-Gale, 1991.

La réalisation de nouvelles analyses depuis les années 1990 n'a fait qu'accroître le nombre d'*overlaps*²⁶⁰ et rendre quasiment impossible la distinction graphique de gisements d'âge comparables. Ainsi, plusieurs milliers de gisements hercyniens possèdent un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compris dans la marge d'erreur des premières analyses isotopiques du plomb estimé à $\pm 0,1$ (Figure 171).

²⁵⁹ Ces régions ont été parmi les premières à faire l'objet d'analyses systématiques.

²⁶⁰ Il y a de plus en plus de zones géographiques qui présentent des similarités de signature.

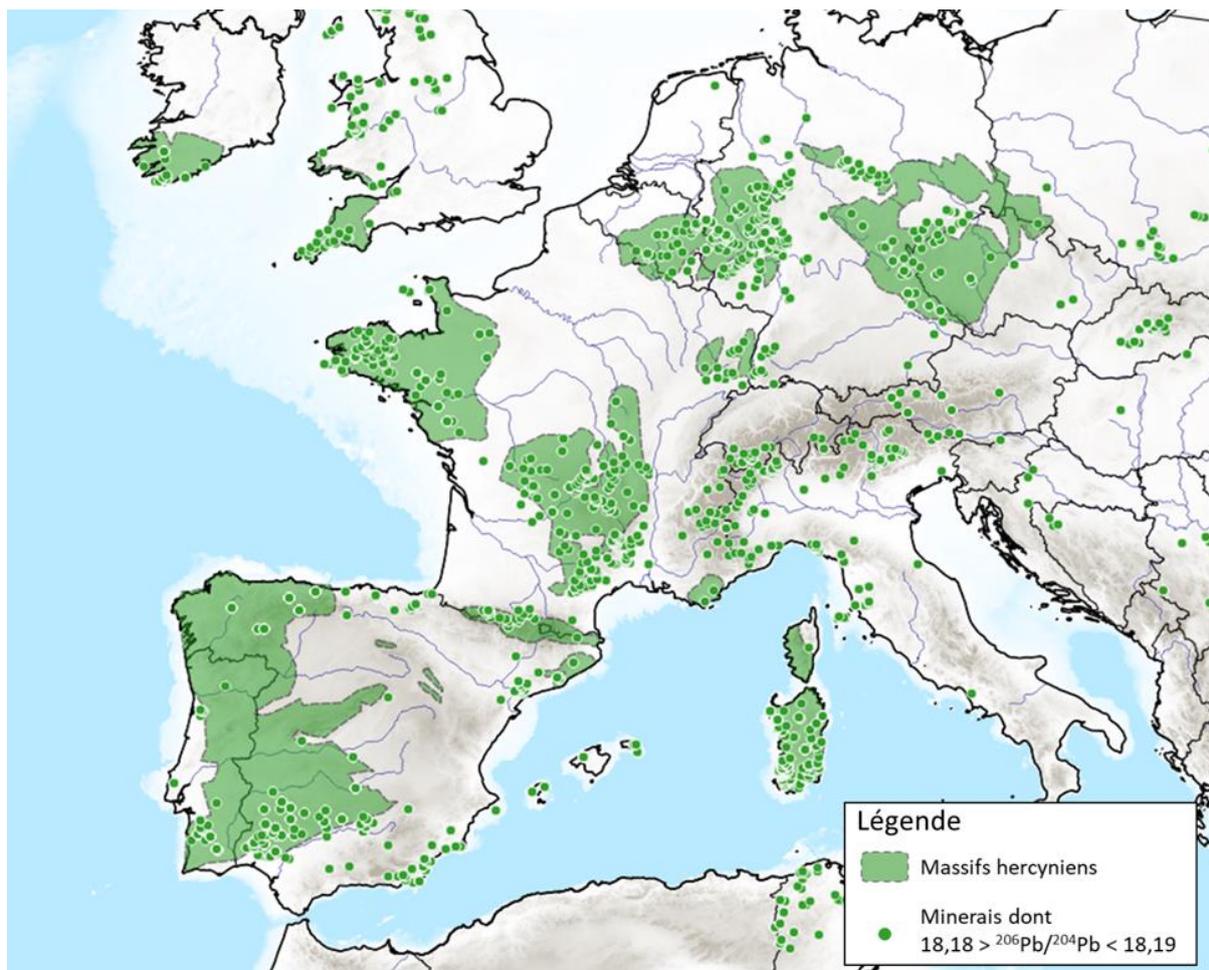


Figure 171 : Similarités des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de minerais et principaux massifs hercyniens d'Europe de l'Ouest (tracé des massifs d'après Gourcerol *et al.*, 2019 et Timón-Sánchez *et al.*, 2019).

Néanmoins, si les similarités de signatures isotopiques constituent une limite majeure pour les interprétations de provenance (dont le résultat consiste alors souvent en une liste de plusieurs régions sources probables), cette difficulté peut être estompée. Une première façon de réduire les chevauchements observés est d'améliorer la précision analytique. En effet, s'il est impossible de distinguer deux valeurs avec une mesure de faible précision, il n'est pas à exclure qu'il puisse être possible de les distinguer si la précision de la mesure augmente (Villa, 2009)²⁶¹.

Une autre solution consiste à améliorer le processus d'échantillonnage pour analyse car, comme déjà souligné par Baron et Coustures (2018), les prélèvements réalisés jusqu' alors ont été réalisés dans leur immense majorité hors contexte géologique et souvent sans perspective historique. Prendre en compte les contextes géologiques constitue certainement l'une des meilleures manières de diminuer l'étendue des groupes de nuages de points : une meilleure caractérisation des gisements à signatures hétérogènes permet de déterminer si les signatures de ces gisements se subdivisent en plusieurs groupes de signatures correspondant à plusieurs phases de minéralisation (Tomczyk *et al.*, 2021b).

²⁶¹ Deux valeurs sont statistiquement indiscernables lorsque leur différence est inférieure à la somme des incertitudes analytiques avec lesquelles elles ont été mesurées.

Des gisements aux signatures souvent hétérogènes

Il est aisé de constater que les minerais peuvent présenter des signatures hétérogènes au sein d'un district minier, voire dans le même filon. Certains types de gisements présentent naturellement des signatures isotopiques du plomb très hétérogènes. C'est le cas en particulier des gisements de type *Mississippi Valley* (Marcoux, 1986) ou encore des gisements hydrothermaux (Marcoux et Moelo, 1991) présentant plusieurs phases de minéralisations. Ils correspondent à des gisements demandant une étude géologique préalable afin de s'assurer d'obtenir tout le spectre des signatures correspondant aux diverses arrivées de fluides successives (stades de minéralisation).

Un exemple cité par Baron *et al.* (2014) est à ce titre particulièrement intéressant. Il s'agit de la minéralisation de Baia Borşa (Roumanie) dont les signatures isotopiques se divisent en deux groupes distincts reflétant l'existence de deux événements distincts de minéralisation confondus à l'échelle des chantiers miniers (Cook et Chiaradia, 1997).

Un autre exemple concerne les gisements alpins. Les analyses isotopiques réalisées par Marcoux (1986) dans les Alpes françaises et par Nimis *et al.* (2012) dans le sud du Tyrol sont accompagnées d'une étude approfondie des types de minéralisations. Ces jeux de données de signatures isotopiques présentent des répartitions distinctes en représentation bivariable mais aucune de répartition claire des signatures n'est visible si nous projetons des d'autres gisements alpins ne disposant pas de telles informations comme par exemples les analyses menées à Saint-Véran (Figure 172). Dans cette zone minière la dispersion importante des signatures s'explique par des phases de remobilisation liées à la succession de quatre phases tectoniques intenses (Ancel *et al.*, 2006). Les signatures disponibles sont très hétérogènes du fait de la complexité géologique du gisement.

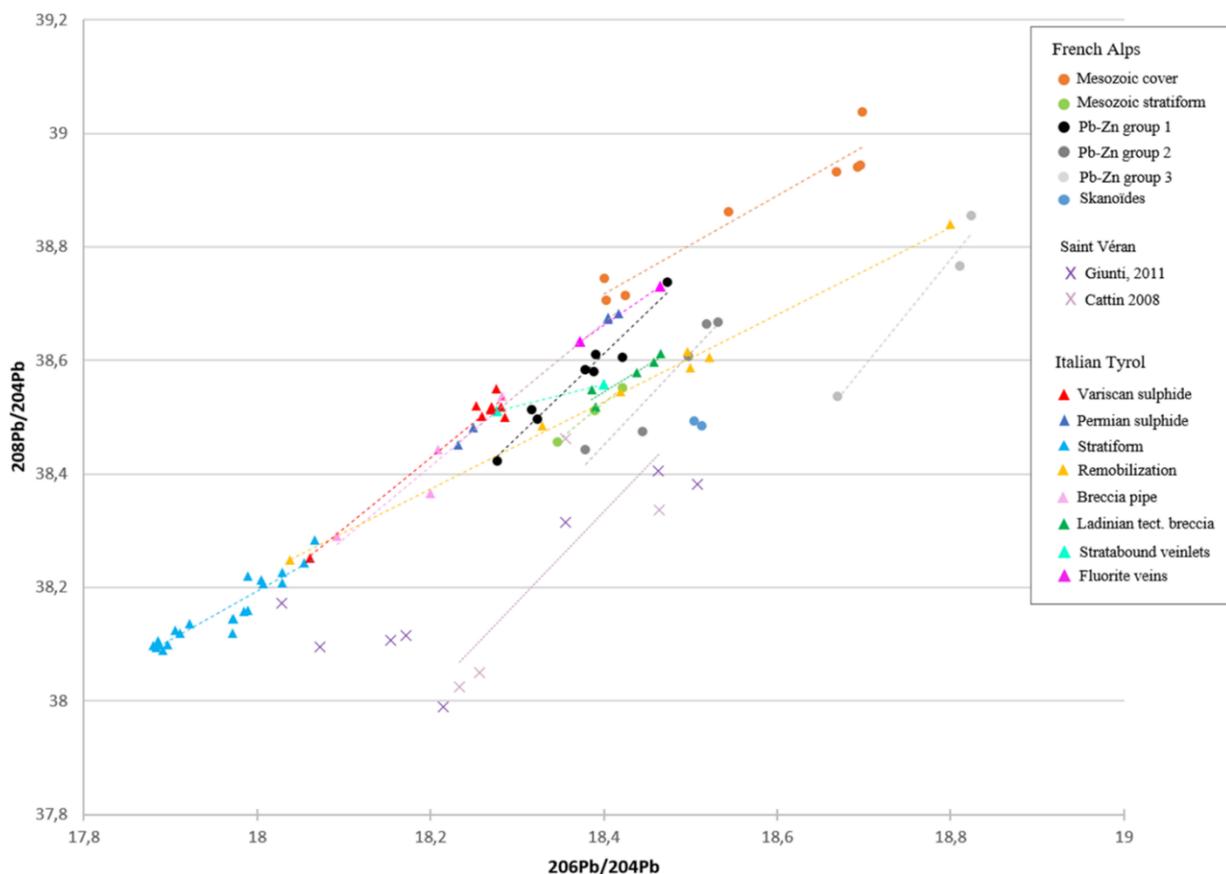


Figure 172 : Projection $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de signatures isotopiques du plomb de gisements alpin (données issues de Marcoux (1986) et de Nimis *et al.* (2012)) et de signatures acquises à Saint-Véran (données

de Cattin (2008) et de Giunti (2011)). Les signatures de Saint-Véran présentent une dispersion très importante. Source du graphique : Tomczyk et al., 2021c.

Enfin, le nombre d'analyses à effectuer par gisement n'a que rarement fait l'objet d'études. Stos-Gale et Gale (2009) recommandent de réaliser 30 à 50 analyses par mine. Ce chiffre est cependant très conséquent et seules des mines exceptionnelles (telles que les mines du Laurion ou encore celles du Mitterberg) ont fait l'objet d'autant d'analyses. Ce chiffre n'a de plus que peu de sens et, il est plus pertinent d'affirmer que le nombre d'analyses doit s'adapter aux types de gisements soit, dans l'idéal, comprendre plusieurs analyses pour chaque phase de minéralisation et plusieurs analyses de minerais et scories en contexte archéologique. Les gisements monogéniques²⁶² possèdent une très grande homogénéité isotopique, de l'ordre de 2 ‰ (Marcoux, 1986, p.282-284). Cette homogénéité se situe sous le seuil de détection analytique des spectromètres de masse (± 0.1 % pour les TIMS utilisés dans les années 80). Pour ces gisements, il est donc possible, théoriquement, d'obtenir une signature isotopique représentative avec très peu²⁶³ d'échantillon. En revanche, les gisements polygéniques²⁶⁴ se comportent différemment : chaque épisode minéralisateur peut impliquer des phénomènes d'héritages, de remobilisation et d'apport de plomb.

Le choix du nombre d'analyse isotopiques à réaliser doit donc prendre en compte la nature des gisements exploités et leur complexité. Réaliser plusieurs campagnes d'une dizaine d'analyses est alors préférable afin de s'assurer de l'homogénéité des signatures isotopiques du plomb d'un secteur minier.

II/3.c Limites liées aux protocoles analytiques

Une précision des données variable en fonction de la précision analytique des spectromètres de masse

Un autre élément jouant sur la similarité des signatures isotopiques concerne la précision de mesure avec laquelle elles ont été réalisées. En effet, l'évolution des spectromètres de masse a permis un gain de précision considérable des rapports isotopiques mesurés (White *et al.*, 2000). Le remplacement progressif dans les années 2000 des TIMS (*Thermal Ionization Mass Spectrometry*) par des MC-ICP-MS (*Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) a ainsi permis en une vingtaine d'années, d'obtenir une quantification 30 fois plus précise des rapports isotopiques : Taylor *et al.* (2015) estiment²⁶⁵ la précision du rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de $\pm 0,133\%$ via TIMS et de $\pm 0,0123\%$ avec un MC-ICP-MS *double spike* et de $\pm 0,0044\%$ avec un MC-ICP-MS *poly-spike* (modèles les plus courants à l'heure actuelle).

Cependant, les signatures isotopiques du plomb réalisées dans les années 1970-1990 semblent présenter les mêmes gammes de valeur que celles obtenues récemment et selon Baker *et al.* (2006) : les signatures obtenues par TIMS et MC-ICPMS seraient comparables. Ce fait est cependant discutable car les données acquises par MC-ICPMS :

- Sont beaucoup moins diffuses que celles acquises par TIMS ;

²⁶² Résultant d'un épisode minéralisateur unique et donc ponctuel à l'échelle des temps géologiques (amas hydrothermaux-sédimentaires ou volcano-sédimentaires par exemple).

²⁶³ 7 analyses seraient suffisantes (Tomczyk *et al.*, 2019).

²⁶⁴ Formés par la superposition d'épisodes minéralisateurs.

²⁶⁵ Ils réalisent les mesures d'un même standard sur plusieurs spectromètres.

- Sont significativement plus fortes que celles obtenues par TIMS. Le rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ semble être le plus affecté et serait significativement plus faible lorsqu'il est mesuré avec un TIMS conventionnel (Cordier *et al.*, 2016)²⁶⁶.

Un exemple permettant d'illustrer la plus forte dispersion des signatures isotopiques acquises anciennement concerne les mines, précédemment évoquées, de Cartagena-La Unión dans la province d'Alicante (Espagne). Les signatures isotopiques du plomb réalisées par de Graeser et Friedrich (1970) avec un TIMS et les analyses de Baron *et al.* (2017) par MC-ICPMS *poly-spike* suivent certes les mêmes tendances, les signatures isotopiques récentes sont beaucoup moins dispersées²⁶⁷ et globalement plus élevées (Figure 173).

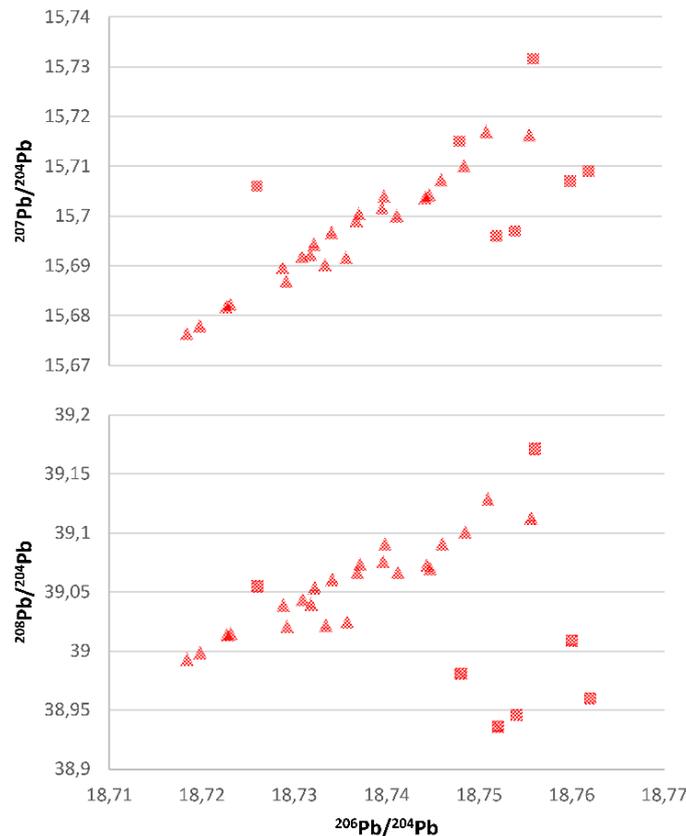


Figure 173 : Projections bivariées des rapports isotopiques du plomb des minerais de Cartagena. Les données issues de Graeser et Friedrich, 1970 (carrés rouges) sont beaucoup plus dispersées que celles de Baron *et al.*, (2017) (triangles).

Vaxevanopoulos *et al.*, (2022) observent ce même type de tendances pour les minerais du pourtour égéen : les analyses des années 1980 issues d'Oxalid et réalisées avec un TIMS suivent les mêmes tendances que les analyses MC-ICPMS récentes qui présentent l'avantage d'être moins dispersées que les analyses TIMS²⁶⁸. Une diminution conséquente des effets d'*overlaps* de signatures de régions distantes pourrait donc être obtenue par la prise en compte de données récentes dont les signatures sont plus précises.

²⁶⁶ Cette étude se base sur la (ré)analyse en MC-ICPMS de plusieurs échantillons qui avaient été analysés via TIMS par la même opératrice quelques années plus tôt. Les auteurs se sont assuré des conditions de mesure similaires et un fractionnement de masse reproductible pendant la mesure.

²⁶⁷ Ces dernières sont 20 fois plus précises que celles réalisées par Graeser et Friedrich (1970).

²⁶⁸ Ils précisent que des études à paraître confirmeraient cette même tendance pour la péninsule Ibérique.

Enfin, précisons que se développent depuis une dizaine d'années des spectromètres de masse à ablation laser (LA-ICP-MS : *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). La précision de mesure de ces deniers dépend des modèles utilisés (les abondances de chaque isotope du plomb peuvent être quantifiées par des mesures différentes²⁶⁹ ou en même temps (MC-LA-ICP-MS)). L'utilisation de ce type d'analyse devrait cependant être croissante du fait d'un prélèvement invisible à l'œil nu et de la possibilité d'acquérir une composition chimique précise et une analyse isotopique en quelques minutes, alors que les analyses isotopiques acquises par MC-ICP-MS et TIMS demandent près d'une semaine de préparation d'échantillon. Ainsi, si à ce jour très peu d'artefacts²⁷⁰ et aucun minerai n'ont été analysés par cette méthode, il se pourrait que les facilités d'analyses permises par l'ablation laser conduisent prochainement à un accroissement conséquent du nombre d'analyses réalisées.

Une précision des données dépendante du protocole analytique employé ?

La précision de la quantification de chaque isotope du plomb dépend en grande partie du type de spectromètre utilisé mais la question de possibles différences de mesures liées à la préparation des échantillons mérite d'être soulevée. En effet, beaucoup de paramètres entrent en compte dans la précision de mesure comme le protocole de préparation des échantillons mais aussi la méthode de correction du fractionnement.

La similarité des résultats obtenus a été testée par Pomiès *et al.* (1998). Ils ont mené des comparaisons entre TIMS sur des standards et des échantillons de minerais du Rio Tinto (galènes et pyrites) en envoyant les mêmes échantillons à deux laboratoires (BRGM et Université de Montpellier). Ils en ont conclu que l'écart de mesures équivaut à l'écart de signatures au sein d'un échantillon. En revanche, la question de la réplicabilité des mesures entre laboratoires dans le cas d'analyses MC-ICPMS n'a pas encore fait l'objet d'étude. Ces analyses plus précises sont certainement plus sensibles aux erreurs de manipulations qui peuvent arriver à plusieurs étapes de la préparation des échantillons. Le protocole de préparation d'échantillon ne varie cependant que très peu entre les différents laboratoires comme en témoignent les préparations pour analyses MC-ICPMS réalisées au laboratoire de Géosciences de l'Université de Padoue puis à l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Une correction du fractionnement primordiale

De plus, comme le précisent Albarède *et al.* (2020), des effets de fractionnement du ²⁰⁴Pb peuvent être liés à une mauvaise correction des abondances naturelles. Ce problème ne se pose cependant que dans le cas des mesures TIMS (Taylor *et al.*, 2015 ; Albarède *et al.*, 2020) : l'ajout de thallium en tant que moniteur de biais de masse a résolu les problèmes analytiques associés au biais de masse instrumental dans le cas d'analyses de spectrométrie de masse par MC-ICPMS (Taylor *et al.*, 2015 ; Albarède *et al.*, 2020).

²⁶⁹ Dans ce cas la précision des mesures est très mauvaise : $\pm 0,4\%$ pour le ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (McFarlane *et al.*, 2016) soit près de quatre fois supérieure à celle d'un TIMS.

²⁷⁰ Une récente étude d'artefacts découverts en Arménie par Peterson *et al.* (2016) fait à ce titre figure d'exception.

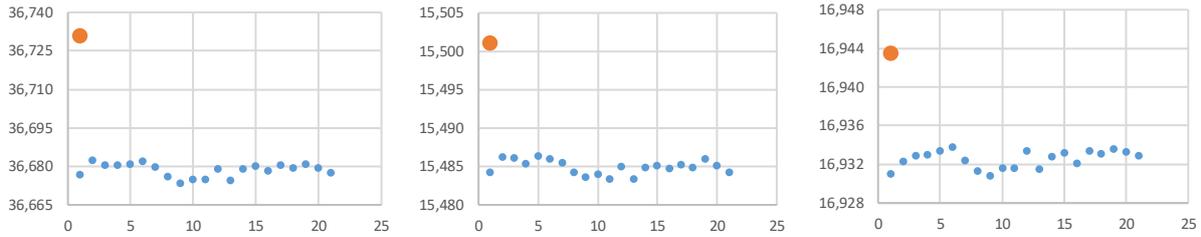


Figure 174 : Exemple de lignes d'observation de biais de fractionnement de masse (points bleus) pour les rapports (de gauche à droite) : $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Calcul réalisé dans le cadre d'analyses MC-ICPMS à l'IPGP : un standard est mesuré toutes les 3 analyses afin de s'assurer de l'absence de fractionnement de masse, les valeurs de NBS981 utilisées pour les corrections (point orange) sont celles publiées par Jochum et al. (2011).

II/3.d Prérequis aux analyses isotopiques du plomb

Les analyses isotopiques du plomb ne sont pas adaptées pour l'étude de métaux naturellement très pauvres en plomb tels que l'étain et l'or mais constituent un outil efficace pour tracer la provenance d'artefacts cuivreux et plombifères comme en témoignent les milliers d'analyses réalisées depuis les années 80. Ce type d'analyse présente néanmoins de nombreuses limites (liées aux minerais analysés, aux méthodes analytiques employées ou encore aux artefacts eux-mêmes) qui pourraient être réduites en améliorant les conditions d'acquisition des signatures isotopiques (Tableau 29).

	Questions à se poser	Commentaire
Échantillonnage de minerais	Échantillonnage de filons en place	Adapter la quantité d'analyses réalisées en fonction du nombre de phases de minéralisation / de la complexité des gisements
	Échantillonnage de haldes et ateliers de minéralurgie	Recherche systématique à réaliser car les filons en place ne correspondent parfois plus aux filons exploités anciennement
	Échantillonnage de scories de datation connue	La signature des scories d'extraction diffère-t-elle de celle des minerais ? Y a-t-il eu des mélanges de minerais ?
Échantillonnage d'artefacts	Données typologiques	L'artefact possède-t-il des caractéristiques propres à une région ? Quelle est son aire de diffusion/de consommation ?
	Contexte de découverte	Éviter d'analyser des artefacts sans contexte de découverte
	Teneur en plomb de l'artefact ?	Identifie-t-on la provenance du plomb ou du cuivre ?
	Caractérisation des éléments mineurs et traces	Cohérence avec les groupes régionaux ? Présence possible de recyclage ?
Préparation des échantillons et analyses	Type de spectromètre de masse utilisé ?	Se renseigner sur la marge d'erreur analytique (en particulier dans le cas de l'utilisation de l'ablation laser)
	Réalisation de doublons et de blancs	Permet d'avoir un regard sur de possibles erreurs de manipulation lors de la préparation des échantillons

Tableau 29 : Éléments à prendre en compte avant de réaliser une analyse isotopique du plomb.

Les analyses isotopiques acquises jusqu'à présent ont été réalisées par des équipes différentes avec des protocoles et des moyens d'analyses différents. La qualité de la caractérisation isotopique des

régions minières et des artefacts est donc variable. Aussi, afin de mener une étude de provenance à large échelle, plusieurs questions méritent d'être posées :

- Dispose-t-on de suffisamment de signatures isotopiques publiées (minerais et artefacts) pour mener ce type de recherche ?
- Ces données couvrent-elles l'ensemble de la zone d'étude ?
- Concernent-elles des gisements et artefacts cuprifères ou plombifères ?
- Les mines pré et protohistoriques sont-elles suffisamment caractérisées ?

III/ Élaboration de bases de données de signatures isotopiques

III/1 Base de données de signatures de minerais

La nécessité de la création d'une base de données compilant l'ensemble des analyses isotopiques du plomb réalisées jusqu'à présent sur des minerais issus de gisements cuprifères et/ou plombifères et d'artefacts s'avère nécessaire pour déterminer la provenance d'artefact à l'échelle de l'ensemble de l'Europe. Ces bases de données se veulent les plus exhaustives possibles. Les données récupérées couvrent l'Europe, le Proche-Orient et l'Oural.

III/1.a Compilations préexistantes

Plusieurs compilations à très grandes échelles

Deux grandes bases de données compilant des analyses isotopiques du plomb sont accessibles en libre accès : la base de données Oxalid et la compilation de B. Scaife.

La base Oxalid est issue de la mise en commun des travaux de deux équipes de recherche des Universités d'Oxford (Royaume-Uni) et de Heidelberg (Allemagne). Elle a été créée au milieu des années 1970 et recense des analyses effectuées entre 1975 et 2002. La base de données, accessible en libre accès (<http://oxalid.arch.ox.ac.uk/>) contient à ce jour plus de 3500 données d'analyses de produits finis ou semi-finis (scories et lingots) et plus de 2 000 signatures de minerais. Initialement, ces travaux avaient pour but d'étudier les premières métallurgies du pourtour méditerranéen (Stos-Gale et Gale, 2009) et ils ne couvrent donc pas l'ensemble de l'Europe (Figure 175).

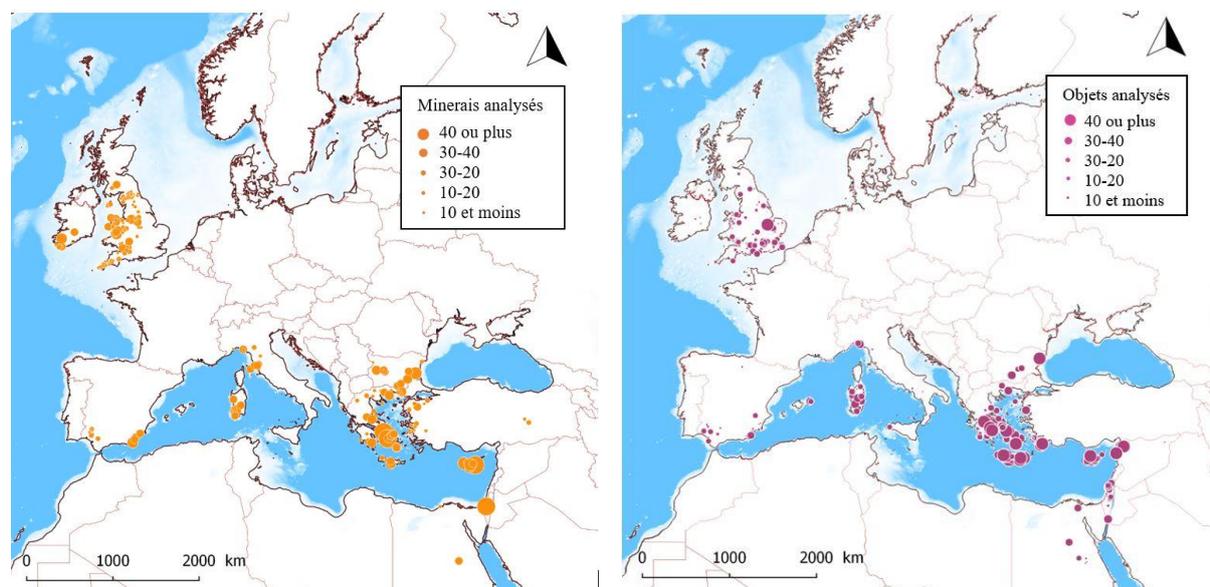


Figure 175 : Localisation des analyses de la base Oxalid. Source : Tomczyk et al., 2019.

Une autre base de données en ligne et en libre accès est celle compilée par Brett Scaife (<http://www.brettscaife.net/lead/data/index.html>). Elle concerne également le pourtour méditerranéen et les données sont localisées sensiblement dans les mêmes zones que celles référencées dans la base Oxalid. La compilation ne recense cependant que des signatures de minerais. Les données concernent

principalement Chypre et la Grèce qui cumulent près de 900 signatures. L'Italie y est également fortement représentée (environ 500 signatures, dont plus de 400 pour la Sardaigne). La Turquie (143 signatures), l'Espagne (90), l'Égypte (31), la Syrie (6 données de sédiments) et trois données du Maghreb complètent cette base de données.

Si ces deux travaux sont les plus régulièrement cités (Guénette-Beck et Serneels, 2010), deux autres travaux à l'échelle de l'Europe et du pourtour méditerranéen sont également à prendre en compte. Il s'agit tout d'abord de la compilation de Thompson et Skaggs (2013) (annexe disponible ici : <http://intarch.ac.uk/journal/issue35/6/table2.html>) qui regroupe des signatures isotopiques de minerais pour la Sardaigne, la péninsule Ibérique et la France (données issues de Marcoux 1986 et de Baron *et al.*, 2006). La thèse de Florence Cattin (2008) recense des milliers de signatures isotopiques du plomb de gisements à l'échelle de l'Europe. Il s'agit de la seule compilation présentant des données pour les régions d'Europe centrale. Les données brutes ne sont cependant pas fournies dans le manuscrit et toutes les sources citées n'ont pas pu être retrouvées malgré une recherche poussée.

Des compilations à échelles régionales à locales

En plus de ces grandes compilations, plus d'une centaine de publications concernant des échelles plus locales, qui n'avaient pas été incluses dans les synthèses précédentes, ont été ajoutées à la base de données. Bien qu'il ne soit pas possible de toutes les citer, il convient de mentionner les travaux d'Ernst Pernicka et de son équipe en Europe de l'Est (Pernicka *et al.*, 1993) et dans les Alpes orientales (Pernicka *et al.*, 2016), la base de données IBERLID pour la péninsule Ibérique (García de Madinabeitia *et al.*, 2021), les travaux de Gilberto Artioli dans les Alpes occidentales (Artioli *et al.*, 2016), les travaux de Mark Hunt Ortiz (2003) pour la péninsule Ibérique ou encore les travaux de thèse d'Éric Marcoux (1986) représentant à elle seule 61% des analyses isotopiques de minerais réalisées en France.

D'autres projets de bases de données sont en cours de développement, notamment la base de données collaborative GlobaLID (Klein *et al.*, 2022) devenue TerraLID en 2024 qui, si elle ne contient à ce jour que très peu de signatures, pourrait à moyen terme devenir une source de documentation très importante. Les métadonnées associées sont très similaires à celles présentes dans la base de données en annexe de ce document. Cependant, les métaux présents dans les gisements analysés sont listés sans spécifier si les minéraux métallifères sont les constituants majeurs du gisement ou non.

Prise en compte de données issues d'études géologiques

Bien que les analyses effectuées dans le cadre des études géologiques ne concernent que très peu de mines exploitées durant la Protohistoire, leur prise en compte est intéressante pour deux raisons : elle augmente le nombre de données disponibles et il est pertinent de comparer la signature d'artefacts avec celles des gisements locaux même si aucune mine n'y a été découverte à ce jour. Par ailleurs, la prise en compte des données de la littérature géologique permet non seulement d'augmenter la quantité de données disponibles mais aussi de proposer des origines qui ne sont pas uniquement liées à une localisation géographique mais également à un type de minéralisation régionale²⁷¹.

Une cinquième grande base de données a ainsi fait partie des données compilées dans ce travail : celle de Blichert-Toft *et al.* (2016). Cette base contient plus de 6000 signatures isotopiques et couvre

²⁷¹ Les bases de données utilisées dans le cadre de travaux archéologiques n'intègrent que très rarement des données issues d'études géologiques ; la compilation de Thompson et Skaggs (2013) constitue en cela une exception.

une grande partie de l'Europe. Elle vise à examiner les variations des signatures isotopiques du plomb dans la croûte continentale en réponse aux grands phénomènes tectoniques. La plupart des analyses portent sur des roches stériles, mais certaines concernent des gisements métallifères, notamment en Scandinavie.

Cette distinction est importante car, bien que l'analyse des roches soit utile dans de nombreuses études géologiques, l'inclusion de signatures de roches stériles peut introduire un biais dans les études de provenance. Pour qu'une proposition de provenance soit valide, plusieurs facteurs doivent être pris en compte. En plus de la nécessité que les régions d'origine supposées soient cohérentes avec la période étudiée (par exemple, un artefact de l'âge du Bronze trouvé en Europe ne peut pas provenir d'outre-Atlantique), il est crucial que l'origine proposée corresponde à une zone réellement minéralisée. Il est donc nécessaire de nettoyer la base de données créée pour ne conserver que les signatures isotopiques du plomb caractérisant des minerais.

III/1.b Nettoyage de la base de données et ajout de nouvelles métadonnées

Les données publiées contiennent généralement trois rapports isotopiques ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ou $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et parfois cinq ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$).

On peut regretter qu'une partie des analyses isotopiques du plomb publiées ne puissent pas figurer dans la base de données créée. En effet, les données brutes ne sont pas toujours publiées. Or, la précision des mesures doit se faire, dans l'idéal, à au moins trois chiffres après la virgule, ce qui n'est pas possible par lecture graphique (même si certains logiciels proposent des correspondances). De plus, les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ne sont pas toujours publiés (citons par exemple les mines d'argent du Montaigu (Girard *et al.*, 2010)). Dans ce cas, les données ne sont pas prises en compte car les études de provenance nécessitent la quantification du ^{204}Pb .

Suppression des doublons et ajout des coordonnées GPS

Les bases de données et les publications préexistantes contiennent généralement au moins :

- Un code d'identification (identifiant du minerai et/ou identifiant de l'analyse²⁷²), disponible dans la colonne « Sample Number » ;
- Des informations textuelles sur la localisation de l'échantillon, disponibles dans les colonnes « Country », « Region » et « Sector details » ;
- Le type de minéral analysé, disponible dans la colonne « Mineral analyzed ».

Ces données peuvent être complétées par d'autres informations, qui varient selon les auteurs, telles que la période d'exploitation de la mine, une description du gisement, la marge d'erreur analytique ou le type de spectromètre utilisé.

Cependant, certaines analyses ont été publiées plusieurs fois, la base de données créée a présenté de nombreux doublons. Dans les cas où les codes d'identification, les informations géographiques et les rapports isotopiques sont identiques, une seule entrée a été conservée. Si l'une des entrées présente des

²⁷² Ces deux informations peuvent être différentes. Il est courant que les identifiants des musées soient très longs et soient simplifiés pour éviter les erreurs lors des préparations en laboratoire (la taille des récipients n'offrant qu'une surface d'écriture restreinte).

rapports isotopiques plus précis (plus de chiffres après la virgule), cette entrée a été retenue. Par exemple, les données de Hunt Ortiz (2003) ont été reprises par Labaune (2016) et dans la base Oxalid et les trois données diffèrent (Tableau 30).

ID	Country	Site	Description	Chronology	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Source ²⁷³
Agh	Spain	El Algarrobbillo II	ore - malachite	Chalcolithic, (2854-2472 cal BC)	2,09064	0,85892	18,174	15,61	37,9953	Hunt Ortiz, 2003 p153-161
Agh	Spain	Amarguillo	mineraï Cu	IIIrd millenium	2,0906	0,8589	18,174	15,61	37,995	Labaune, 2016 cite Hunt Ortiz
AG/h	Spain	El Amarguillo	malachite	Chalcolithic	2,09064	0,85892	18,174	15,698	38,884	Oxalid

Tableau 30 : Exemple de doublon présentant des rapports isotopiques différents : les données de Labaune (2016) présentent moins de chiffres après la virgule, celles de la base Oxalid présentent une erreur dans le calcul des rapports normalisés sur ^{204}Pb .

Une coordonnée GPS (en WGS 84) a été attribuée à chaque entrée de la base de données lorsque cette information n'était pas fournie à l'origine. Les coordonnées GPS sont idéalement basées sur les cartes fournies dans les publications, mais elles peuvent également être déduites d'indications textuelles. Les indications textuelles sur lesquelles la recherche de coordonnées GPS est basée sont rapportées dans les métadonnées dans les colonnes « *Country* », « *Region* » et « *Sector details* ». La qualité des informations de localisation peut varier : toutes les publications ne précisent pas la localisation exacte du gisement échantillonné.

Si plusieurs filons d'une même mine ont été analysés, les coordonnées GPS indiquées correspondent à la mine. Les coordonnées GPS sont indiquées en rouge si elles ne sont pas précises : cela peut être le cas lorsque seule la région est indiquée dans la publication de référence ou que plusieurs mines portent le même nom dans le district minier.

Suppression des signatures de minerais non issus de gisements de cuivre ou de plomb

Les études de provenances prennent parfois en compte toutes les données disponibles pour une région, y compris les analyses effectuées sur la roche encaissante d'une minéralisation, sur des stériles ou sur des gisements ne contenant pas la substance dont la source est recherchée. Cependant, s'il est possible d'observer des similitudes entre les signatures d'artefacts et ce type de contexte géologique, la question de la cohérence de ces comparaisons peut se poser. La base de données a donc été triée afin de séparer les analyses relatives aux minerais issus de gisements de cuivre et/ou de plomb des autres types de données²⁷⁴.

Non prise en compte des scories de réduction dans la base de données de signatures de minerais

Les scories ne sont généralement pas incluses dans les compilations des signatures isotopiques du plomb des minerais. La présence de nombreuses signatures de scories et autres déchets métallurgiques dans les bases Oxalid et IBERLID constituent des exceptions. Les signatures des déchets métallurgiques sont alors parfois autant caractérisées que celles des minerais dans certaines régions. Par

²⁷³ Les références bibliographiques citées (colonnes « Sources » et « Références ») sont celles des publications originales et non des bases de données dans lesquelles elles apparaissent.

²⁷⁴ Les données correspondant à d'autres types de gisements ou de roches n'ont pas été utilisées dans le cadre de cette thèse mais sont néanmoins disponibles dans la feuille « no Pb and no Cu » du document Excel fourni en annexe.

exemple, le fichier Excel « *Ore Spain* » (en français « minerais Espagne ») d'Oxalid compile les analyses de : 12 fragments de litharge, 50 scories de cuivre et 101 minerais. Les résidus métallurgiques représentent donc 44 % des signatures enregistrées. Toujours dans la base Oxalid, certaines localités comme « Skouries/A. Ioannis » ne sont représentées que par des signatures isotopiques de scories.

Les signatures isotopiques des scories sont cependant régulièrement prises en compte dans les études de provenance (Sayre *et al.*, 1992 ; Pernicka *et al.*, 1993 ; Begemann *et al.*, 2003 ; Ling *et al.*, 2019). Leur prise en compte est logique : si une quantité importante de scories d'extraction est signalée dans un secteur donné, il est fort probable qu'elles soient issues de la fonte de minerais locaux. Cependant, ces dernières peuvent avoir une signature différente de la minéralisation locale car elles peuvent résulter d'un mélange de minerais provenant de plusieurs exploitations proches exploitant des gisements de types et d'âges différents (ce cas de figure peut se produire dans le cas d'ateliers centralisés). Pour une période donnée, les scories peuvent donc fournir de précieux indices sur les mélanges opérés : mélanges de minerais provenant de plusieurs gisements mais aussi l'ajout d'un fondant (volontaire ou non) pour faciliter le processus métallurgique. Elles présentent ainsi parfois une signature plus proche de celle des produits finis que des gisements locaux pour une période donnée. Un exemple permettant de l'illustrer concerne les scories de la région de Mitterberg (Autriche), dont les signatures isotopiques sont légèrement différentes des échantillons de minerais et présenteraient de meilleures correspondances avec les artefacts archéologiques que les minerais encore en place (Pernicka *et al.*, 2016).

L'inclusion des scories dans une base de données de signatures de minerais est donc particulièrement intéressante dans les cas où elles sont contemporaines des artefacts dont on cherche à retrouver l'origine. Cependant, il peut être problématique de considérer les scories comme marquant la signature des minéraux locaux si elles ne sont pas contemporaines des artefacts. Or la datation des scories analysées est souvent incertaine. C'est notamment le cas des scories de la base de données Oxalid, qui met en garde l'utilisateur à ce sujet²⁷⁵. Les difficultés de datations des tas de scories parfois analysées peuvent expliquer pourquoi de nombreuses bases de données sur les signatures isotopiques du plomb des gisements n'incluent pas les scories.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons compilé les signatures isotopiques du plomb de déchets métallurgiques (comme les scories ou la litharge) et les minerais archéologiques qui ne sont pas associés directement à des sites miniers (issus par exemple de sépultures) dès lors qu'ils sont issus de contextes bien datés. Si nous aurions pu les considérer comme représentatives des minerais fondus, nous les avons incluses dans la base de données des signatures d'artefacts. Il était en effet important de pouvoir tester le traitement statistique proposé à l'aide de signatures d'artefacts dont la provenance est quasi-certaine. Les scories sont particulièrement intéressantes pour deux raisons : (i) elles possèdent théoriquement la même signature isotopique que les minerais locaux et (ii) elles peuvent être issues de mélanges de minerais. Ces caractéristiques permettent de simuler la vie d'un artefact et de vérifier si le modèle statistique peut identifier correctement leur source.

Recherche d'informations géologiques

Les données nettoyées (compilées dans la feuille « *Directly usable data* » du document Excel) ont été triées pour ne conserver dans la base de données que les analyses de gisements contenant au moins des traces de présence de cuivre et/ou de plomb. Ce tri est facile à réaliser dans le cas de

²⁷⁵ Il est également précisé que « De nombreux amas de scories sont situés loin des gisements de minerais et ont pu servir de lieux centraux pour la fusion de minerais provenant de plusieurs gisements différents ».

publications visant à étudier un ou plusieurs gisements car les contextes géologiques et les assemblages minéralogiques sont décrits avec précision. En revanche, comme l'ont déjà souligné Ixer (1999), Guénette-Beck et Serneels (2010) et Baron *et al.* (2014), les analyses isotopiques issues d'études archéologiques ne fournissent que très peu d'informations sur les gisements collectés et analysés. Les principaux minéraux présents dans le dépôt ne sont presque jamais indiqués et, *a fortiori*, les assemblages minéralogiques ne sont que très rarement détaillés.

Un travail de vérification a donc été entrepris pour chaque site afin de déterminer s'il correspond ou non à une zone minéralisée en cuivre ou en plomb. Ce travail s'est appuyé sur la base de données Mindat de l'*Hudson Institute of Mineralogy* (disponible ici <https://www.mindat.org/>). Cette base de données répertorie des centaines de milliers de gisements et d'indices minéralisés à travers le monde. Elle présente une liste conséquente de rapports d'études géologiques et de publications scientifiques pour chaque site référencé. Des assemblages minéralogiques précis peuvent ainsi être trouvés pour presque tous les gisements analysés²⁷⁶. Les métadonnées correspondantes sont disponibles dans la colonne « *Main minerals/metals mined* ».

Cependant, afin de vérifier la présence ou non de minéraux de cuivre et/ou de plomb, il est nécessaire de connaître le lieu précis où l'échantillon a été prélevé. Les données dont la localisation est trop vague (par exemple « Egypte » ou « Saugerland ») ont donc été écartées. Il en va de même pour environ 400 entrées dont le gisement correspondant n'est mentionné nulle part ailleurs que dans la publication source (il peut s'agir, par exemple, d'une mauvaise transcription du nom de la mine). Ces signatures isotopiques ainsi que celles de sites pour lesquels (i) la localisation est trop vague et/ou (ii) aucune donnée de gisement n'a été trouvée, ont été rassemblées dans la feuille « *incomplete metadata* » du document Excel.

Dans le cas des sites dont le gisement d'origine était identifiable, les analyses non liées à une minéralisation contenant au moins des traces de cuivre ou de plomb ont été isolées. C'est le cas pour 270 entrées, dont une quarantaine d'analyses de minerais de cuivre provenant d'affleurements crétois présents dans la base de données Oxalid, alors que l'île ne possède aucun gisement notable dans les zones analysées (Spanakis, 2015). Les analyses restantes correspondent alors toutes à des minerais issus de gisements de cuivre et/ou de plomb.

Découpage selon la quantité de cuivre et/ou de plomb présents dans le gisement

Deux colonnes ont été ajoutées dans la base de données pour spécifier la présence ou l'absence de minerais de cuivre et de plomb. Il s'agit respectivement des colonnes « *Presence of Cu* » et « *Presence of Pb* ». Ces deux colonnes peuvent contenir l'un des trois textes suivants : Cu/Pb major, Cu/Pb minor ou No Cu/Pb (Tableau 1).

Cu major	Cu minor	No Cu	Pb major	Pb minor	No Pb
n=3539	n=2326	n=1485	n=3823	n=2041	n=1486

Tableau 31 : Nombre d'entrées de la base de données pour le cuivre et le plomb en fonction de la richesse du gisement analysé. Un gisement peut être à la fois riche en cuivre et en plomb (c'est le cas pour 60 % des analyses) ou ne contenir qu'une seule de ces deux substances.

Les gisements de cuivre et de plomb sont respectivement dénommés sous les termes « Cu major » et « Pb major ». Les gisements ne contenant que très peu de minéraux de cuivre et/ou de plomb

²⁷⁶ D'autres publications ont été recherchées pour les gisements et les indices pour lesquels aucune publication n'était associée dans la base de données et pour les sites non référencés dans la base de données.

sont dénommés respectivement « Cu minor » et « Pb minor ». Si aucun minéral de cuivre et/ou de plomb n'est présent, il est indiqué « No Cu » ou « No Pb ».

Cette distinction n'est pas basée sur une teneur seuil car, s'il existe des seuils pour déterminer si un gisement est actuellement exploitable ou non, il n'est pas possible de connaître les seuils d'exploitation pour les périodes anciennes. Considérer une teneur seuil séparant les appellations « major » et « minor » ne semble donc pas cohérent. Ainsi, les distinctions majors et minors sont basées sur le fait que seuls de rares minéraux de cuivre et/ou de plomb ont été signalés (il s'agit de minéraux accessoires). Au contraire, lorsque les minéraux de cuivre et/ou de plomb sont décrits comme des constituants principaux du gisement, le terme « major » est associé à l'analyse. En outre, certains gisements peuvent présenter plusieurs phases de minéralisation : certains filons peuvent donc être riches en minéraux de cuivre et/ou de plomb, tandis que d'autres filons du même gisement peuvent n'en contenir pratiquement aucun.

Les gisements de Cu et Pb minors apparaissent difficilement exploitables par les mineurs : les métaux y sont trop dispersés ou trop rares. La qualité des interprétations proposées sera donc variable selon que l'artefact est relié à un gisement major (plus fiable) ou minor (hypothèse douteuse sauf si des recherches démontrent par la suite la présence de secteurs fortement minéralisés jusqu'alors non découvert ou actuellement détruit²⁷⁷). Toutefois, la prise en compte de gisements mineurs peut être intéressante pour plusieurs raisons. En effet, certains gisements ne contenant que peu de cuivre ou peu de plomb peuvent avoir une signature isotopique proche de celles des filons environnants où la présence de ces métaux serait plus importante : Marcoux (1986) et Zartman, (1974) ont utilisé le terme de régionalisme pour désigner ce phénomène. Par ailleurs, le choix de prendre en compte des signatures correspondant à des gisements très peu enrichis en une substance permet également d'augmenter le nombre de données disponibles pour une région sous-analysée.

Si des informations imprécises ont été indiquées pour un site, elles apparaissent en rouge. Les indications « No Pb ? » et « No Cu ? » correspondent aux cas où le minerai analysé (colonne « Mineral analysed ») est indiqué comme étant un minéral de plomb ou de cuivre alors que le gisement n'en contient théoriquement (presque) pas.

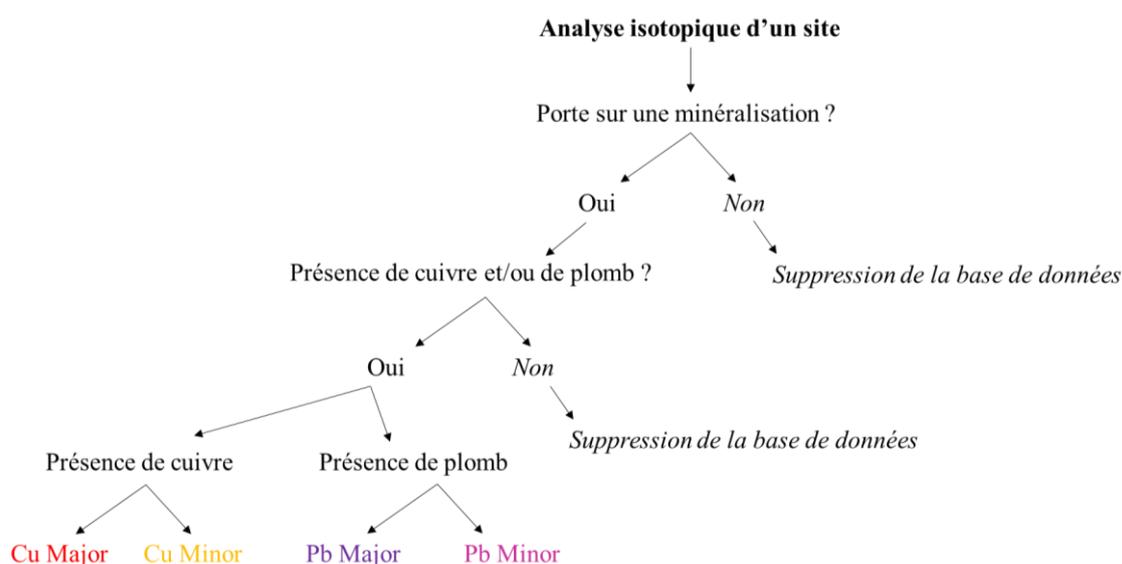


Figure 176 : Schéma récapitulatif du nettoyage de la base de données. Si une analyse est effectuée sur une localité où il n'y a pas de minerais de cuivre ou de plomb sous forme au moins de paillettes, la signature est retirée de la base de données.

²⁷⁷ À ce titre l'analyse de minerais issus de haldes s'avère précieuse.

Enfin, il faut souligner que si la base de données est nettoyée et que seules les signatures correspondant à des gisements ont été conservées, aucun tri n'a été effectué pour isoler les analyses en fonction de leur précision. Or, les analyses MC-ICPMS sont environ 20 fois plus précises que les analyses réalisées par TIMS avant les années 2000 et la question de la possibilité de prendre en compte les analyses effectuées il y a plus de 20 ans mérite alors d'être posée (cf II/3.c).

Date de réalisation des analyses

Il est préférable de privilégier des signatures acquises récemment et donc moins dispersées mais certaines régions n'ont fait l'objet que d'analyses datant d'au moins 20 ans (Figure 177).

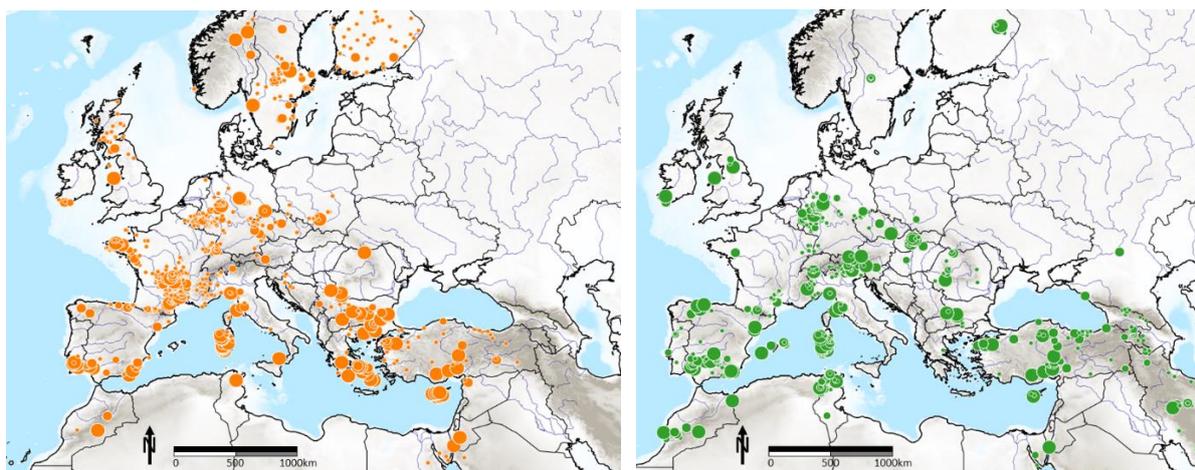


Figure 177 : À gauche (cercles oranges) analyses isotopiques du plomb de minerais réalisées avant 2000 ($n=3\ 316$), à droite (cercles verts) analyses réalisées après 2000 ($n=2\ 613$).
La taille des cercles est proportionnelle au nombre d'analyses.

La quasi-totalité des analyses isotopiques du plomb disponibles pour l'Irlande, la Grande-Bretagne, la France, Chypre, la Grèce²⁷⁸, la Scandinavie ou encore la péninsule d'Oman datent des grandes campagnes de caractérisations menées dans les années 1980. Il n'est donc pas encore possible de n'utiliser que des signatures obtenues par MC-ICPMS car cela reviendrait à retirer de l'analyse de grandes régions dans lesquelles des mines pré et protohistoriques sont avérées. Si de nouvelles analyses sont effectuées pour ces régions, il serait préférable de privilégier ces données récentes du fait de la précision accrue des analyses.

De plus, les signatures isotopiques dont l'incertitude sur le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est de $\pm 0,29\%$, n'ont pas été prises en compte (soit par exemple les analyses menées sur des galènes d'Égypte et d'Arabie Saoudite par Delevaux *et al.* (1967)). Par ailleurs, si les artefacts sont parfois analysés par des spectromètres de masse à ablation laser (LA-ICPMS), ces analyses sont peu précises²⁷⁹ (Degryse et Vanhaecke, 2016). Cependant, à l'heure actuelle, aucun gisement situé dans la zone d'étude n'a été analysé par cette technique pour définir sa signature isotopique en plomb.

²⁷⁸ De nouvelles analyses ont été réalisées en Grèce depuis la fin de cette compilation (Vaxevanopoulos *et al.*, 2022).

²⁷⁹ L'incertitude de mesure du rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ varie selon les spectromètres et les méthodes de préparation des échantillons : $\pm 0,27\%$ (Delavault *et al.*, 2018) à $\pm 0,2\%$ (Simon *et al.*, 2007). Seule l'utilisation d'un MC-LA-MC-ICPMS avec attaque acide permet d'obtenir des marges d'erreurs relativement faibles ($\pm 0,0011$ selon Inacio Alves *et al.*, 2019).

Un autre problème vient du fait que le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ n'est parfois caractérisé que par deux décimales après la virgule. Ce manque de précision ne permet pas la prise des minerais concernés que nous avons isolés dans une feuille séparée du document Excel (« *Inaccurate isotopic data* »).

Un dernier point méthodologique est à rappeler : les 5 rapports isotopiques doivent pouvoir être retrouvés par simple multiplication des autres rapports. Six cas où les rapports n'étaient pas cohérents entre eux ont été identifiés et isolés dans la feuille « *Isotopic ratios not logical* ».

III/1.c Résultat de la compilation de signatures isotopiques du plomb de minerais

Des analyses couvrant une grande partie de l'Europe

Cette compilation a prit près de deux ans et a abouti à la création d'une base de données d'environ 7400 signatures isotopiques du plomb. Les données couvrent l'Europe, le Proche-Orient et une partie de l'Oural. L'élaboration d'une base de données de cette ampleur n'avait jamais été entreprise auparavant. L'inclusion de signatures isotopiques provenant d'études géoscientifiques (46 % des données totales) permet une meilleure couverture de la zone d'étude. En particulier, elle permet de couvrir la France, le Maghreb et la Scandinavie (Figure 178). Bien que peu d'analyses aient été réalisées par des géologues sur d'anciennes mines, la prise en compte de ces données peut s'avérer intéressante, notamment pour s'interroger sur d'éventuelles sources locales dans le cas où aucune ancienne mine n'est connue. De plus, cette base de données offre la possibilité de ne sélectionner que les signatures correspondant à des gisements de cuivre et/ou de plomb. Elle permet donc de ne considérer que les gisements qui présentent au moins des traces du métal dont l'origine est recherchée.

Les analyses réalisées jusqu'à présent couvrent de larges régions où sont reconnus des gisements européens de cuivre et de plomb mais certaines régions restent sous-échantillonnées, voire dépourvues d'analyses isotopiques du plomb qui permettraient de caractériser leur minéralisation (Figure 179).

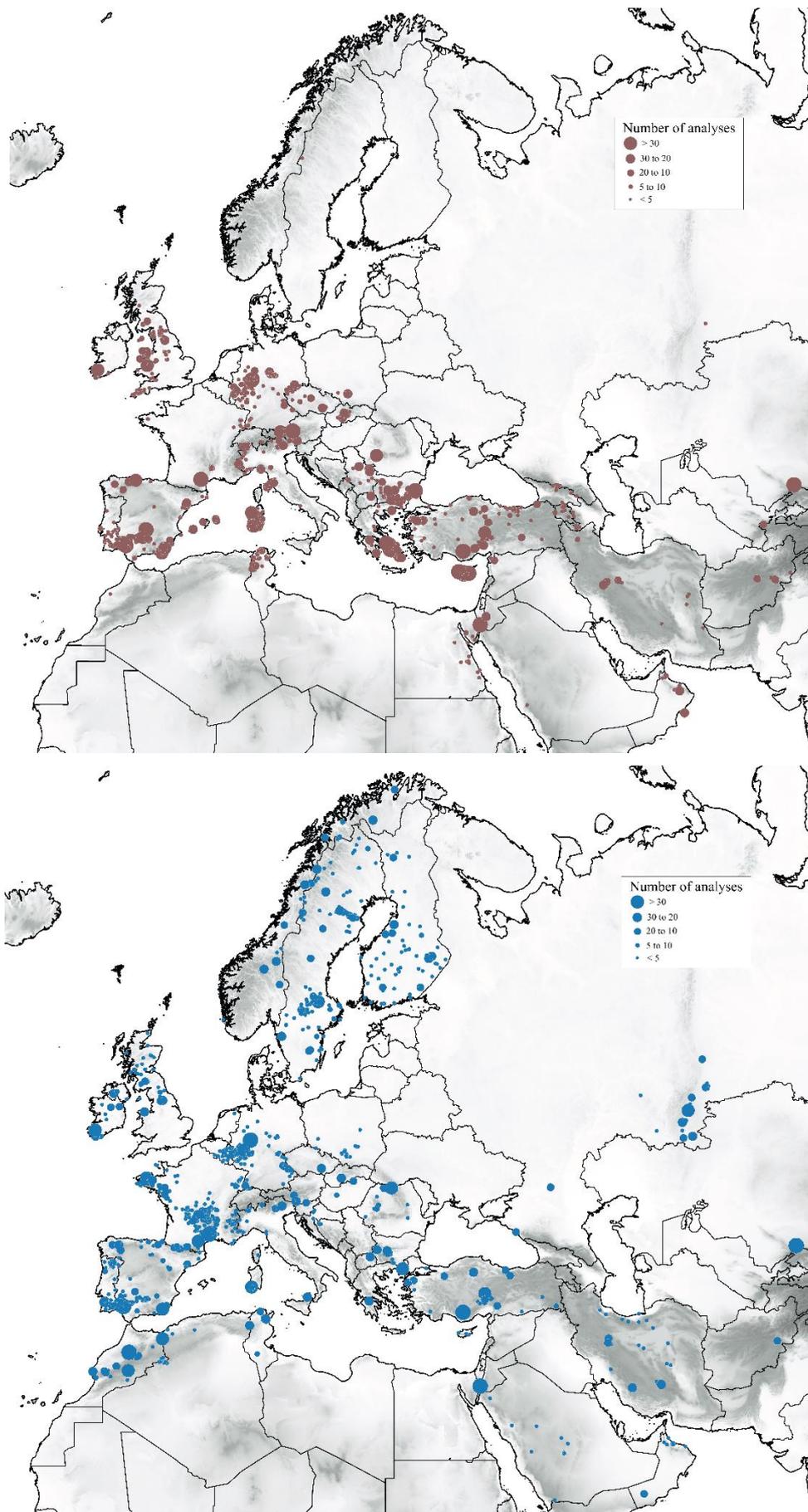


Figure 178 : Localisation des signatures isotopiques issues de travaux archéologiques (carte du haut, cercles bruns) et d'études géologiques (carte du bas, cercles bleus). Source : Tomczyk, 2022.

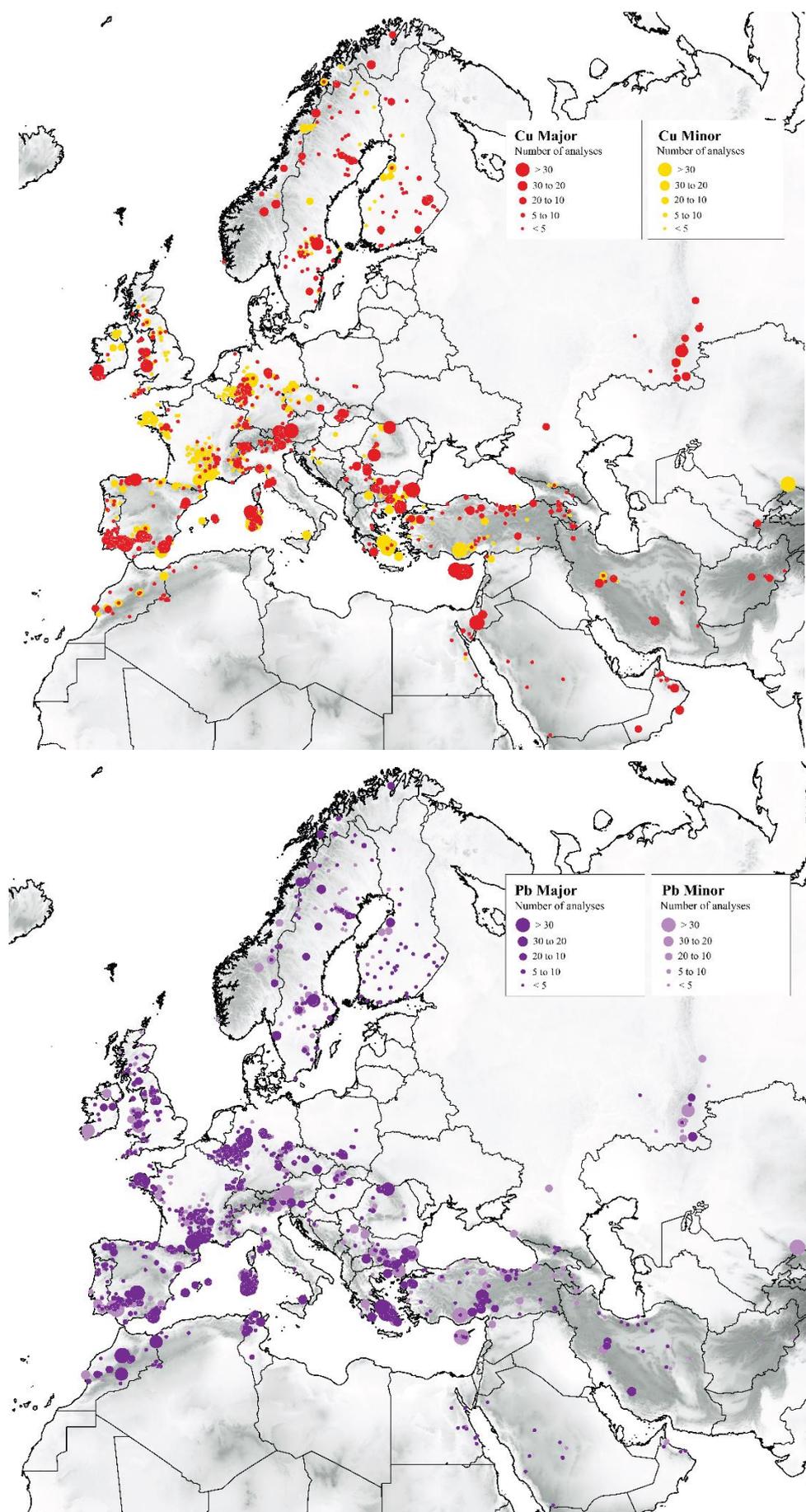


Figure 179 : Gisements de cuivre (carte du haut) et de plomb (carte du bas) référencés dans la base de données et indices minéralisés en Europe (cartes en miniatures). Source de la carte : Tomczyk, 2022.

Des secteurs non analysés où des mines ont pourtant été identifiées

De nombreux districts miniers cuprifères non caractérisés

Bien que notre compilation de données couvre bien les gisements de cuivre et de plomb en Europe, certaines régions riches en cuivre sont sous-échantillonnées ou même dépourvues d'analyses géochimiques permettant de caractériser leurs minéralisations (Figure 180).

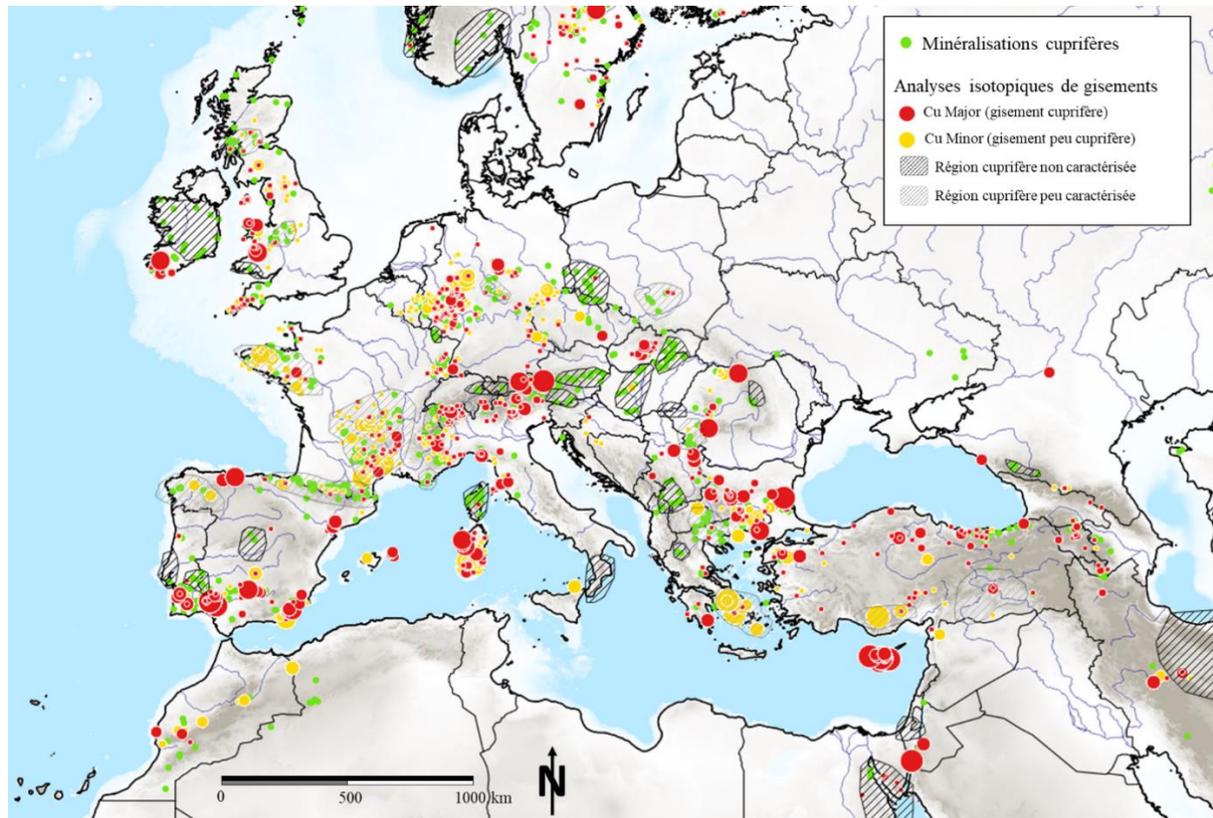


Figure 180 : Régions cuprifères non caractérisées (aucune 4 peu d'analyses) et régions peu caractérisées (peu d'analyses portant sur des gisements de cuivre).

Parmi les régions cuprifères peu ou mal caractérisées, certaines ne présentent pas d'exploitations minières. C'est le cas notamment du nord et l'est de l'Irlande dont les zones minéralisées n'ont pas été caractérisées en isotopie du plomb, mais à ce jour aucune mine n'y ont été découvertes. Un constat similaire peut être fait pour la Pologne où seule une dizaine d'analyses anciennes ont été réalisées sur des gisements de plomb-zinc (Zartman *et al.*, 1979). Cependant, à l'heure actuelle, aucune exploitation minière protohistorique n'a été découverte dans le pays et seule l'étude d'une tourbière à Żyglin indique une possible exploitation des gisements locaux vers 3 000 av. J.-C. (Tudyka *et al.*, 2017). Un défaut de caractérisation est également à signaler dans l'ouest des Balkans. En dehors de l'Europe, la base de données est pauvre en signatures isotopiques pour les gisements de cuivre-plomb d'Iran et du Kazakhstan et pour les gisements de cuivre d'Arabie Saoudite et de l'ouest de la Russie.

Enfin, nous pouvons fortement regretter que certaines régions où des mines et ateliers protohistoriques ont été découverts ne soient que peu ou pas caractérisées en isotopie du plomb (Figure 181). C'est notamment le cas en France où la grande majorité des analyses réalisées sur le territoire métropolitain date des années 1980 (travaux du BRGM menés par Éric Marcoux (1986)). Ces analyses concernent principalement des gisements où le cuivre n'est pas majoritaire par rapport au plomb et au zinc. Les travaux plus récents de Baron *et al.* (2006) ou encore de Rossi *et al.* (2017) portent sur l'étude de mines d'argent médiévales et ne permettent pas non plus de fournir des référentiels pour

le cuivre. Il existe donc encore un manque criant de référentiels de signatures pour les gisements de cuivre en France. Ces lacunes touchent en particulier dans le Massif central, les Pyrénées ou encore les Vosges où des exploitations minières protohistoriques sont pourtant connues. Le Massif armoricain²⁸⁰ mais aussi la Corse²⁸¹ où des ateliers de fonte de minerais ont récemment été découverts souffrent également du manque d'analyses de gisements de cuivre. Seules les Alpes disposent d'une couverture satisfaisante grâce aux travaux de Florence Cattin (2008) mais aussi du laboratoire de Géosciences de Padoue (Artioli *et al.*, 2016). Quelques analyses ont été réalisées sur des minerais et des scories dans le cadre de la PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie. Ces analyses sont cependant encore trop peu nombreuses pour caractériser correctement le district minier de Fayet (Aveyron).

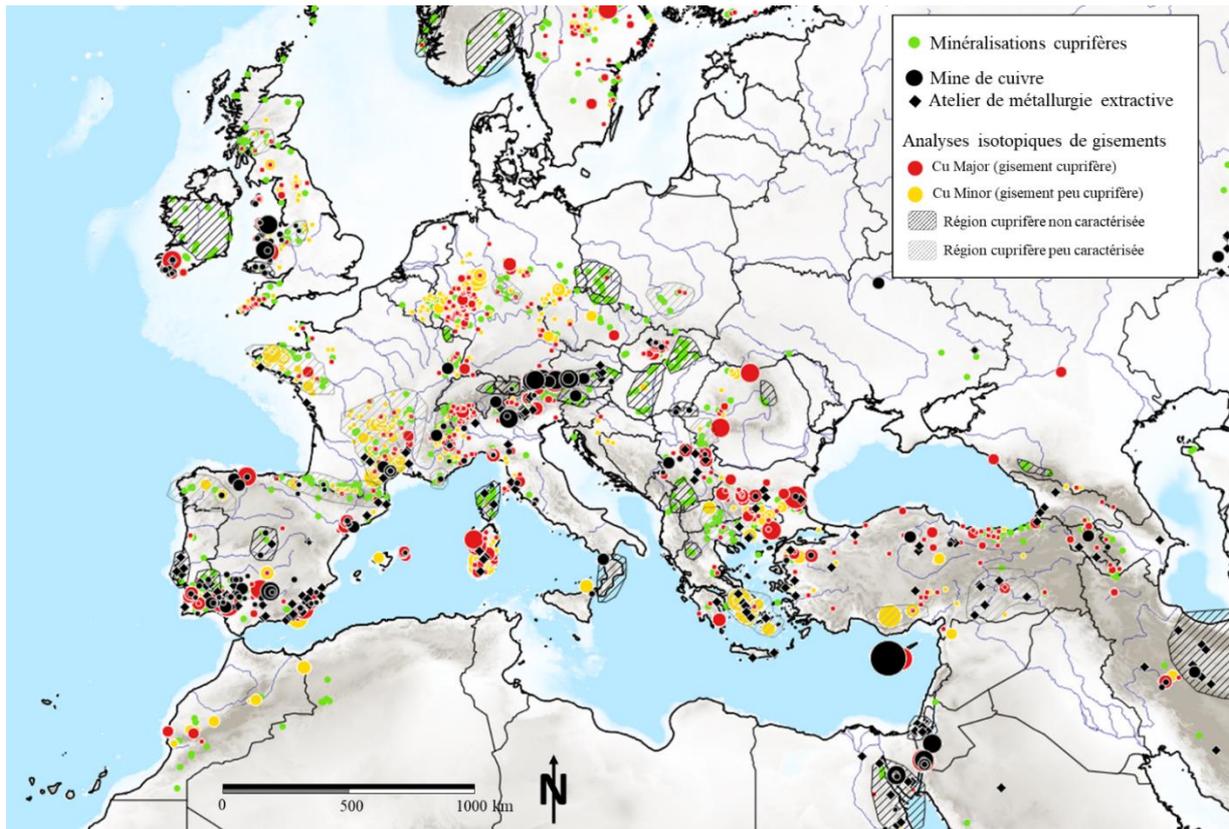


Figure 181 : Régions cuprifères non ou peu caractérisées (hachures) et mines (cercles noirs) et ateliers de métallurgie (losanges) protohistoriques recensés.

Il est également problématique que la région de la Calabre (sud de l'Italie) n'ait à ce jour fait l'objet d'aucune analyse malgré la quantité importante de maillets préhistoriques signalés en contexte minier par Larocca et Breglia (2016) et la présence de deux mines (Grotta della Monaca et Grotta del Tesauo) où l'extraction de minerais de cuivre est avérée (Larocca, 2010 ; Garavelli *et al.*, 2012 ; Levato et Larocca, 2016 ; Dimuccio *et al.*, 2017). Un problème similaire se pose pour le centre de l'Espagne, pour le district de Faro au Portugal, pour une partie des Alpes, pour la frontière entre la Roumanie et la Hongrie mais aussi dans le cas des mines égyptiennes (du désert du Sinaï et du désert oriental/arabique), dont les mines et ateliers n'ont pas été caractérisés en isotopie du plomb.

²⁸⁰ La présence de nombreux ateliers de travail du cuivre et des scories de réduction semble indiquer une exploitation du cuivre local au début du II^e millénaire (Pailler *et al.*, 2016).

²⁸¹ Une seule analyse existe pour la Corse (Marcoux, 1986) où une riche métallurgie néolithique du cuivre a pourtant été identifiée (Cesari *et al.*, 2017 ; Peche-Quilichini *et al.*, 2021).

Ce manque de référentiel pour certaines régions minières est regrettable et pourrait biaiser nos interprétations. L'ajout de nouvelles données dans les années à venir pourrait permettre de définir la provenance de certains artefacts dont les régions d'origine ne sont pas (suffisamment) documentées. Il est également possible que des artefacts dont la provenance a été clairement identifiée voient leur provenance modifiée si une nouvelle zone minière ajoutée présente une signature extrêmement proche d'une autre région connue.

Une bonne couverture des gisements de plomb

Les régions où les exploitations de plomb et/ou de plomb/argent sont beaucoup moins nombreuses, et les anciennes zones minières sont assez bien référencées (exception faite des gisements du Sinaï et du nord-ouest de l'Anatolie). Il est cependant encore une fois à regretter que les analyses n'aient que rarement directement porté sur d'anciennes mines.

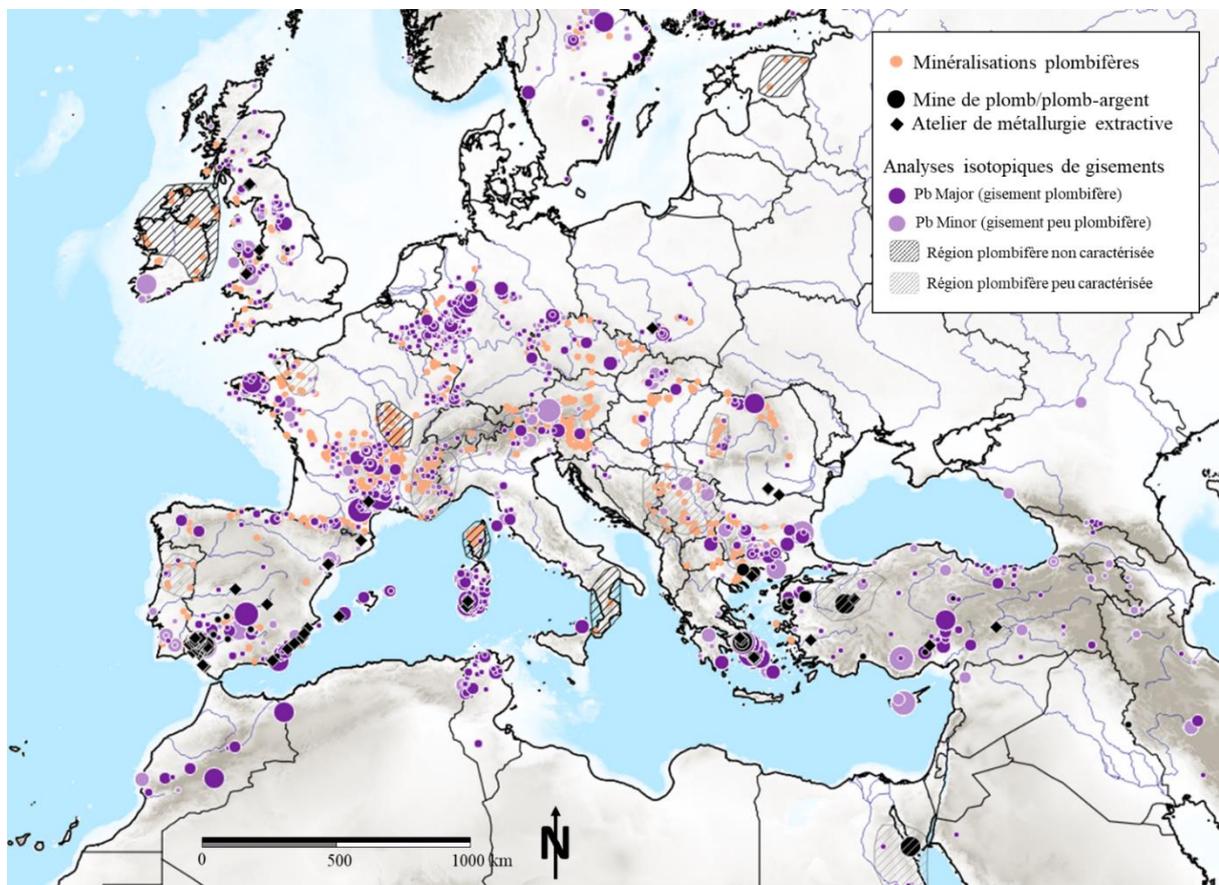


Figure 182 : Régions plombifères non ou peu caractérisées (hachures) et mines (cercles noirs) et ateliers de métallurgie (losanges) protohistoriques recensés.

III/2 Base de données de signatures isotopiques d'artefacts

Une base de données contenant des signatures isotopiques d'artefacts a été constituée selon le même principe que la base de données de signatures de minerais. Néanmoins, à la différence des minerais, très peu de bases de données existent pour les artefacts. Seule la base de données Oxalid déjà citée pour les minerais contient également de nombreuses signatures isotopiques d'artefacts mais ces dernières se concentrent sur l'est de la Méditerranée et les îles Britanniques. Il s'est donc avéré primordial de recenser d'autres données afin d'obtenir une meilleure couverture spatiale (Figure 183).

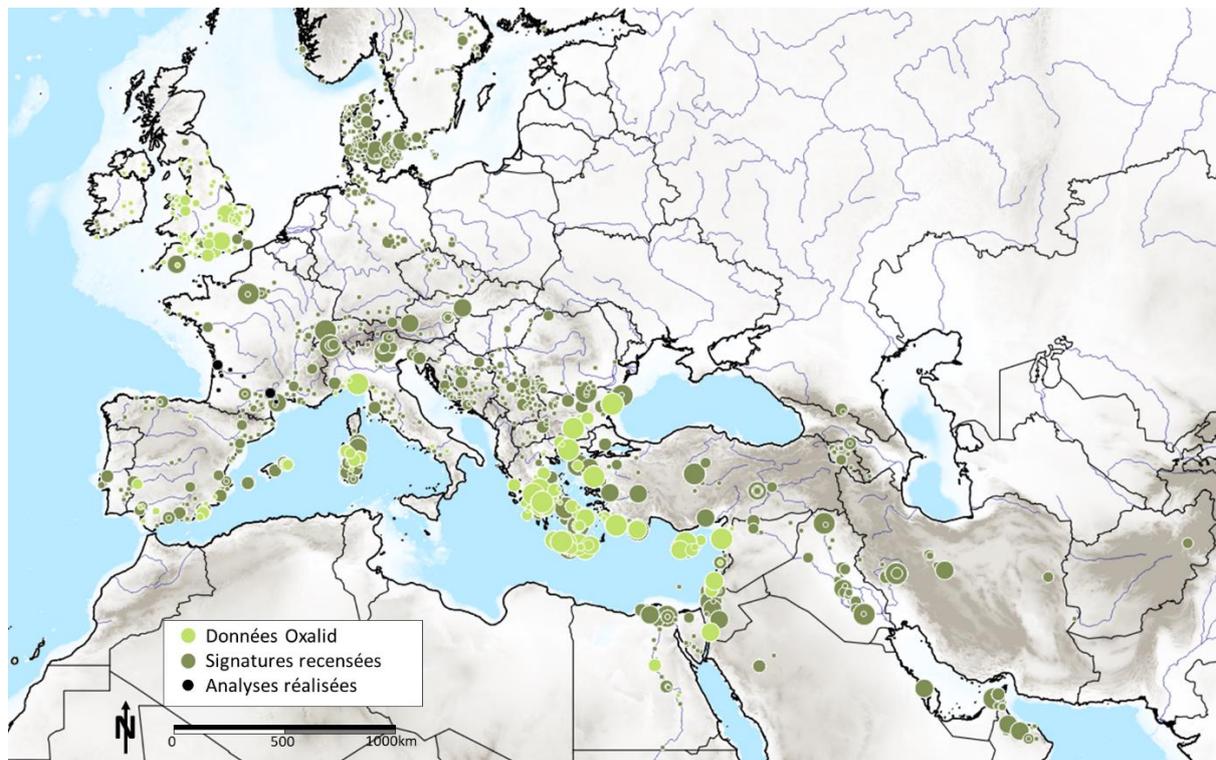


Figure 183 : Analyses isotopiques d'artefacts recensées incluant : les signatures de la base de données Oxalid (en vert clair, n= 3229), les analyses recensées (en vert foncé : n=4804) et les analyses réalisées au cours de cette thèse (en noir n=47 ; en France).

Compiler des signatures isotopiques du plomb d'artefacts a été complexe, car il n'existe pas de synthèses à échelles régionales si ce n'est la base de données IBERLID (García de Madinabeitia *et al.*, 2021) qui recense des signatures de minerais de la péninsule Ibérique mais contient également quelques dizaines d'analyses de lingots et de scories.

Comme pour les signatures de minerais, des recherches bibliographiques ont été menées afin de recenser les signatures isotopiques réalisées sur des artefacts du Néolithique et de l'âge du Bronze. Cette recherche bibliographique approfondie était nécessaire d'autant plus que les études de provenance portent rarement sur de grandes régions mais plus souvent sur de grands sites (citons par exemple les 120 analyses réalisées par Collin (1990) sur les artefacts du site de Fort Harrouard (Eure-et-Loir), ou encore les 554 analyses de lingots de l'épave d'Uluburun présentes dans la base Oxalid). Le nombre d'analyses publiées par site est cependant extrêmement variable et rares sont les études qui couvrent plusieurs périodes chronologiques. Par exemple, les analyses dans les Balkans se concentrent majoritairement sur le mobilier néolithique (voir les riches travaux de Pemicka *et al.* (1997) ; Gale *et al.* (2000) ; Schmitt-Strecker et Begemann (2005) ou encore Pemicka *et al.* (2009)).

Ce travail de recensement a été accompagné d'un long travail de nettoyage et d'homogénéisation des données.

III/2.a Nettoyage et homogénéisation de la base de données

Comme pour les minerais, certaines analyses ne peuvent pas figurer dans notre base de données, car les données brutes n'ont pas toujours été précisées et seuls les résultats graphiques étaient présents dans les publications (par exemple Stos-Gale, 2019 ou encore Bussone *et al.*, 2019).

Identifications de doublons

Tout comme dans le cas des minerais, il se peut que certaines analyses soient publiées plusieurs fois. Les vrais doublons (présentant des données parfaitement identiques), sont facilement identifiables²⁸² et l'une ou l'autre des entrées peut être supprimée. Cependant, les doublons les plus complexes à identifier et à traiter sont ceux pour lesquels certaines données divergent et présentent :

- (1) Un même numéro d'identification et une même information géographique mais des rapports isotopiques différents ;
- (2) Un même numéro d'identification et un même rapport isotopique mais une information géographique différente.

Les cas les plus simples à traiter sont ceux dont les 5 rapports isotopiques sont indiqués et dont les rapports divergent entre les deux entrées de la base de données (cas n° 1). Les données tirées de la thèse d'Aron Shugar (2000) et également présentes dans la base Oxalid présentent par exemple des différences dans les rapports isotopiques publiés (Tableau 32). Les rapports figurant dans Oxalid étant plus précis, ces derniers ont été conservés.

Object number	Region	Site	Chronology	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Source
B-O-04	Southern Levant	Abu Matar	Chalcolithic	2,1152	0,8663	18,056	15,642	38,192	Shugar, 2000
B-O-4	Beersheva	Abu Matar	Chalcolithic	2,11515	0,86626	18,056	15,641	38,191	Oxalid
M-O-19	Southern Levant	Abu Matar	Chalcolithic	2,1162	0,8666	18,062	15,653	38,223	Shugar, 2000
M-O-19	Beersheva	Abu Matar	Chalcolithic	2,11615	0,86664	18,062	15,653	38,222	Oxalid

Tableau 32 : Exemple de doublon marqué par de légères différences de rapports isotopiques.

Les cas les plus complexes à traiter concernent les doublons dont la différence concerne le site de découverte (cas n° 2), car il est alors parfois délicat de déterminer quelle entrée il est préférable de conserver. En reprenant la comparaison entre les données de Shugar (2000) et celles d'Oxalid, il est également possible de constater des différences concernant le lieu de découverte de certains artefacts (l'écart dans ce cas est cependant négligeable pour une étude à notre échelle, car les deux localités ne sont distantes que de 10 km).

Object number	Region	Site	Main Metal	Chronology	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Source
NEV-O-09	Southern Levant	Nevatim	Cu	Ghassulian Chalcolithic	2,0861	0,8442	18,571	15,678	38,741	Shugar, 2000
NEV-O-09	Beersheva	Abu Matar	Cu	Chalcolithic	2,08612	0,84421	18,571	15,678	38,742	Oxalid

Tableau 33 : Exemple de doublon présentant une différence de site de découverte.

²⁸² Excel propose une option de détection des doublons très efficace.

Localisation : attribution d'une coordonnée GPS

Les localisations ont été transformées en coordonnées GPS (WGS84). Certains sites dont la localisation pose question présentent des coordonnées indiquées en rouge. Il peut s'agir de sites pour lesquels plusieurs toponymes existent sans qu'aucune information ne permette d'identifier de manière précise le site correspondant, ou encore d'artefacts dont seule la région de découverte est mentionnée.

Dans le cas où aucune information n'était disponible quant au lieu de découverte, l'artefact a été supprimé de la base de données.

III/2.b Chronologie des artefacts

Dans le cas où un artefact ne présenterait aucune datation ou si sa datation est indiquée comme incertaine, et qu'aucune information ne peut être trouvée à son sujet, ce dernier est isolé dans une feuille distincte du document Excel. Ceci est le cas de certaines scories non datées et d'artefacts de musées acquis sans en connaître le contexte de découverte et dont la typologie ne permet d'attribution chronologique. Ces artefacts sont rarement analysés et le nombre d'artefacts retirés de la base de données pour ce motif est donc très faible.

Transformation des datations en format absolu

Dans le cas où une datation est indiquée, cette dernière peut être sous des formats très variés. L'une des difficultés supplémentaires rencontrées lors de ce travail a alors été l'homogénéisation des attributions chronologiques à l'échelle de l'Europe. Le format le plus rare et pourtant le plus utile dans notre cas et est une datation en format numérique. Si des datations de ce type étaient disponibles, alors elles ont été conservées. Cependant, les publications fournissant des datations absolues sont rares : l'immense majorité des études ayant servi à bâtir cette base de données sont à l'échelle d'un site et reprennent souvent les découpages chronologiques régionaux (grands découpages de l'âge du Bronze ou cultures associées). Un long et fastidieux travail visant à déterminer des correspondances chronologiques a alors été entrepris. Dans certaines régions, les datations précises des différentes périodes étant encore débattues, ou du moins sujettes à plusieurs grilles de correspondances possibles, les correspondances utilisées ont été listées dans un fichier Excel disponible en Annexe²⁸³. Par exemple le EM I (Early Minoan) de Crète a été transformé en 3100-2700 av. J.-C. (selon les correspondances proposées par Tartaron, 2008). Ce travail était nécessaire, car toutes les régions étudiées ne présentent pas un découpage chronologique similaire.

²⁸³ Les découpages de ces périodes étant variables selon les auteurs pour de nombreuses régions, il a été choisi de considérer à chaque fois la même publication (si possible celle qui fait le plus consensus ou à défaut celle basée sur le plus de sites précisément datés par radiocarbone).

Région	Pays	Culture	Début	Fin	Source
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea I	1100	1000	Rafel et al., 2010
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea II	1000	900	Rafel et al., 2010
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea III	900	800	Rafel et al., 2010
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea IV	800	700	Rafel et al., 2010
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea V	700	600	Rafel et al., 2010
Catalogne	Espagne	Almagro Gorbea VI	600	500	Rafel et al., 2010

Tableau 34 : Extrait du tableau de correspondance utilisé pour traduire certaines datations relatives en datations absolues lorsqu'aucune date n'était indiquée dans la publication source.

De plus, certains artefacts présentent une datation de très mauvaise qualité avec parfois une marge d'incertitude de plus de 2000 ans. Dans la base Oxalid, certains artefacts découverts en Crète présentent une datation indiquée comme «EM/LM» soit 3100 à 1070 av. J.-C. et des artefacts découverts en Sardaigne présentent une datation « nuragique » soit 2500 à 500 av. J.-C. Des informations de datation ont alors été recherchées pour les sites où les artefacts ont été découverts mais toutes les datations n'ont pas pu être resserrées pour l'ensemble des sites, car leurs durées d'occupation sont souvent importantes (Tableau 35).

ID	Country	Site	Description	Chronology	Source
4403	Spain	Cova de l'Heura	Minerai de cuivre	III ^{ème} millénaire	Labaune, 2016
4403A	Spain	Cova de l'Heura	Minerai de cuivre	Early to Middle Bronze Age (2300-1300 cal. BC).	Rafel <i>et al.</i> , 2016

Tableau 35 : Exemple de datations très imprécises concernant un même site dont la période d'occupation est importante.

Mise à l'écart des artefacts dont la datation est très imprécise

L'étude de la dynamique des exploitations minières menée en partie 1 nous a permis de distinguer plusieurs grandes périodes d'activités marquées par des différences de répartition spatiale des mines (et dans le cas du cuivre, de types de minerais exploités) :

- 5000-3800 av. J.-C. : Métallurgie précoce dans les Balkans et en Méditerranée ;
- 3800-3000 av. J.-C. : Accroissement rapide du nombre de mines en Méditerranée ;
- 3000-2000 av. J.-C. : Mines présentent dans de très nombreuses régions ;
- 2000-1600 av. J.-C. : Stabilisation du nombre de mines de cuivre, premières mines d'étain ;
- 1600-1300 av. J.-C. : Début d'organisation en grandes zones minières ;
- 1300-800 av. J.-C. : Organisation en grandes zones minières.

L'imprécision de datations d'un artefact est moins gênante si ce dernier est chalcolithique/néolithique du fait de la plus grande étendue du pas de temps retenu. Il est en revanche problématique qu'un artefact présente une imprécision de datation de ± 1000 ans si ce dernier est daté de l'âge du Bronze. Ces cas sont malheureusement assez communs : pour certaines périodes prises en compte, près de la moitié des artefacts présentent une datation précise à ± 1000 ans ou plus (Figure 184).

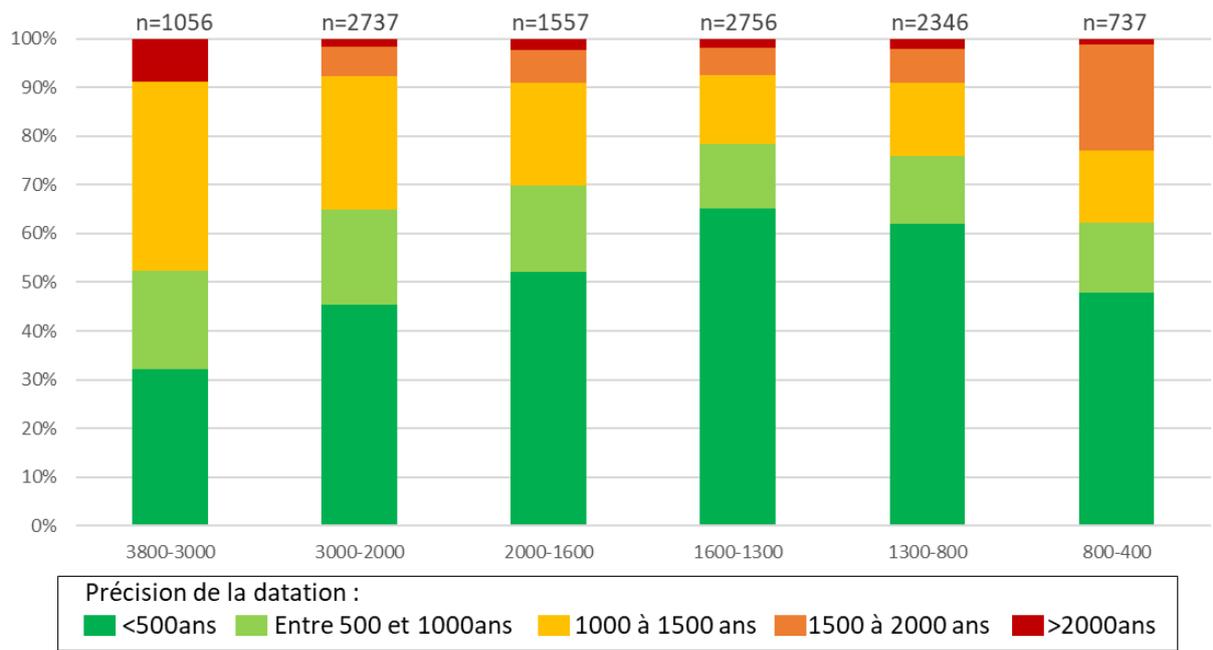


Figure 184 : Précision de la datation des artefacts par périodes précédemment définies.

Les artefacts mal datés sont majoritairement localisés en Sardaigne, dans le pourtour égéen et dans le Levant (Figure 185 et Figure 186) mais des artefacts bien datés ont également été analysés dans ces régions.

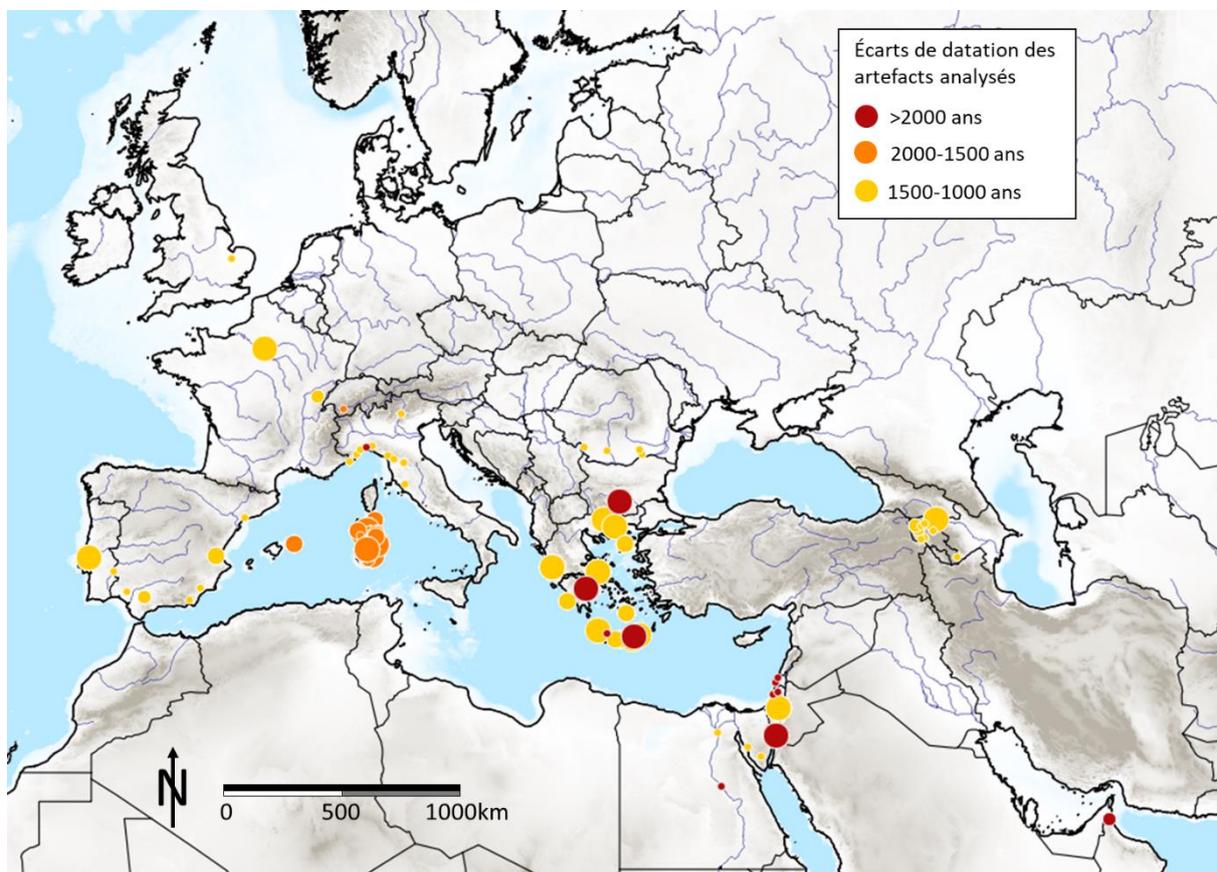


Figure 185 : Répartition des artefacts mal datés pour l'ensemble des périodes considérées.

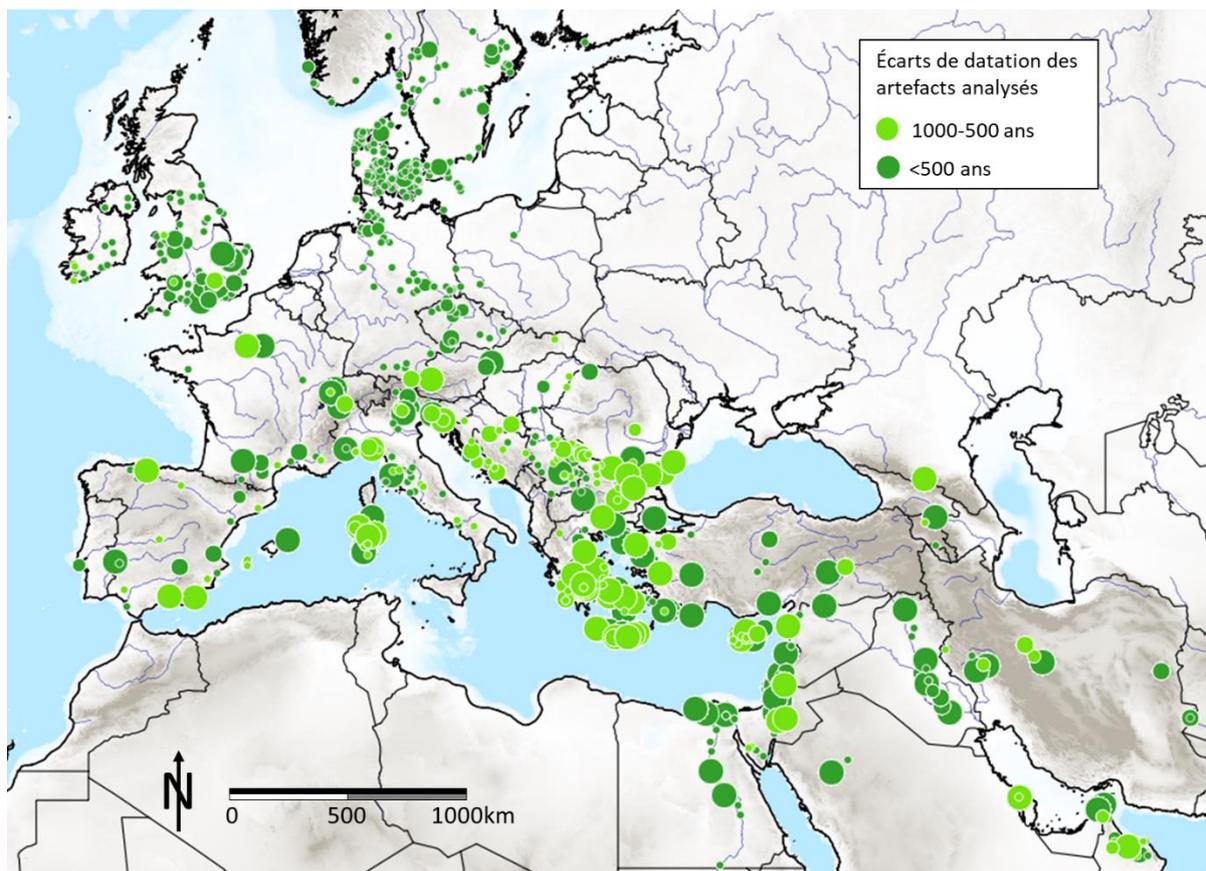


Figure 186 : Répartition des artefacts relativement bien datés pour l'ensemble des périodes considérées.

Il serait envisageable de ne pas tenir compte des artefacts présentant une incertitude de datation très importante. Toutefois, nous avons délibérément choisi de les inclure dans nos recherches de provenance afin d'évaluer l'impact de l'intégration de différentes régions géologiques dans le traitement statistique. Si les résultats de provenance obtenus s'avèrent similaires malgré la différence des signatures de gisements en entrée du modèle statistique, nous pourrions conclure que les données utilisées n'altèrent que légèrement, voire pas du tout, les attributions de provenance, dès lors que les provenances sont quasi-certaines.

III/2.c Distinction des scories et des minerais découverts hors de zones minières

Les minerais découverts hors site miniers ont été séparés dans un document Excel distinct. Ce choix est discutable car ces derniers sont souvent pris en compte dans les référentiels de minerais et non comme artefacts. Les incorporer à des référentiels de signatures de gisement a pourtant du sens, car :

- Il s'agit parfois des seules signatures permettant de caractériser une zone minière (il est fréquent que les gisements n'aient pas été analysés) ;
- Même s'ils ne sont pas retrouvés directement dans les mines ou les haldes, ils n'ont théoriquement pas été déplacés sur de grandes distances (cf partie 1 II/1.b) ;
- Les signatures de minerais retrouvés hors contexte minier peuvent correspondre à des minerais qui ne seraient plus présents dans les gisements actuellement.

Pourtant, comme rien ne nous assure que ces minerais ont été fondus²⁸⁴, nous les avons isolés.

²⁸⁴ Des malachites peuvent avoir été récoltées pour confectionner des perles ou pour être utilisées comme pigments.

Concernant les scories, l'ajout d'un fondant exogène lors de la réduction n'influerait pas que la signature des scories (dans lesquelles le fondant s'incorpore) mais impacterait également la signature du métal obtenu à l'issue du processus métallurgique. Les études manquent toutefois cruellement pour établir ce fait et, à ce jour²⁸⁵, seule une étude récente de scories et d'artefacts de l'âge du Bronze (1900-1400 av. J.-C.) du site de Mušiston (Tadjikistan) semble indiquer que l'ajout de fondant (des minerais de fer) extérieur modifierait bien la signature isotopique du métal produit (Berger *et al.*, 2022). Ce site constitue cependant un cas exceptionnel, car des minerais de cuivre et d'étain sont extraits de la même mine et fondus ensemble. Les processus de pyrométallurgie à l'œuvre sont donc difficilement transposables à d'autres sites tout comme le résultat de l'étude.

Ainsi, malgré le fait que les scories puissent être plus représentatives des métaux produits à l'issue des processus métallurgiques, nous avons souhaité les considérer comme une catégorie d'artefacts à part. Cette distinction est réalisée dans le but de disposer d'artefacts permettant de juger de la fiabilité du traitement statistique proposé, leur provenance devant correspondre à leur région de découverte. Elle est également motivée par le fait qu'il est parfois complexe de déterminer si les scories analysées sont bien des scories de réduction et non des scories liées à la métallurgie d'élaboration, en particulier lorsqu'elles sont issues d'un site pratiquant les deux types de métallurgie. Or, la prise en compte de scories d'élaboration dans une base de données de signatures de minerais y apporterait des imprécisions.

La couverture spatiale des analyses isotopiques des scories et minerais retrouvés en contexte archéologique est encore assez limitée, en particulier pour le plomb (Figure 187). Les grandes régions productrices (le monde égéen, la Sardaigne mais aussi l'Angleterre) n'ont pas fait l'objet d'analyses de scories bien datées. En conséquence, peu de signatures sont donc disponibles, mis à part pour la période 800-400 av. J.-C.

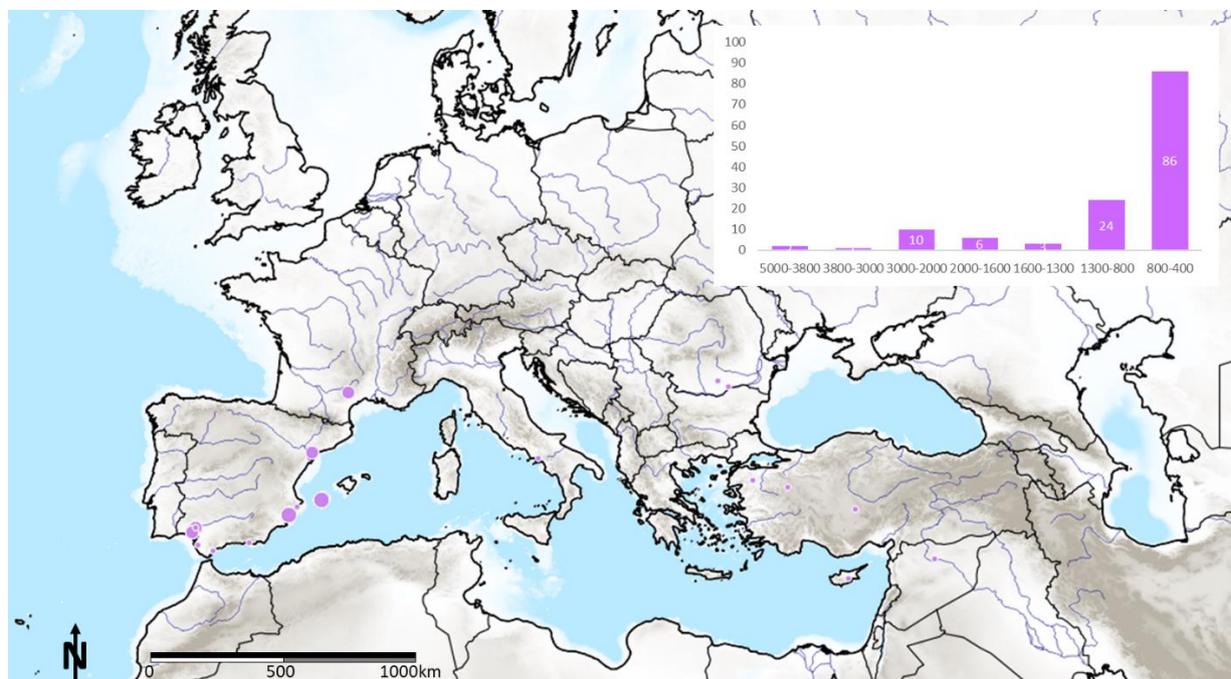


Figure 187 : Répartition spatiale et par période des scories et minerais de plomb découverts en contexte archéologique.

Les analyses de scories et de minerais sont plus nombreuses pour ce qui concerne le cuivre (Figure 188). Elles sont majoritairement localisées dans des zones où les gisements ont également été

²⁸⁵ Gale et Stos-Gale (1989) mais aussi Georgakopoulou (2005) évoquent cette possibilité en une courte ligne.

caractérisés. Quelques exceptions sont cependant à noter : les gisements n'ont pas fait l'objet d'analyses dans le Sinaï et au Portugal. De plus, les analyses de gisements égéens n'ont pas concerné les gisements de cuivre (ils sont classés « Cu Minor » dans la base de données de signatures de minerais).

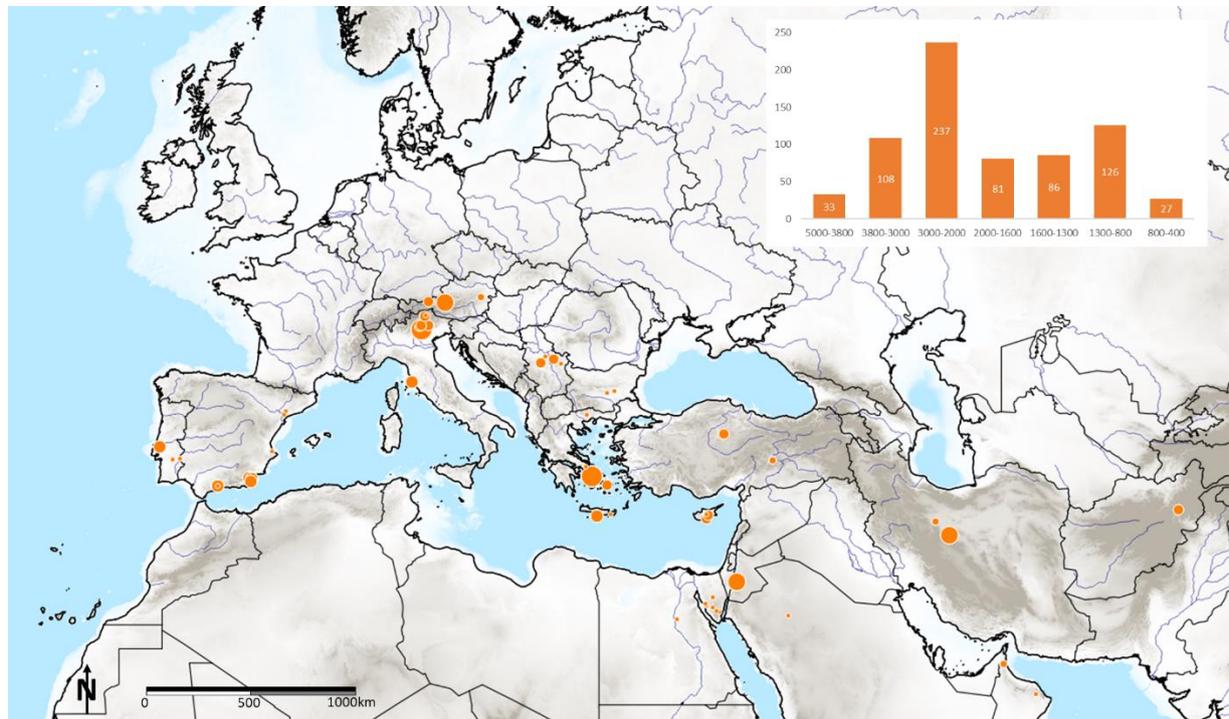


Figure 188 : Répartition spatiale et par période des scories et minerais de cuivre découverts en contexte archéologique.

Si l'intérêt scientifique de l'analyse isotopique des scories et des minerais archéologiques est certain, on recense peu de signatures les caractérisant (454 pour le cuivre, 102 pour le plomb). Ceci ne représente finalement peu de données par rapport à la très grande quantité de signatures de minerais issus de filons en place (7283 signatures au total) ce qui est dommageable, car ils fournissent des informations directes sur les sources de minerais effectivement utilisées par sociétés du passé. En revanche, les minerais encore en place ne reflètent pas nécessairement les sources exploitées à l'époque.

III/2.d Distinction des artefacts selon leur composition

La question de la présence de plomb dans les artefacts cuivreux est primordiale car, si la quantité de plomb présente dans un artefact cuivreux est importante, le métal tracé risque de ne plus être le cuivre mais le plomb (Begemann *et al.*, 2001). Il est donc important de distinguer :

- Le plomb naturellement associé au cuivre, issu du même gisement/minerais et possédant donc la même signature isotopique que le cuivre ;
- Le plomb ajouté comme élément d'alliage et provenant d'une source distincte dont la signature est différente de celle du gisement de cuivre.

À partir de quel seuil trace-t-on la provenance du plomb et non plus celle du cuivre ?

Il est couramment admis que le plomb naturellement associé au cuivre est présent en faibles quantités (moins de 1 % selon Pernicka (2014) et moins de 2 % selon Rovira Llorens (2004) et

Johannsen (2016)) et qu'à partir de 5 %, le plomb est issu d'un ajout intentionnel. Il est difficile de déterminer si la présence de plomb, comprise entre 1-2 % et 5 %, est intentionnelle ou non. Par exemple, Hauptmann *et al.* (2015) remettent en question la fiabilité de l'origine des lingots contenant entre 1,2 et 2,96 % de plomb, étant donné l'incertitude quant à leur ajout intentionnel ou non. Il n'est également pas à exclure qu'en dessous de 2 % la présence de plomb dans un artefact cuivreux puisse être liée à un recyclage (Rovira Llorens, 2004).

Aucune étude ne s'est jusqu'à aujourd'hui penchée sur la question du seuil précis à partir duquel la signature du cuivre est surpassée par celle du plomb exogène. Les seuils de 1 ou 2 % ne s'appuient donc sur aucune étude analytique²⁸⁶. Cette question est effectivement très complexe :

- Si un gisement de cuivre contient du plomb²⁸⁷, le cuivre issu de ce dernier de son exploitation contiendra probablement du plomb en quantité importante (1 à 2 %). Ce plomb pourrait alors avoir la même signature que le cuivre ;
- Si un cuivre très pur est mélangé à un alliage riche en plomb, une quantité de 1 à 2 % de plomb exogène pourrait potentiellement modifier la signature isotopique.

Une manière de trancher la question pourrait résider dans le fait qu'un apport de moins de 2 % de plomb dans un bronze ou un cuivre ne modifie pas les propriétés de ce dernier de manière perceptible. Ainsi, si certaines des faibles teneurs en plomb (< 2 %) pourraient être issues de recyclages, les alliages volontaires au plomb dépassent régulièrement les 2 % et sont majoritairement réalisés pour couler des artefacts allongés ou des décors d'artefacts très fins nécessitant de couler un métal particulièrement fluide. En effet, l'ajout de plomb au cuivre présente deux intérêts techniques (Johannsen, 2016) :

- Le plomb diminue la viscosité de l'alliage, ce qui permet de mouler plus facilement des objets longs et/ou étroits²⁸⁸ ;
- Le plomb abaisse le point de fusion du bronze.

Les alliages au plomb peuvent également servir pour réparer des artefacts en soudant deux parties d'un objet (Liversage, 2000 p.224 et 238). Cependant, la présence d'une quantité trop importante de plomb pourrait rendre l'artefact non fonctionnel²⁸⁹. Le plomb forme de plus des nodules dans le bronze et une teneur élevée en plomb le rend fragile et vulnérable à la corrosion (Staniaszek et Northover, 1983 ; Huth, 2000).

Ainsi, dans le cadre de cette compilation, nous ne considérerons que les teneurs en plomb supérieures à 2 % comme pouvant provenir d'une volonté d'alliage et donc d'un probable mélange avec du plomb exogène. Les artefacts cuivreux contenant plus de 2 % de plomb ne figurent ainsi pas dans les tableaux de données destinés à comparer la signature de l'objet à celles de gisements de cuivre mais

²⁸⁶ Des expérimentations pourraient permettre de définir à partir de quelle quantité de plomb exogène ajouté la signature isotopique du plomb est modifiée. Cela demanderait de définir la signature isotopique du plomb d'un cuivre pur et d'un plomb métal pur puis de réaliser des mélanges de ces derniers et mesurer les rapports isotopiques obtenus. Plusieurs hypothèses seraient possibles incluant une modification brutale de la signature isotopique du cuivre métal à un pourcentage de plomb exogène précis ou bien une modification progressive de la signature entre deux valeurs de plomb exogène.

²⁸⁷ De nombreux gisements européens sont polymétalliques et certains minerais de cuivre sont riches en plomb et certains minéraux communs contiennent du plomb et du cuivre, notamment les bournonites (PbCuSbS₃).

²⁸⁸ Voir notamment l'étude de bronzes phéniciens par Celauro *et al.* (2014) montrant le choix des alliages employés selon le type d'artefact.

²⁸⁹ Des haches en bronze contenant environ 20 % de plomb ont été découvertes dans l'ensemble de la culture atlantique (et en particulier en Grande-Bretagne) de la fin de l'âge du Bronze (Montero Ruiz *et al.*, 2003). Non fonctionnelles, elles sont supposées être votives.

constituent une sous-catégorie des artefacts en plomb, car il est alors plus cohérent de supposer que leur signature pourrait correspondre à celle d'un gisement de plomb.

Cette distinction a été réalisée dès que les données sources le permettaient. Elle a été complexe à effectuer car les compositions élémentaires des artefacts ne sont que rarement précisées dans le cadre d'études de provenance (Pollard et Bray, 2018 p156)²⁹⁰. Cette absence d'analyses est marquée dans la base Oxalid²⁹¹ d'où provient 23,5 % des entrées de la base de données nettoyée :

- Les artefacts bulgares, grecs et italiens n'ont pas fait l'objet de quantifications de leurs teneurs en plomb ;
- Seuls 52 artefacts sur 326 artefacts chypriotes ont des teneurs en plomb mesurées (soit 16 % des artefacts analysés) ;
- Seule la moitié des artefacts espagnols ont fait l'objet d'une analyse des teneurs en plomb.

Du plomb comme élément d'alliage

Si du cuivre a été régulièrement allié au plomb dans le nord de la façade atlantique et, en particulier au Pays de Galles durant la phase dite d'Acton Park (1500-1300 av. J.-C.) (Northover, 1981 ; Northover et Gale, 1983), l'ajout de plomb dans les alliages n'est devenu courant dans l'intégralité de notre zone d'étude qu'à la fin de l'âge du Bronze (vers 1000 av. J.-C.). Des quantités très importantes de bronzes fortement plombés ont alors circulé en Europe occidentale et méridionale (voir notamment Stos-Gale, 1992 p.84 ; Huth, 2000 ; Montero Ruiz *et al.*, 2003 ; Giumlia-Mair *et al.*, 2010 ; Szefer, 2012 ; Yagel et Ben-Yosef, 2022). Cependant, à la même période, les alliages au plomb étaient rares dans certaines régions telles que la Suisse (Rychner et Kläntschi, 1995) et la Scandinavie (Johannsen, 2016)²⁹². La répartition spatiale des artefacts analysés contenant plus de 2 % de plomb présente donc des disparités géographiques (Figure 189).

²⁹⁰ Il est cependant surprenant qu'au moins la teneur en plomb ne soit pas publiée, car elle est normalement quantifiée dans le cadre de l'analyse de l'échantillon.

²⁹¹ Ce fait s'expliquait par une volonté du laboratoire d'Oxford de pouvoir réaliser un nombre important d'analyses isotopiques et si, une critique de la base de données Oxalid semble facile, il ne faut pas oublier les conditions dans lesquelles ces analyses ont été menées par les toutes premières équipes à réaliser des travaux de caractérisation à si grande échelle et avec peu de matériel analytique disponible.

²⁹² Dans ces deux cas, les faibles teneurs en plomb des bronzes pourraient être liées à des phénomènes de recyclages.

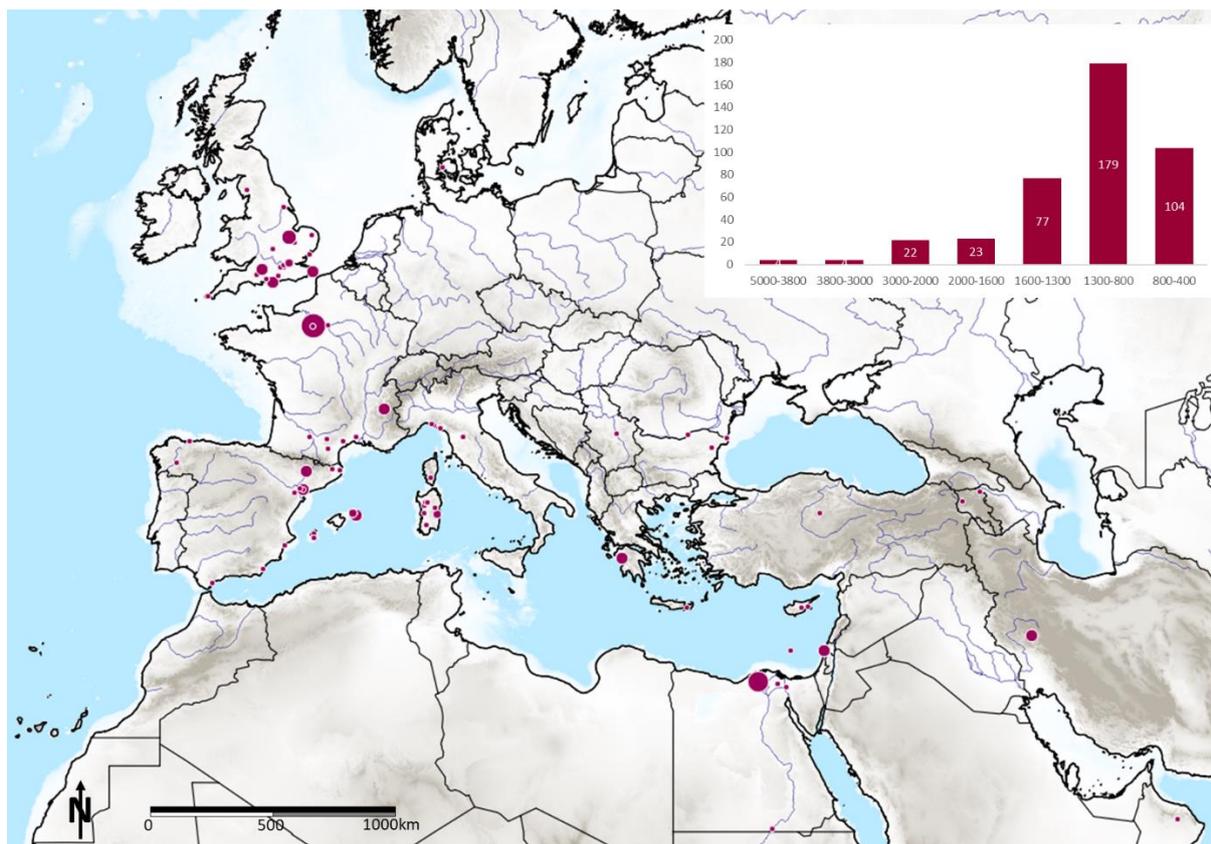


Figure 189 : Répartition spatiale et par période des artefacts cuivreux à fortes teneurs en plomb.

III/2.e Représentativité des analyses

Des analyses représentatives des alliages cuivreux en circulation

La composition des artefacts cuivreux (pauvres en plomb) reflète les changements d'alliages en circulation (Figure 190). Les artefacts en cuivre non alliés sont nombreux au Chalcolithique et représentent environ 75 % des analyses avant 3500 av. J.-C. et le reste des artefacts sont en alliage de cuivre et arsenic/antimoine. La transition des cuivres à arsenic/antimoine vers les bronzes à étain se marque clairement vers 1600 av. J.-C. dans la composition des artefacts. Cette transition est plus brutale que celle observée dans les mines et les ateliers de métallurgie extractive que nous avons estimée entre 1700 av. J.-C. et 1400 av. J.-C. mais reste cohérente avec l'état de l'art actuel fixant la transition progressive des bronzes arséniés aux bronzes à étain vers 2200/2000-1600 av. J.-C. soit au cours du Bronze ancien.

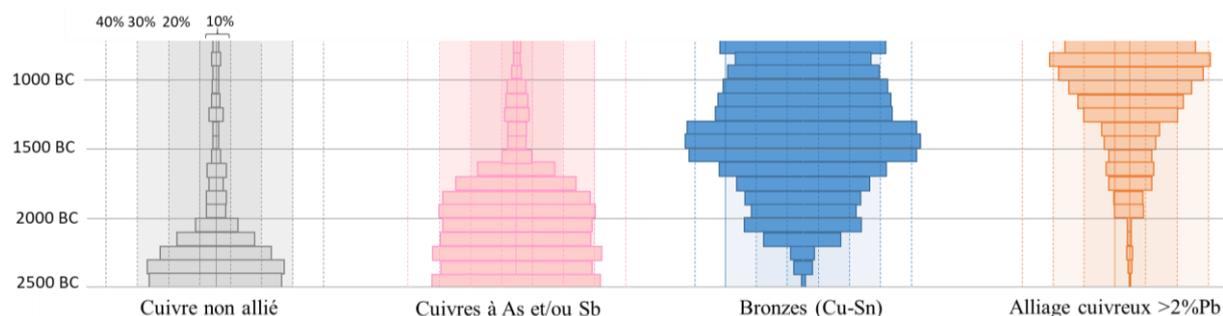


Figure 190 : Composition des artefacts analysés par grandes périodes : les alliages de cuivre au plomb ne dépassent 15 % des artefacts analysés qu'à partir de 1500 av. J.-C. et 30 % à partir de 1300 av. J.-C.

Ces analyses isotopiques du plomb réalisées sur des artefacts cuprifères (hors cuivres riches en plomb précédemment isolés) présentent une assez bonne couverture de l'ensemble de la zone d'étude (Figure 191).

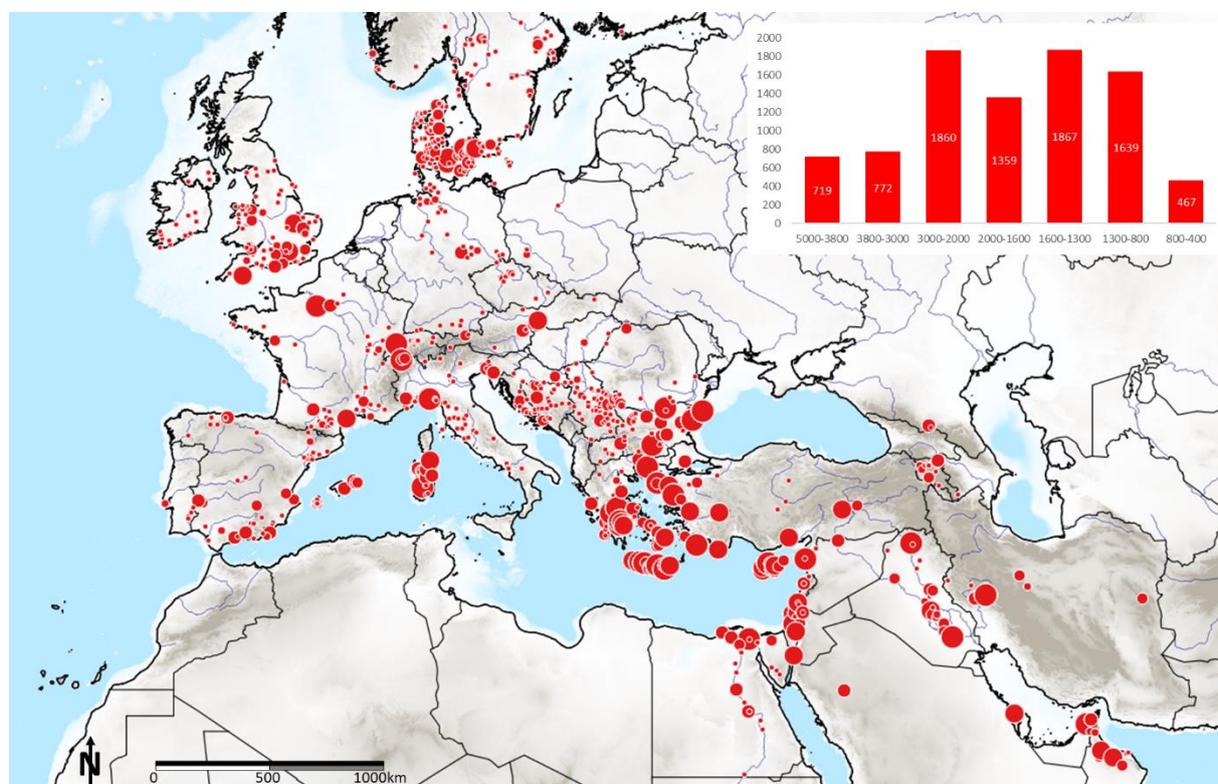


Figure 191 : Répartition spatiale et par période des artefacts cuivreux analysés.

Le pourtour méditerranéen est particulièrement bien couvert à l'exception de l'Italie (hors Sardaigne) et de la péninsule Ibérique. Beaucoup de signatures d'artefacts retrouvés dans le sud de l'Angleterre et en Scandinavie sont également disponibles mais peu d'analyses ont été réalisées sur des artefacts entre ces deux grands pôles : la Pologne, l'Allemagne mais aussi la France (à l'exception des analyses de Fort Harrouard), présentent peu d'analyses. Cette répartition inégale des analyses peut biaiser les propositions de reconstitution d'échanges nord-sud.

La pertinence de la recherche de provenance pour la période 5000-3800 av. J.-C. peut se poser tant les artefacts analysés sont concentrés autour des Balkans. L'activité minière y étant intense mais balbutiante ailleurs en Europe, une provenance locale de ces artefacts est clairement à privilégier. Cependant, interroger la provenance de ces artefacts en comparant leur signature à l'ensemble des régions minières en activité (Balkans, pourtour égéen, Alpes et péninsule Ibérique) sera l'occasion de tester les provenances obtenues et de vérifier que la provenance locale attendue peut être retrouvée à l'aide de nos analyses.

Des analyses peu nombreuses d'artefacts en plomb

Le nombre d'analyses effectuées sur des artefacts en plomb est beaucoup plus faible (1212) que pour les artefacts cuivreux (5955) probablement car peu d'artefacts en plomb ont circulé durant les périodes étudiées, et qu'ils n'ont été découverts en quantités importantes que dans certaines régions ciblées :

- Dans le Levant, dès les V^e et IV^e millénaires (Yahalom-Mack *et al.*, 2015) ;

- Dans l'est de la méditerranée, dès le III^e millénaire av. J.-C.²⁹³ (Gale et Stos-Gale, 1981 p. 178 ; Glumac et Todd, 1987) ;
- Dans le sud de la France, sur une courte période correspondant à la fin du Néolithique sous la forme de perles et pendentifs (Figure 192 ; voir notamment Amal *et al.* (1979) et Guilaine (1991))²⁹⁴ ;
- Dans le sud de l'Espagne, à partir de la période phénicienne (analyses menées notamment par (Hunt Ortiz, 2005) ;
- À la période nuragique en Sardaigne (Atzeni *et al.*, 1990).

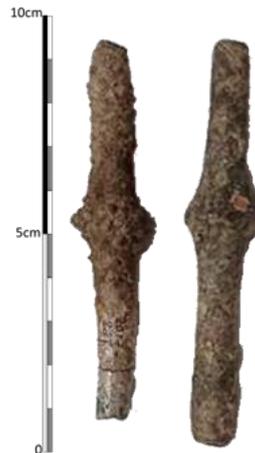


Figure 192 : Perles en plomb néolithiques du sud de la France.

Toutes les régions ayant produit des artefacts en plomb sont bien représentées à l'exception du sud de la France. La répartition des artefacts en plomb analysés en isotopie montre une très bonne couverture du pourtour égéen (Figure 193) : 766 des 1212 analyses d'artefacts en plomb ont été réalisées par Zofia Stos-Gale sur des artefacts égéens. En Sardaigne, on dénombre 105 analyses d'artefacts nuragiques, réalisées majoritairement par Atzeni *et al.*, 2005 et Valera et Valera, 2005).

²⁹³ Il s'agit ici probablement d'un sous-produit de la coupellation de l'argent (Johannsen 2016 ; Pernicka *et al.*, 1998).

²⁹⁴ Ces artefacts sont contemporains des premières métallurgies du cuivre dans la région.

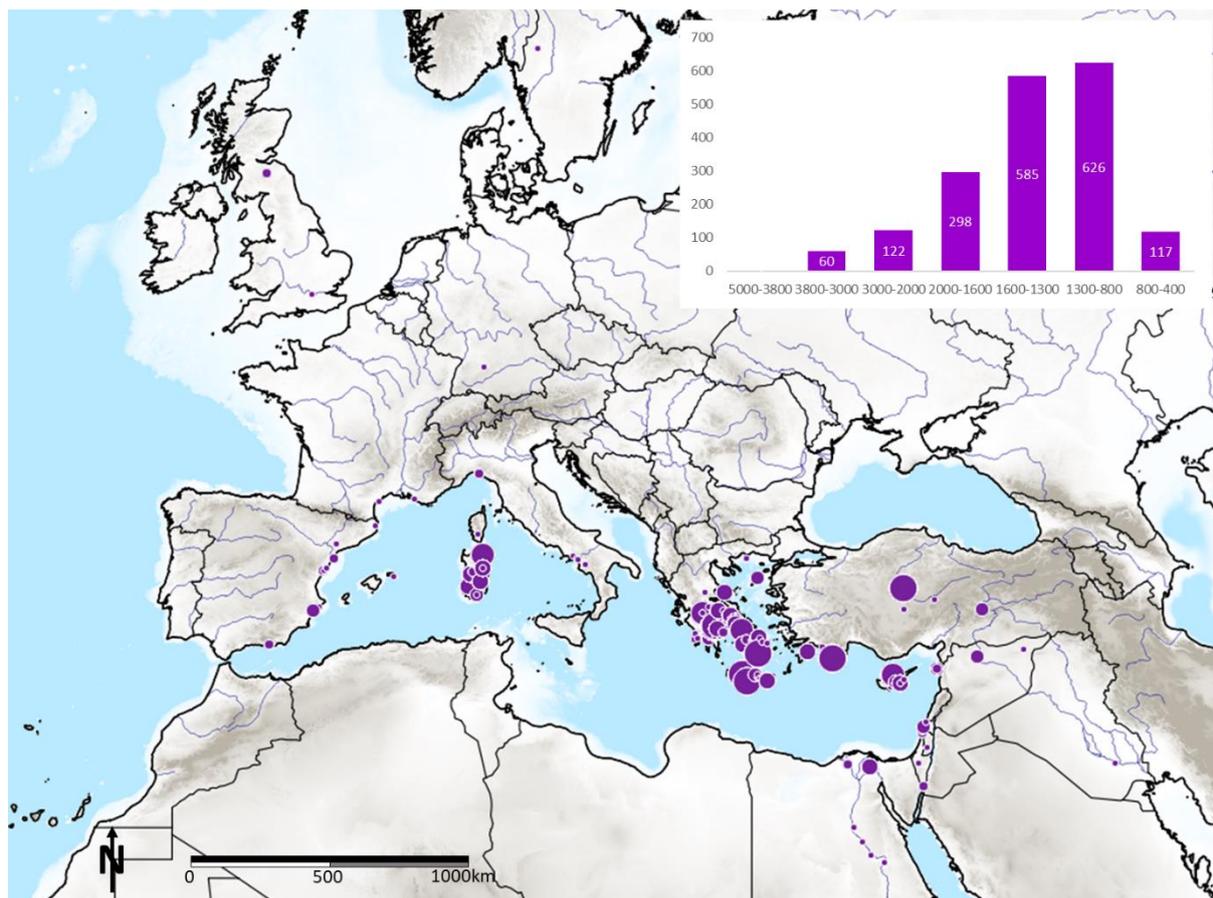


Figure 193 : Répartition spatiale et par période des artefacts en plomb analysés.

Les artefacts analysés datent de l'âge du Bronze dans leur immense majorité. Il sera donc complexe de proposer des interprétations à grande échelle avant la date de 2000 av. J.-C. et après la date de 800 av. J.-C. La tranche d'âge 5000-3800 av. J.-C. n'est représentée par aucun artefact et ne peut donc pas être étudiée.

III/2.f Catégories d'artefacts référencées

Les descriptions archéologiques des artefacts dans les publications ont été conservées (elles sont visibles) dans la colonne « *Description* » ; on peut donc théoriquement répartir les analyses en fonction des types d'artefact. Ce tri a été complexe à réaliser car certains artefacts peuvent être interprétés de plusieurs manières. Il s'agit notamment des haches qui peuvent être des outils fonctionnels, des armes, des objets d'apparat et de prestige (Fontijn, 2002) ou encore faire office de lingots (Gabillot, 2000). Pour cette raison les haches ont été isolées dans une catégorie à part entière. Une catégorie a été créée pour les éléments de fixation tels que les rivets des épées afin de savoir si leurs signatures diffèrent ou non de celles des éléments qu'ils maintiennent. La catégorie « métallurgie » comprend des déchets²⁹⁵ liés à la métallurgie d'élaboration (la métallurgie d'extraction ayant été séparée dans une autre catégorie).

²⁹⁵ Ils n'ont pas pu être attribués à une catégorie fonctionnelle d'artefacts à cause de leur aspect souvent informe.

La répartition obtenue indique que les artefacts en plomb (Figure 193) sont souvent (36%) de forme indéterminée²⁹⁶. Le reste du corpus est constitué à parts égales d'outils (18%) et d'éléments de fixation (17%). Les éléments de prestige sont rares : bijoux (5%), figurine (2%).

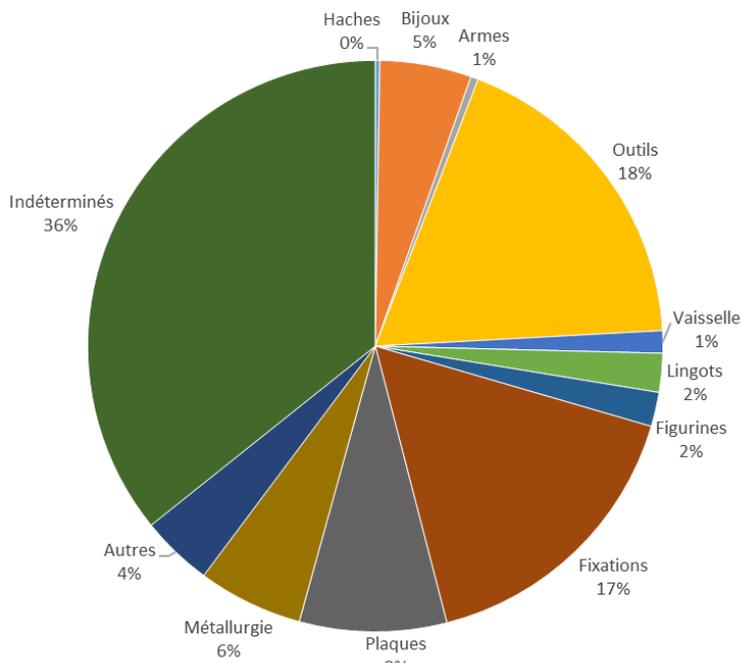


Figure 194 : Répartition par catégories fonctionnelles des artefacts en plomb recensés.

Les haches, les armes, les outils et les bijoux constituent les artefacts majoritairement analysés parmi les artefacts cuivreux (Figure 195). Ils représentent à eux seuls 74% des analyses. Le faible nombre de lingots analysés est à souligner (2%). Ces derniers étant supposés faire moins l'objet de recyclages, il aurait été intéressant de disposer de plus d'analyses les concernant.

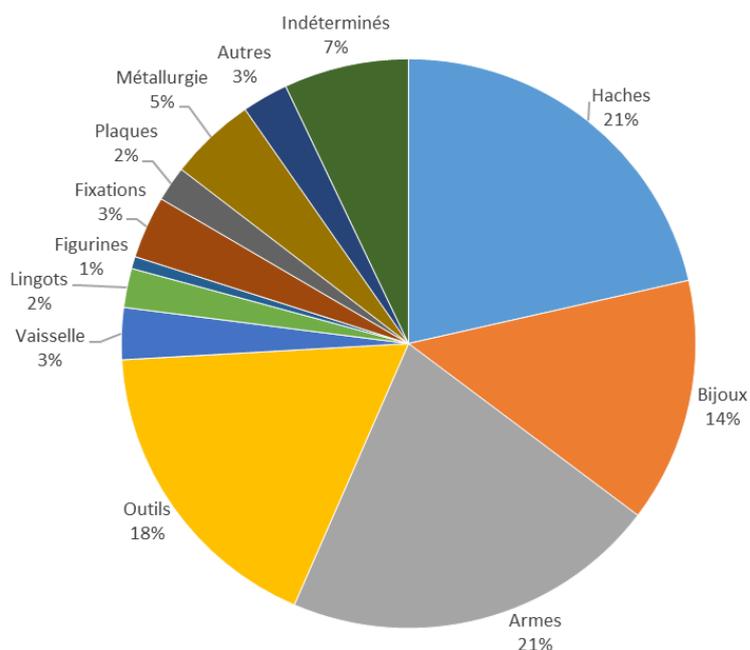


Figure 195 : Répartition par catégories fonctionnelles des artefacts cuivreux recensés.

²⁹⁶ L'absence de typologie claire de ces artefacts pourrait expliquer qu'il ne fasse que rarement l'objet d'analyses isotopiques longues et coûteuses.

III/2.g Les signatures isotopiques du plomb d'artefacts

Comme pour les minerais, la base de données produite présente la faiblesse d'associer des analyses de qualité inégales (précision variable des datations des artefacts, compositions élémentaires détaillées ou non, imprécisions concernant les lieux de découverte...). Des vérifications et un travail d'homogénéisation et de nettoyage des données ont permis de ne conserver que les signatures d'artefacts dont les descriptions et les contextes de découvertes sont les mieux renseignés. Ces données reflètent un héritage de plusieurs dizaines d'années d'acquisition mais présentent les faiblesses de la mise en commun de travaux menés par des individus différents dans des laboratoires différents. Nous avons cependant référencé 8033 analyses d'artefacts datés du néolithique à l'âge du Bronze sur une étendue couvrant l'Europe, le Proche-Orient et une partie de l'Oural. Un travail de recensement à telle échelle n'avait jamais été entrepris.

	Artefacts en cuivre	Artefacts en plomb	Artefacts en cuivre +plomb
Nombre d'artefacts	6410	1314	309
Dont scories et minerais	454	102	/

Tableau 36 : Nombre total de signatures recensées par métal constituant les artefacts.

Ces données pourront être comparées aux nombreuses analyses menées sur des minerais mais pour que cette comparaison soit la plus pertinente possible, il nous faut sélectionner des signatures de minerais représentatives des sites en exploitation pour chaque période considérée.

III/3 Sélection des signatures de minerais pour le traçage de provenance

Tracer des diagrammes binaires permet de constater que certaines régions présentent des gammes de signatures très resserrées alors que d'autres présentent en revanche des signatures dispersées. Par exemple les signatures des différentes îles des Cyclades sont très resserrées et s'individualisent relativement bien alors que les signatures des mines de Cabrières ne permettent pas de différencier ces mines des autres gisements hercyniens (Figure 196).

Cette dispersion des signatures peut être propre aux gisements : les gisements hydrothermaux sont souvent polyphasés (ils présentent plusieurs phases de minéralisations) et chacune de ces phases peut posséder une signature différente. La quantité d'analyses effectuées et la prise en compte des phases de minéralisation sont alors primordiales pour distinguer les phases de minéralisation et expliquer cette dispersion apparente. Les gisements pour lesquels une exploitation est connue et qui présentent des signatures extrêmement hétérogènes mériteraient d'être caractérisés par un nombre plus conséquent d'analyses. Néanmoins, dans le cas de données déjà acquises, cette dispersion peut être minimisée en rejetant des valeurs « aberrantes », anormalement différentes des autres signatures d'un même gisement.

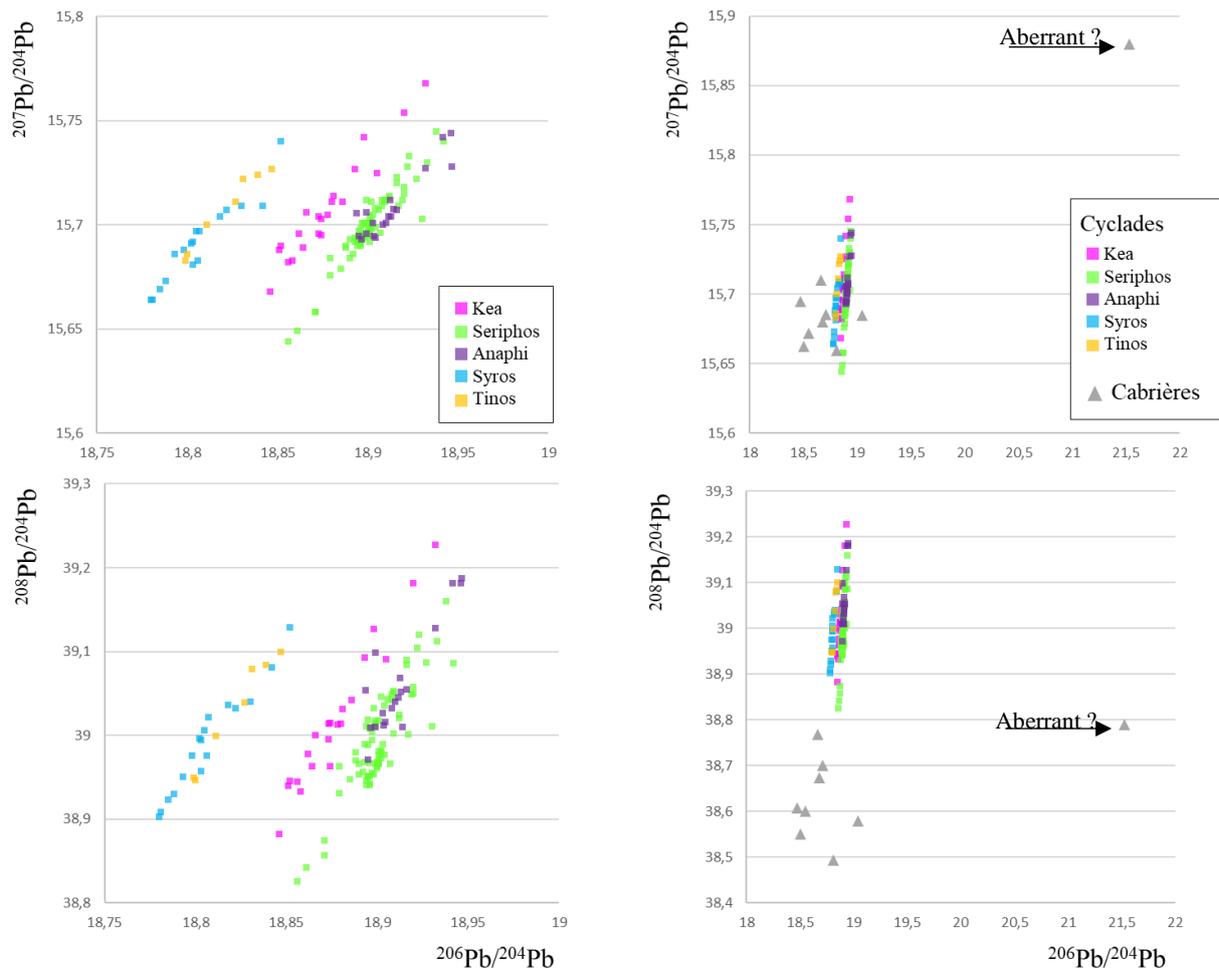


Figure 196 : À gauche, rapports isotopiques du plomb de gisements de cuivre de plusieurs îles des Cyclades (données issues de la base Oxalid) : les signatures s'individualisent par origine géographique même si certaines îles présentent des signatures très proches (notamment Seriphos et Anaphi mais aussi Syros et Tinos). À droite : comparaison des rapports isotopiques de gisements de cuivre de plusieurs îles des Cyclades (carrés) et des mines de cuivre de Cabrières (triangles gris, données de Prange et Ambert, 2005) : les signatures des minerais de Cabrières sont très dispersées par rapport aux signatures des Cyclades.

III/3.a Détection et suppression de valeurs aberrantes

Les signatures isotopiques du plomb de chaque gisement pourraient être utilisées directement mais il est préférable de s'assurer de l'absence de valeurs aberrantes pour chaque grande région. En effet, si un minerai présente une signature différente du reste des signatures régionales, il y a alors un risque que cette donnée isolée et non statistiquement valide se rapproche d'un artefact. Étant dans l'impossibilité de définir pourquoi cette donnée est « aberrante » (valeur erronée ou minéralisation qui n'est représentée que par une analyse), il est préférable de ne pas la considérer car, pour le moment, elle reste anecdotique.

Grandes régions considérées

Afin de définir la cohérence des données, il est premièrement nécessaire de découper le jeu de données en grandes régions géologiques. Les régions considérées correspondent en partie aux grandes régions exploitées et définies en partie 1 de cette thèse (Figure 197).

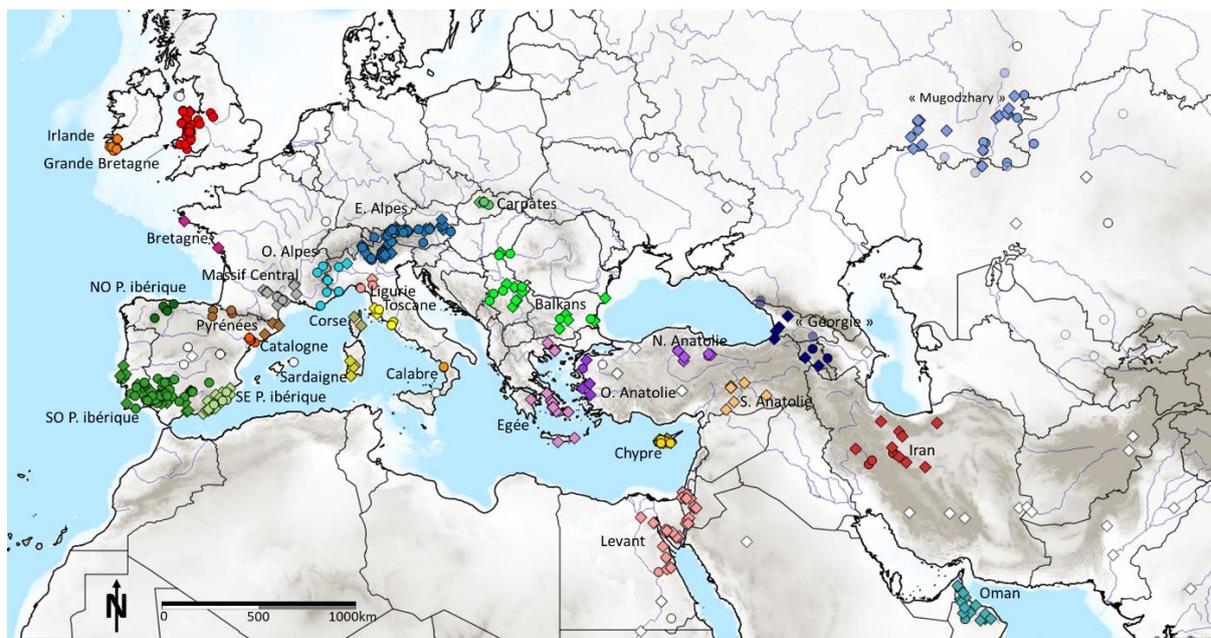


Figure 197 : Mines (cercles) et ateliers (losanges) des grandes régions minières définies en partie 1.

Certaines grandes régions minières, présentant de nombreuses zones minéralisées et ont été subdivisées en plusieurs sous-régions ayant une réalité géologique plutôt qu'archéologique²⁹⁷. Des régions où aucun indice d'exploitation (ou uniquement des indices douteux) n'a été repéré ont été prises en compte afin de vérifier qu'aucun artefact découvert dans ces régions ne puisse provenir de sources locales.

Ces grandes régions et sous-régions peuvent présenter une histoire géologique complexe et posséder des gisements d'âge et de type différents. Les points ne se projettent donc certainement pas dans un nuage de points unique pour chaque grande région : plusieurs groupes de minéralisations formant des nuages de points distincts peuvent être différenciés.

Il est également possible que certaines valeurs s'écartent de manière notable du ou des nuages de points correspondants aux signatures d'une zone minière. Dans l'exemple précédent de Cabrières (Figure 196) l'un des minerais analysés présente un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 21,53 alors que les autres ne dépassent pas 19,5. Il n'est alors pas possible de déterminer pourquoi cette valeur s'écarte de celles des autres analyses : il pourrait s'agir d'une erreur analytique ou encore refléter une mauvaise stratégie d'échantillonnage.

Utilisation d'une CAH afin d'isoler des valeurs aberrantes

Plusieurs traitements statistiques permettent de rechercher des valeurs aberrantes au sens mathématique de ce terme²⁹⁸. L'une de ces méthodes est notamment l'application de tests de Grubbs (Figure 198). Ce type de test ne peut cependant être appliqué que pour un rapport isotopique à la fois (et

²⁹⁷ L'est des Alpes a été scindé en deux zones (les Alpes centrales (italiennes) et le Tyrol autrichien) ; le pourtour égéen en 5 zones (Cyclades, Péloponnèse, Laurion, Canakkale, Thasos) ; la Grande-Bretagne en 3 (Pays de Galles, Cornouailles, Cumbria), etc.

²⁹⁸ Il s'agit de valeurs qui s'écartent fortement des valeurs des autres rapports isotopiques mesurés dans les gisements d'une zone minière (un ou plusieurs rapports isotopiques peuvent être anormalement faibles ou élevés).

non plusieurs) ce qui est problématique car il n'est pas possible de prendre en compte la dimensionnalité des signatures (soit au moins 3 rapports isotopiques à la fois).

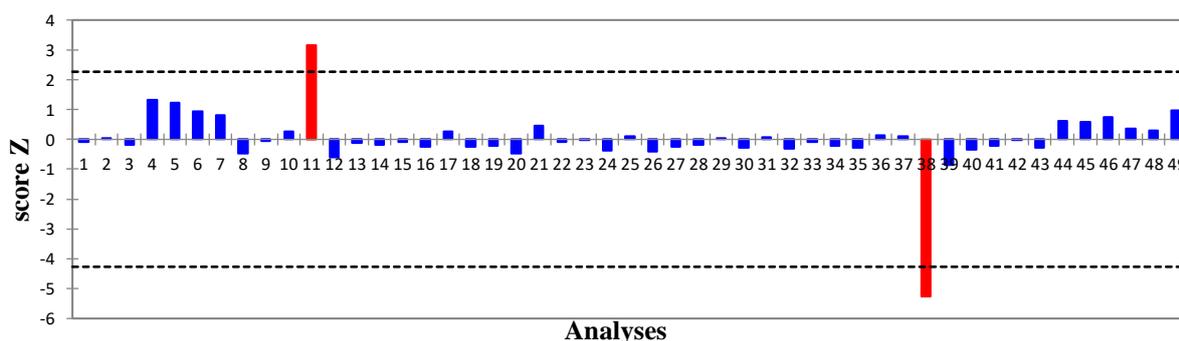


Figure 198 : Exemple de test de Grubbs réalisé sur le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de signatures de gisements bulgares. Deux valeurs aberrantes ont été identifiées suite à ce test : les analyses 11 et 38. Source : Tomczyk et al., 2019.

Afin d'isoler des valeurs aberrantes en prenant en compte plusieurs rapports isotopiques à la fois, le choix a été fait d'utiliser une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

Le principe de la CAH

Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet de rassembler des individus (ici les signatures isotopiques des minerais) selon leur ressemblance. Cette ressemblance s'exprime sous la forme d'une matrice de distances ou de similarité, correspondant à la distance²⁹⁹ entre chaque individu pris deux à deux : deux observations identiques auront une distance nulle³⁰⁰ et, à l'inverse, plus les deux observations seront dissemblables, plus la distance sera importante. Les signatures de minerais dont les distances sont les plus faibles sont ensuite regroupées : au départ, chaque échantillon est considéré comme une classe distincte puis les classes les plus proches les unes des autres sont fusionnées, créant ainsi une nouvelle classe qui représente un regroupement plus large.

Les résultats de la CAH sont présentés sous la forme d'un arbre de classification appelé dendrogramme. Des classes et sous-classes sont découpées au niveau de nœuds pouvant être prédéfinis par l'analyste (dans le cas où l'on sait au préalable combien de classes on souhaite obtenir) ou proposés par le logiciel de traitement statistique. Ne sachant pas en combien de classes les signatures régionales se subdivisent, nous utilisons la troncature proposée par le logiciel utilisé (XLSTAT version 2014.5.03).

Pas à pas des découpages réalisés

Les signatures des minerais de chaque région et sous-région précédemment définies ont fait l'objet d'une CAH. Les signatures s'isolant dans des classes regroupant 3 signatures ou moins ont été retirées des jeux de données³⁰¹ (elles correspondent aux données dans les feuilles « rejets » des

²⁹⁹ Plusieurs possibilités existent pour calculer ces similarités. Nous utiliserons ici la méthode la plus commune soit les coefficients de corrélation de Pearson (correspondant à la covariance des deux lignes comparées, standardisées par les écarts types).

³⁰⁰ La présence de doublons n'influence donc pas les résultats des CAH.

³⁰¹ La notion selon laquelle une classe statistique doit comporter plus de trois individus est une règle empirique et méthodologique utilisée pour assurer la fiabilité et la pertinence des analyses statistiques. Par exemple, avec moins de trois individus, les estimations statistiques (comme la moyenne, la variance, etc.) deviennent instables et peu représentatives de la population. Un échantillon trop petit ne capture pas suffisamment la variabilité des données, rendant les résultats moins fiables.

documents Excel où sont présentés les résultats des CAH). Une seconde CAH est ensuite réalisée afin de s'assurer que les groupes créés par la première CAH ne se subdivisent pas à nouveau en sous-groupes de taille très restreinte. Lorsque plus aucune signature ne s'isole, les données régionales sont considérées comme exemptes de valeurs aberrantes.

Par exemple, dans le cas de la zone de Linares (dans la péninsule Ibérique), les 57 signatures de gisements disponibles ont été soumises à une CAH. Le dendrogramme obtenu (Figure 199) souligne une très forte similarité des signatures mais 7 signatures s'isolent clairement : 5 à la droite du graphique et deux autres à sa gauche. Toutes les autres signatures (soit 48 analyses) se subdivisent en quatre classes statistiques représentées par plus de 3 individus.

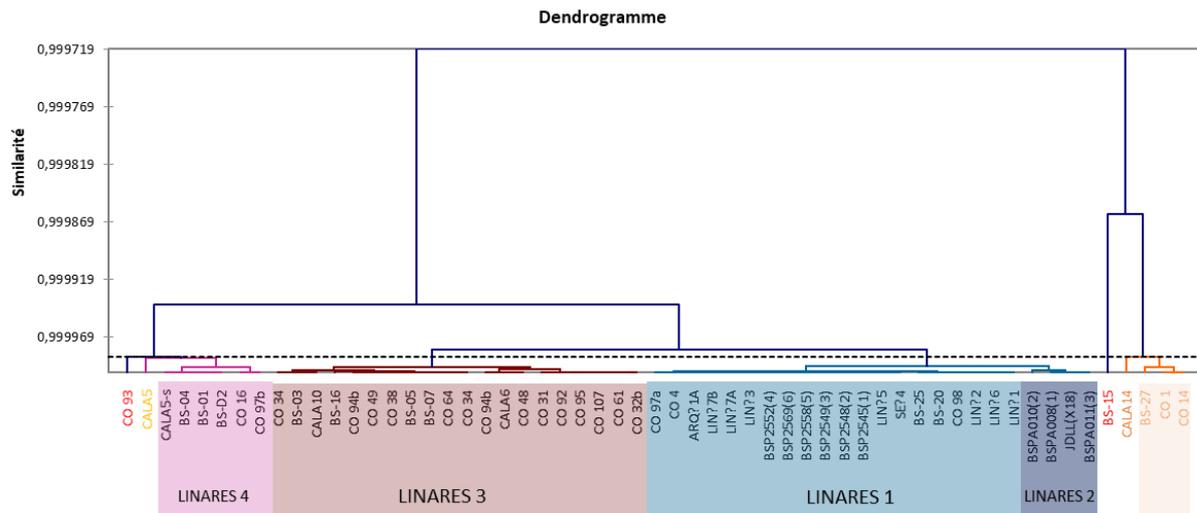


Figure 199 : Dendrogramme des signatures des minerais de Linares montrant clairement les quatre grandes classes dans lesquelles se répartissent les signatures et les sept autres valeurs considérées comme aberrantes. Les deux échantillons en rouge (CO 93 et BS-15) sont ceux isolés par la première CAH réalisée ; celui en orange (CALA14) ainsi que le groupe de trois signatures (BS-27, CO 1, CO 14) ont été isolés lors de la seconde CAH effectuée, celui en jaune (CALA5) lors de la quatrième CAH. La cinquième CAH effectuée n'a plus identifié de valeur isolée.

Dans cet exemple comme dans l'ensemble des autres régions et sous-régions traitées par CAH, il est courant que les minerais issus d'un même gisement se répartissent dans des classes distinctes. Ici, si les analyses dont l'identifiant commence par BSPAO (correspondant aux échantillons de la mine de la Carolina) sont très homogènes et se répartissent dans la même classe (Linares 2)³⁰², les minerais de la mine de Cala (los Dolores) dont l'identifiant débute par CALA se répartissent dans de nombreuses classes différentes.

Les analyses isolées à l'aide de la CAH n'auraient pas été clairement identifiables par simple lecture graphique, et ce même à l'aide d'une projection 3D (Figure 200).

³⁰² Le minerai portant l'identifiant JDLL(X18) et complétant cette classe est également issu de cette mine.

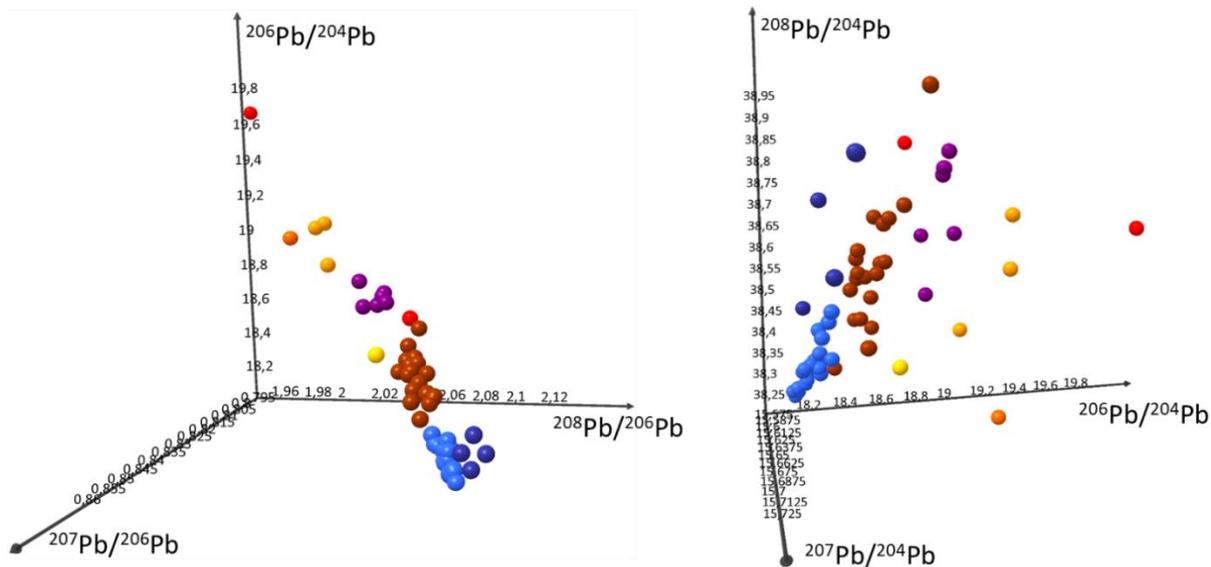


Figure 200 : Projections 3D des regroupements créés par CAH sur les rapports historiquement utilisés en archéométrie (à gauche) et sur les rapports normalisés sur le ^{204}Pb (à droite). Le code couleur utilisé est le même que celui utilisé du dendrogramme (Figure 199). Les signatures s'isolant dans le dendrogramme sont représentées en rouge, orange et jaune.

III/3.b Sélection de signatures de minerais pour chaque période étudiée

La question du choix des signatures de minerais qui seront comparées aux signatures d'artefacts pour chaque période étudiée est cruciale. Il faut s'assurer de disposer de signatures (i) issues de zones minières en activité et (ii) compatibles avec le métal dont la provenance est recherchée. Ainsi, même si des minerais de cuivre américains et des objets en plomb romains peuvent avoir des signatures proches, on ne peut retenir cette provenance, en fonction des données historiques qui font consensus (les Romains n'ont pas pu importer de minerais du continent américain qui leur était inconnu).

Le non-respect de cette règle simple peut conduire à émettre des hypothèses de provenances douteuses, si ce n'est erronées. Par exemple, Stos-Gale et Gale (2010) considèrent que des artefacts chypriotes en alliage cuivreux de l'âge du Bronze proviennent de gisements de plomb-argent médiévaux non cuprifères de la montagne Noire (Massif central). Plus récemment, une étude de Sun *et al.* (2016) publiée dans la prestigieuse revue Scientific Reports, a proposé une origine sud-africaine du cuivre présent dans des artefacts de l'âge du Bronze retrouvés en Chine³⁰³ !

Une attention particulière sera donc portée à la sélection des signatures de minerais prises en compte pour chaque période. La première partie de ce travail de thèse a montré que la localisation des mines a varié au cours du temps. Ainsi, les grandes régions productrices à considérer en priorité doivent nécessairement changer, et il n'est pas judicieux de sélectionner les mêmes données d'entrée pour chaque période chronologique. Nous pouvons néanmoins opérer une sélection en nous appuyant sur :

- Des signatures de minerais et d'artefacts triées par métal ;
- L'état de l'art concernant la localisation et la période d'activité des mines.

³⁰³ Ce résultat a été vivement critiqué, notamment par Liu *et al.* (2018) qui précisent que les signatures des minerais et celles des artefacts ne correspondent pas exactement et surtout qu'il manque des signatures de minerais chinois pour établir un résultat. Nous ne pouvons pas remettre en cause des vérités historiques établies depuis longtemps et sur des arguments multiples : l'Afrique du Sud, dans un monde où les échanges n'étaient pas mondialisés n'a pas pu importer du minerai ou des lingots chinois.

Cependant, rien n'exclut que :

- La période d'activité des mines connues soit plus large que la période d'activité supposée ;
- Des mines pourtant en activité durant la Protohistoire n'ont pas encore été découvertes ou ont été détruites.

Il est donc nécessaire de vérifier ces deux points lors de la sélection des zones minières prises en compte pour chaque période.

Tests des régions dont la présence de mines n'est pas avérée

Prendre en compte des régions où aucune mine n'a été découverte peut s'avérer pertinent car les isotopes du plomb permettent parfois de supposer la présence de mines dans des régions où ces dernières n'auraient pas encore été découvertes ou auraient été détruites (cf II/2.b de la partie 1). Néanmoins, la prise en compte de trop nombreuses régions peut apporter un risque supplémentaire de similarité des signatures et il n'est donc pas judicieux de lancer un traitement statistique sur l'ensemble des jeux de données disponibles.

Pour vérifier que les régions supposées non productrices de métaux le sont réellement, nous avons comparé les signatures des artefacts locaux avec celles des minerais régionaux. Ces analyses de similarité peuvent se faire par simples lectures graphiques ou à l'aide de statistiques multivariées, que nous détaillerons plus loin.

Des régions minières bien définies en isotopie et avec des correspondances nettes

Les régions bien définies et qui pourraient avoir produit des artefacts malgré le fait qu'aucune exploitation n'y ait été découverte sont assez peu nombreuses.

Il s'agit premièrement des mines du Laurion : les signatures des minerais seraient similaires avec 7 des 20 artefacts cuivreux découverts localement. Ce fait est en partie surprenant car les minerais locaux ne sont que très peu cuprifères (nous les avons classés «Cu Minor») mais la bonne correspondance entre les signatures du Laurion et les artefacts datés de 5500-4500 et 1600-1070 av. J.-C. (aucun artefact local daté de 4500-1600 av. J.-C. n'a été analysé) nous pousse à prendre en compte les signatures du Laurion dans le cadre de cette étude. Nous avons toutefois décidé de ne pas conserver le gisement de A. Konstantinos³⁰⁴ car signatures il possède une signature très différente du reste de la zone minière et ne présente pas de similarités avec les signatures d'artefacts.

Dans le Massif armoricain, 5 artefacts sur 7 pourraient avoir été produits avec du minerai de cuivre local. Deux d'entre eux sont datés de la période d'exploitation des ateliers (2500-2000 av. J.-C.). Une exploitation postérieure des gisements bretons est cependant envisageable car trois artefacts datés vers 1300 av. J.-C. pourraient avoir une source locale. La qualité de nos interprétations devra être pondérée par le fait que, dans ce cas également, les analyses de minerais ne portent pas directement sur des minéralisations cuprifères (les minéralisations sont classées « Cu Minor »).

Dans les Cornouailles, deux artefacts datés d'environ 1300 av. J.-C. sur les six locaux présentent des signatures compatibles avec les signatures des gisements locaux. Cette région peut donc être prise en compte pour ce pas de temps afin de discuter qu'elle ait pu produire du cuivre (actuellement seule l'exploitation de l'étain y est reconnue mais les gisements de cuivre sont abondants dans cette région).

³⁰⁴ Correspondant à la classe 4 discriminée par la CAH réalisée.

Dans le nord-ouest de la Bulgarie, au pied de la chaîne des Balkans, le district minier d'Iskar Vratsa présente des signatures compatibles avec celles des artefacts chalcolithiques découverts localement (Figure 201). Ces similarités reposent cependant sur des signatures acquises dans le cadre d'une étude à visée géologique (par Von Quadt *et al.*, 2005). La prise en compte des seules données d'Oxalid ne permet pas de définir une correspondance claire entre les signatures des artefacts et des minerais ; ceci pourrait expliquer que Pernicka *et al.* (1997) ne leur ont pas attribué pas une origine locale.

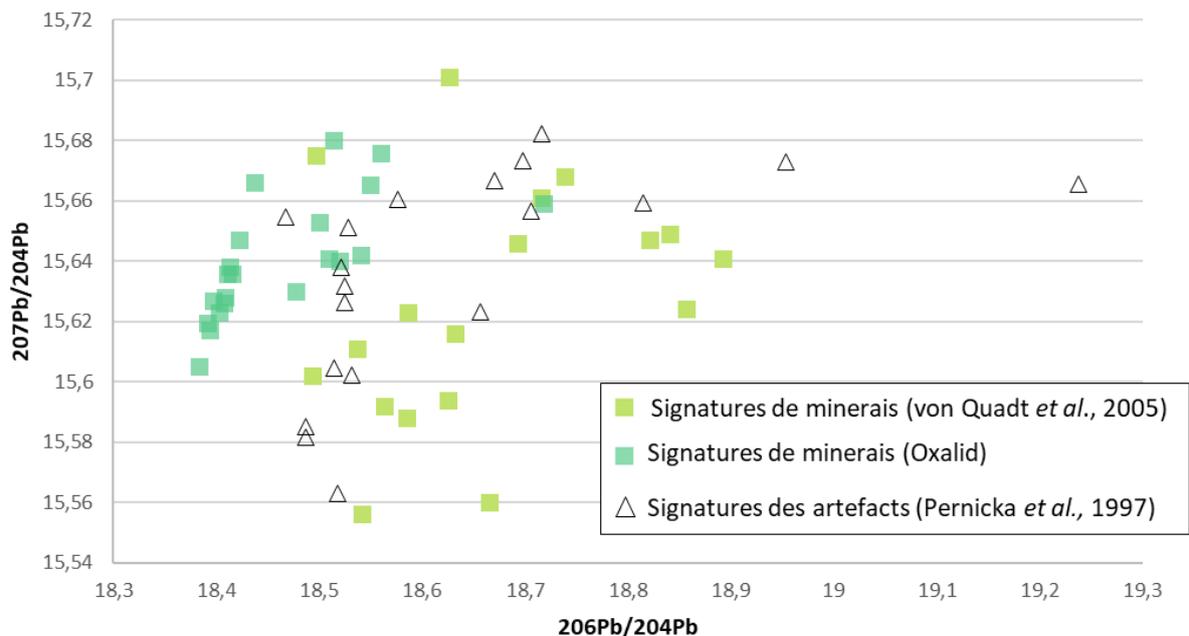


Figure 201 : Projection des signatures de minerais d'Iskar Vratsa (carrés) et des artefacts analysés (triangle).

Ces régions ne présentant pas de mines connues datées du Néolithique ou de l'âge du Bronze, doivent tout de même d'être considérées comme des sources possibles de cuivre pour les périodes où des minerais locaux auraient pu être exploités. La comparaison des signatures des minerais avec d'autres régions où la présence de mines est avérée permettra de déterminer si la provenance locale des artefacts est ou non l'hypothèse la plus plausible à retenir.

Des régions minières bien définies en isotopie mais aucune correspondance avec les artefacts

Toujours dans le cas où les signatures de minerais sont nombreuses et peu dispersées, il arrive régulièrement que les artefacts présentent des signatures beaucoup plus « hautes » ou plus « basses » que les signatures locales. Ces régions ne présentant aucune mine protohistorique et n'ayant pas produit le métal constituant les artefacts locaux ne sont très probablement pas productrices de métaux.

Plusieurs cas de ce type ont été repérés : dans le Hartz, dans la petite région alpine de Carnie, dans les monts Metallifères ou encore en Scandinavie (Figure 202).

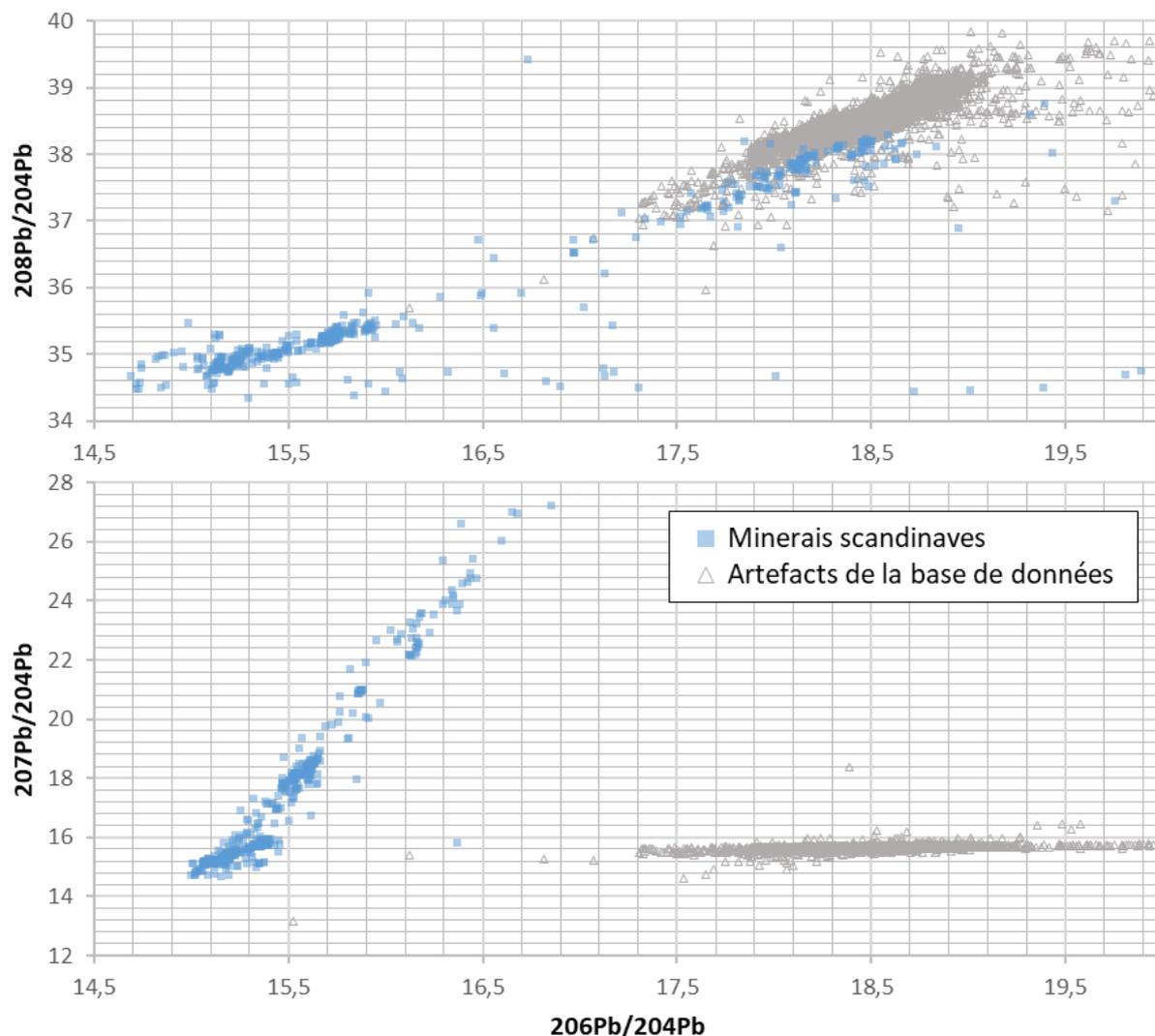


Figure 202 : Comparaison des signatures isotopiques du plomb des gisements scandinaves et de l'ensemble des artefacts de la base de données. L'observation du diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montre qu'aucune correspondance ne peut être mise en évidence : les artefacts analysés ne peuvent pas être issus de gisements du bouclier scandinave (la signature de ces gisements diffère fortement des autres gisements européens du fait de leur âge très ancien (Anders Nord et Billström, 2018)).

Dans les Balkans, les gisements du district minier de Panagyurski ne semblent pas avoir été exploités, car aucun artefact local ne présente cette signature mais des travaux récents (Liev *et al.*, 2007) suggèrent qu'une partie des productions de la nécropole de Varna pourrait provenir de ce secteur. Par conséquent, bien qu'initialement négligé, nous avons décidé de prendre en compte ce district minier dans notre analyse.

Des régions minières mal définies en isotopie mais ayant peut-être produit du métal

Il est fréquent que les régions minières ne soient caractérisées que par très peu d'analyses de minerais (l'absence de mines n'y a certainement pas motivé de travaux de caractérisation des gisements). Dans l'immense majorité des cas, ces régions mal caractérisées n'ont fourni aucune correspondance avec les artefacts locaux.

Néanmoins, les signatures de quelques-unes d'entre elles se rapprochent de celles d'artefacts. Par exemple, la Pologne manque terriblement de données de signatures de minerais. Seules 3 analyses

de gisement de cuivre ont été réalisées dans la localité de Przeuszyn (sud du pays). Toutefois, parmi les trois artefacts datés 3650-3100 av. J.-C. localisés à environ 70 km de ce gisement, un artefact semble présenter cette signature isotopique. La quantité d'analyses est trop faible pour pouvoir être sûrs de cette hypothèse de provenance locale ; il est néanmoins certain que ce secteur mériterait de faire l'objet de travaux de caractérisation.

Il en va de même pour le nord de l'actuelle Bosnie-Herzégovine et le sud de la Croatie où très peu de signatures de minerais sont disponibles (seules 6 analyses caractérisent cette très grande région). L'une de ces 6 analyses porte sur le gisement de Bistra (Zagrebacka gora). Cette unique analyse, qui plus est ancienne (Palinkas, 1985), présente des rapports isotopiques proches de certains artefacts locaux. Ce gisement de chalcopryrites et bornites pourrait potentiellement avoir été exploité entre 3000 et 1050 av. J.-C. et mériterait d'être plus amplement caractérisé (une seule analyse de minerai ne permettant pas de formuler des hypothèses assurées de provenance).

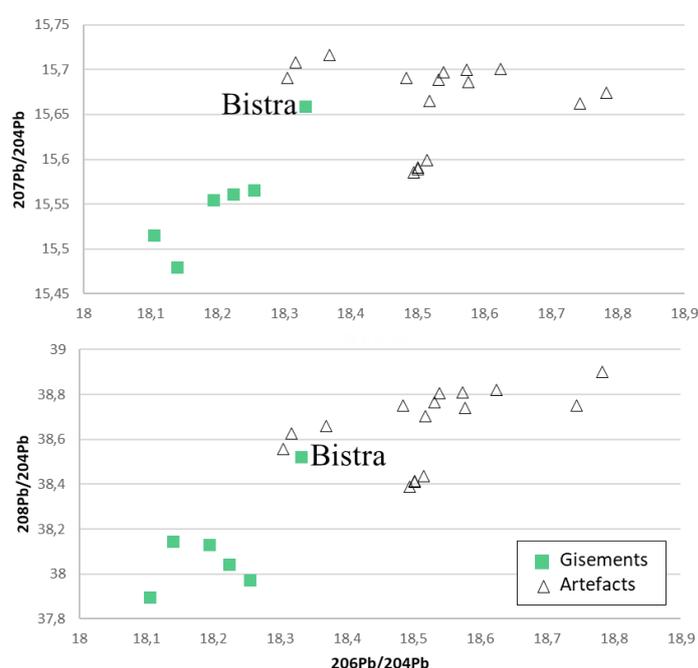


Figure 203 : Projections des rapports isotopiques normalisés sur ^{204}Pb des gisements et des artefacts découverts dans le sud de la Croatie et le nord de la Bosnie

Deux régions de Grèce sont dans le même cas : la Thessalie et le Péloponnèse. La très faible quantité de minerais analysés ne permet pas de déterminer avec certitude si des minerais locaux ont pu être utilisés pour produire des artefacts.

Ces régions très peu caractérisées en isotopie du plomb ne peuvent pas être prises en compte, elles mériteraient d'être mieux caractérisées.

Régions dont la présence de mines est avérée

Si la présence de mines dans des régions où aucune exploitation n'a été découverte est un élément important à considérer, l'exploitation des mines à des dates antérieures ou postérieures aux périodes d'exploitation connues est tout autant importante à vérifier. Dans l'immense majorité des cas, les artefacts locaux sont contemporains des exploitations minières :

- Dans les Asturies, les mines d'El Aramo, El Milagro et de La Profunda sont en exploitation entre 2900 et 1600 av. J.-C. Les artefacts locaux analysés sont contemporains des périodes d'activité des mines (2200 à 1600 av. J.-C.)³⁰⁵. Il n'est donc pas possible de savoir si ces mines ont pu être exploitées en dehors des périodes connues d'extraction ;
- Dans le sud de l'Irlande, peu d'artefacts locaux ont été analysés et tous sont contemporains de la période d'exploitation des mines (2400-1500 av. J.-C.) ;
- En Slovaquie, peu d'artefacts ont été analysés mais ces derniers présentent des signatures similaires aux minerais exploités localement aux mêmes périodes ;
- En Catalogne, certains artefacts en plomb seraient contemporains de l'exploitation des mines (à la toute fin de la période étudiée) ;
- Dans la péninsule d'Oman, les artefacts découverts à Tell Abraç ne semblent clairement pas locaux. Les autres artefacts omanais sont contemporains des mines identifiées et ils pourraient être issus de la fonte de cuivre local ;
- Dans le sud des Balkans, seul un atelier est connu dans la région de Rhodope et pourtant de nombreux artefacts semblent locaux. La signature des gisements de cette région est cependant extrêmement dispersée ;
- Les artefacts chypriotes sont majoritairement contemporains des mines et en seraient pour beaucoup issus³⁰⁶.

Certaines zones minières en exploitation ne présentent pas de correspondances claires entre minerais et production locale :

- Dans les Baléares, du cuivre très pur a été extrait entre 1876 et 1627 av. J.-C. puis entre 1432 et 1214 av. J.-C. mais les artefacts en bronze (tous retrouvés dans des nécropoles) et assez mal datés (~2400 à 500 av. J.-C.) ne présentent pas la même signature géochimique que celles des mines ; le métal des artefacts analysés n'est donc pas d'origine locale ;
- Les signatures des mines d'Ai Bunar ne présentent pas de correspondances avec les artefacts locaux et seules deux scories pourraient être locales ;
- Les lingots découverts dans la région d'Abu Matar (Israël, Levant) ne semblent pas présenter une origine locale ;
- En Ligurie, quelques artefacts pourraient être issus de minerais locaux mais le faible nombre d'analyses de minerai appelle à la prudence. Les mines de Libiola et de Monte Loreto connues pour avoir été exploitées, n'ont pas la même signature que les artefacts locaux analysés ;
- Si de nombreuses exploitations sont connues dans le sud-est de la péninsule Ibérique ainsi que dans sa *Pyrite Belt*, peu d'artefacts qui y ont été découverts semblent clairement avoir été réalisés avec du métal local.

Quand les signatures de scories et de minerais sont différentes, il faut émettre l'hypothèse que certaines zones pourraient présenter des mines encore à découvrir et/ou qu'il pourrait s'y produire des mélanges de sources :

³⁰⁵ Ils possèdent des signatures isotopiques comparables à celles des minerais et des teneurs élevées en arsenic, ce qui correspond aux productions issues des minerais exploités dans les mines locales.

³⁰⁶ Il y a des exceptions, par exemple l'ensemble des artefacts des tombes de Kyrenia, North (Lapithos) n'ont pas une origine locale.

- Les données toscanes indiquent que le gisement de Montecatini V. di Cecina s'isole parfaitement des autres minéralisations locales et il semble possible d'affirmer qu'il n'a pas produit de cuivre. Toujours dans le cas de la Toscane, seule la moitié des scories semblent locales. Il semble donc qu'un gisement en activité ait pu ne pas y avoir été identifié ou que des mélanges de sources de minerais aient pu avoir lieu dans les ateliers de métallurgie extractive ;
- De même, très peu de mobilier archéologique a été analysé dans la province de Linares (péninsule Ibérique). Si les gouttelettes de métal présentent des signatures similaires à celles de gisements locaux, une fois encore, les scories ne semblent étrangement pas présenter de signatures locales ;
- Les scories découvertes dans les Cyclades ne présentent également pas une signature similaire à celles des minerais locaux mais très peu de minerais y ont parfois été analysés (à Kythnos seuls trois minerais ont été analysés pour une trentaine de scories) ;
- Dans le centre de la Serbie, les scories de Rudnik ne présentent étrangement pas une signature locale contrairement aux autres artefacts analysés dont la provenance pourrait être locale. Une partie des gisements ne présentent pas des signatures similaires à celles des artefacts et nous avons décidé de ne pas les retenir dans notre analyse de provenance.

Des régions exploitées à des périodes plus larges que celles déjà connues ?

Bien que les ateliers connus en Sardaigne soient tous localisés au sud de l'île, trois zones minéralisées peuvent être distinguées : « sud », « nord-ouest » et « nord-est ». Aucun artefact sarde ne présente la signature des gisements du nord-est de l'île³⁰⁷. Les minéralisations du nord-ouest auraient en revanche pu produire le métal contenu dans certains artefacts locaux (sans que la correspondance ne soit avérée avec certitude). Nous avons retenu cette zone en plus du sud de l'île où l'analyse de lingots planno-convexes permet de supposer une exploitation qui pourrait remonter dès 2300 av. J.-C. (la datation de ces lingots est néanmoins très mauvaise).

Sur l'île de Thasos, les artefacts locaux ne semblent pas provenir de sources locales, à l'exception de quelques artefacts datés de 1100-850 av. J.-C., soit bien après la période d'exploitation minière connue. Nous prendrons donc en compte cette période d'exploitation potentielle de 1100-850 av. J.-C.

Dans le nord de l'Angleterre (Écosse/Cumbria), si aucune mine n'est connue, deux pollutions de tourbières permettent de supposer une exploitation locale à la fin de l'âge du Bronze (Toddle Moss (940 à 670 av. J.-C.) et Raeburn Flow (1150 à 800 av. J.-C.)). Les artefacts datés entre 950 et 800 av. J.-C. pourraient être de source locale alors que les artefacts plus anciens (2400-2000 av. J.-C. mais aussi 1300-1150 av. J.-C.) ne le sont clairement pas. Nous considérerons donc cette région dans le cadre de cette recherche pour les deux dernières périodes (1300-800 et 800-400 av. J.-C.).

Des régions minières pour lesquelles il n'y a pas assez d'analyses d'artefacts ou de minerais pour statuer

Des mines sont connues dans le centre de l'Espagne mais seules 5 analyses de minerais ont été réalisées dans ce grand espace géographique et seulement deux de ces analyses concernent des gisements de cuivre. Trois artefacts présentent de très bonnes correspondances de signatures avec les gisements

³⁰⁷ Ce résultat n'est que peu surprenant car la majorité des gisements de cuivre sardes sont localisés dans le sud de l'île (Naitza *et al.*, 2024).

locaux mais la mauvaise caractérisation de cette région ne permet pas sa prise en compte (il n'est pas possible de baser une interprétation statistiquement valide sur seulement 2 analyses de minerais). Il en va de même pour les gisements de Cadinje (dans le centre de la Serbie) : aucun artefact ne semble issu de minerais locaux mais trop peu de minerais ont été analysés pour en avoir la certitude.

Les gisements de cuivre du Massif central sont mal caractérisés. Par exemple, le secteur de l'atelier de métallurgie extractive d'Al Claus (Aveyron) n'est caractérisé que par 4 analyses de gisements où le cuivre est quasiment absent (« Cu Minor»). Le reste du sud du Massif central, présente des signatures extrêmement hétérogènes qui reflètent la complexité des phénomènes hydrothermaux qui s'y sont déroulés. Le nettoyage des données aberrantes ne nous a permis de ne conserver qu'une seule des neuf analyses réalisées à Cabrières tant ces dernières sont hétérogènes et manquent de cohésion avec le reste des données régionales. On peut regretter qu'aucune étude géologique n'ait accompagné le choix des analyses de minerais retrouvé sur ce site exceptionnel. Dans le nord du Massif central, si des paléopollutions suggèrent une activité de métallurgie extractive et/ou d'élaboration, le secteur est trop mal caractérisé et trop peu d'artefacts ont été analysés pour valider l'hypothèse d'une possible activité minière.

Dans les Pyrénées, le manque d'analyses isotopiques de gisements est lui aussi criant malgré la présence de mines, en particulier dans la partie occidentale du massif.

Les Alpes centrales et de l'est présentent une très bonne couverture isotopique mais les gisements de cuivre autrichiens localisés les plus à l'est n'ont pas encore été analysés malgré une concentration très importante d'ateliers.

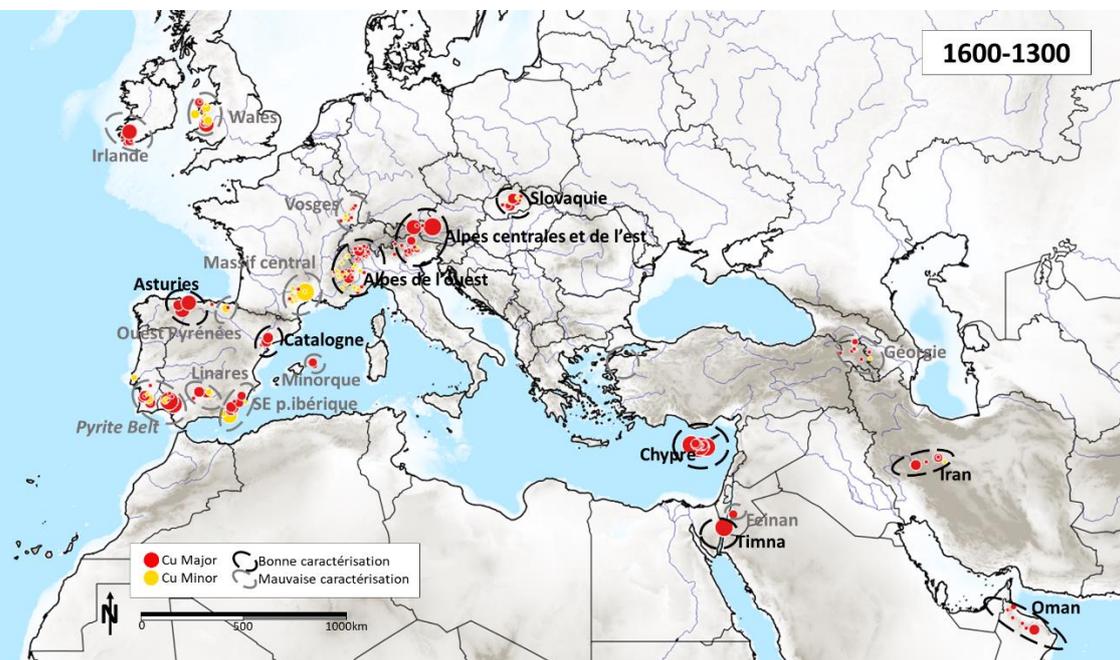
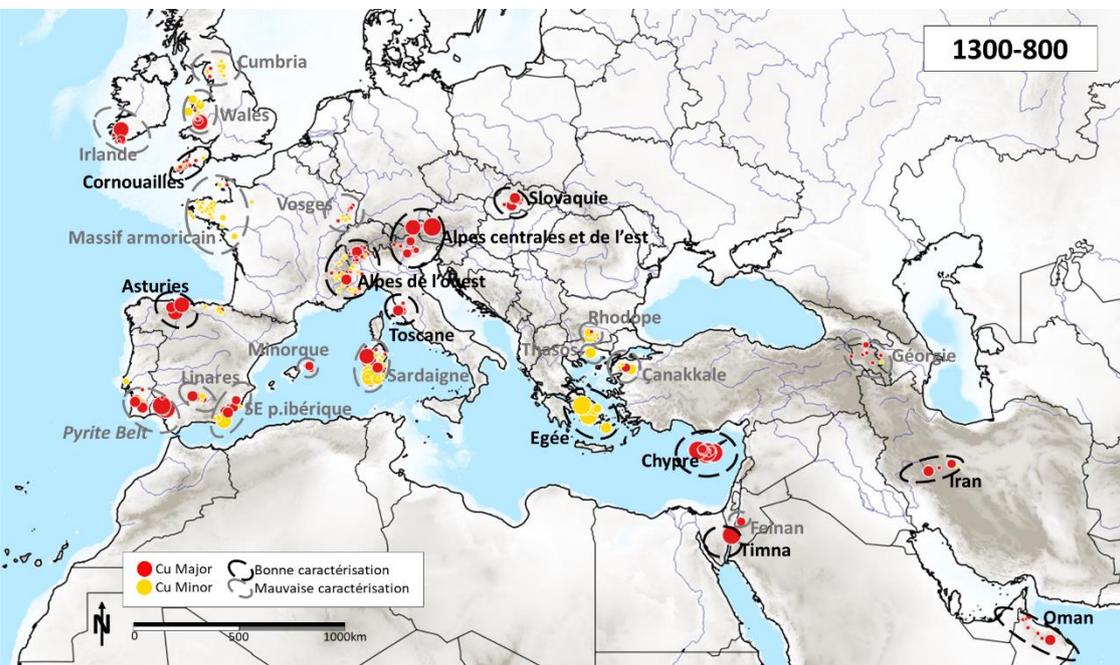
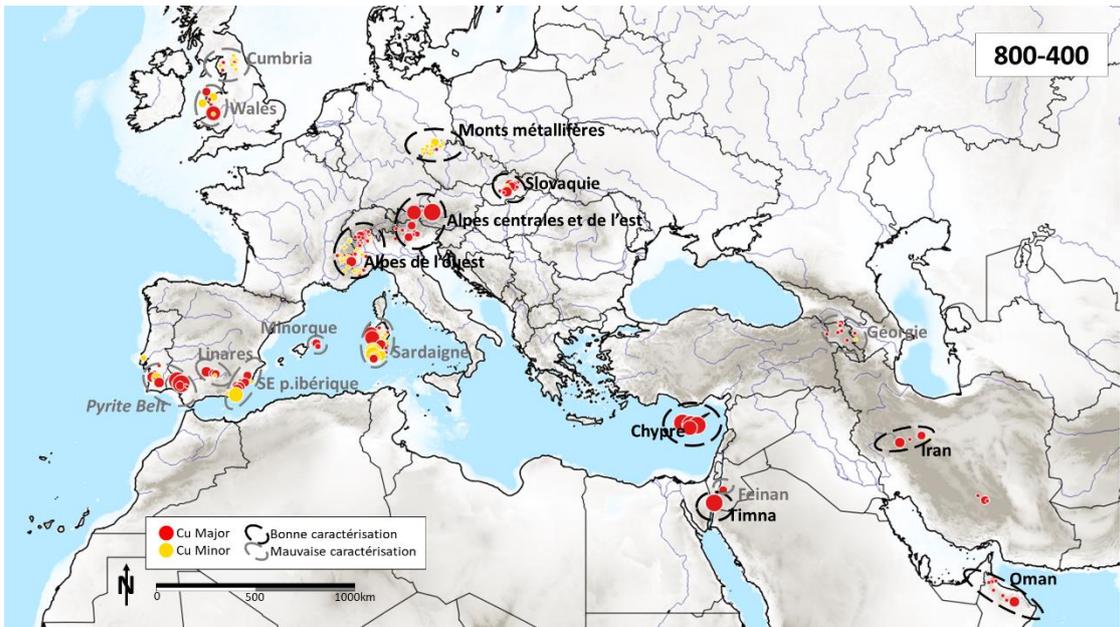
À ces régions s'ajoutent la Corse, la Calabre, le centre de l'Espagne, le district de Faro (Portugal), une partie du Levant (en particulier le désert du Sinaï et le désert oriental/arabique), dont les mines et ateliers n'ont pas été caractérisés en isotopie du plomb.

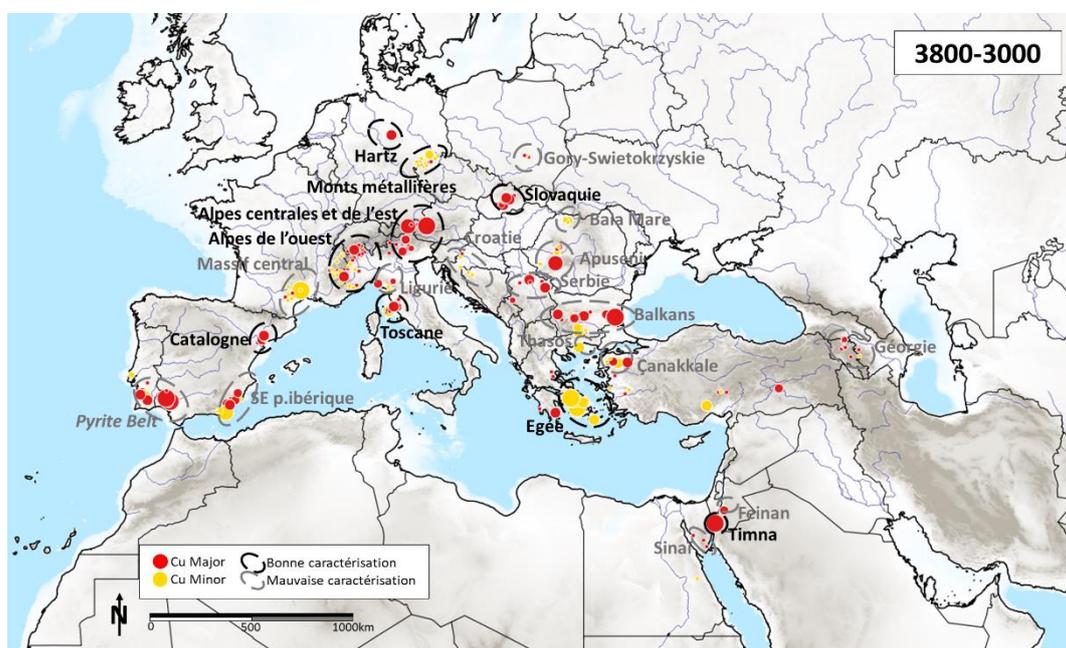
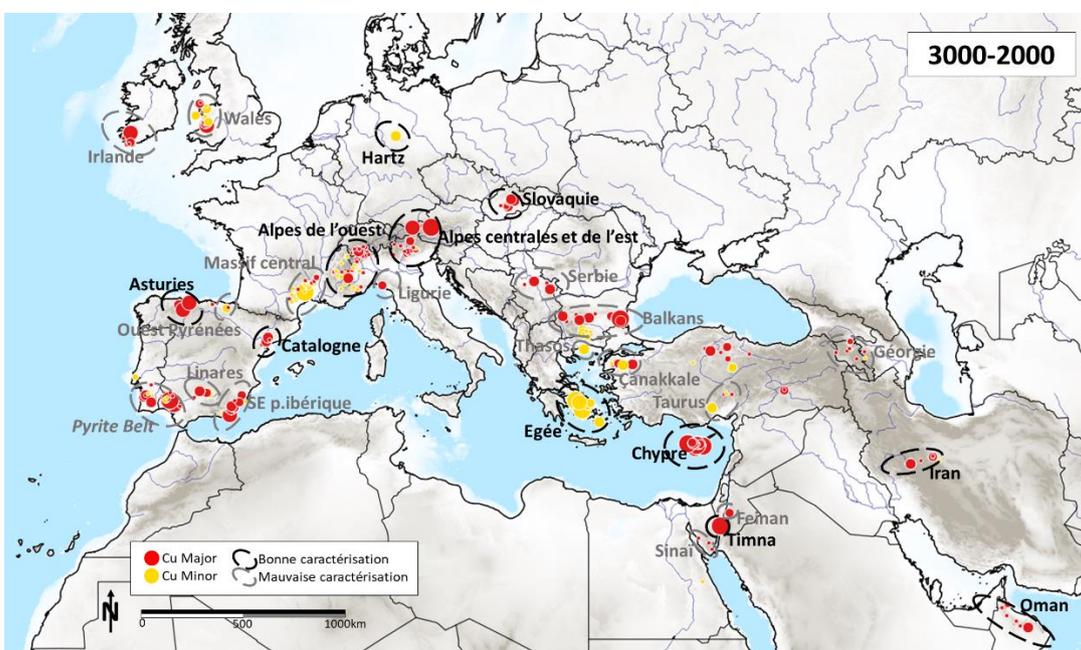
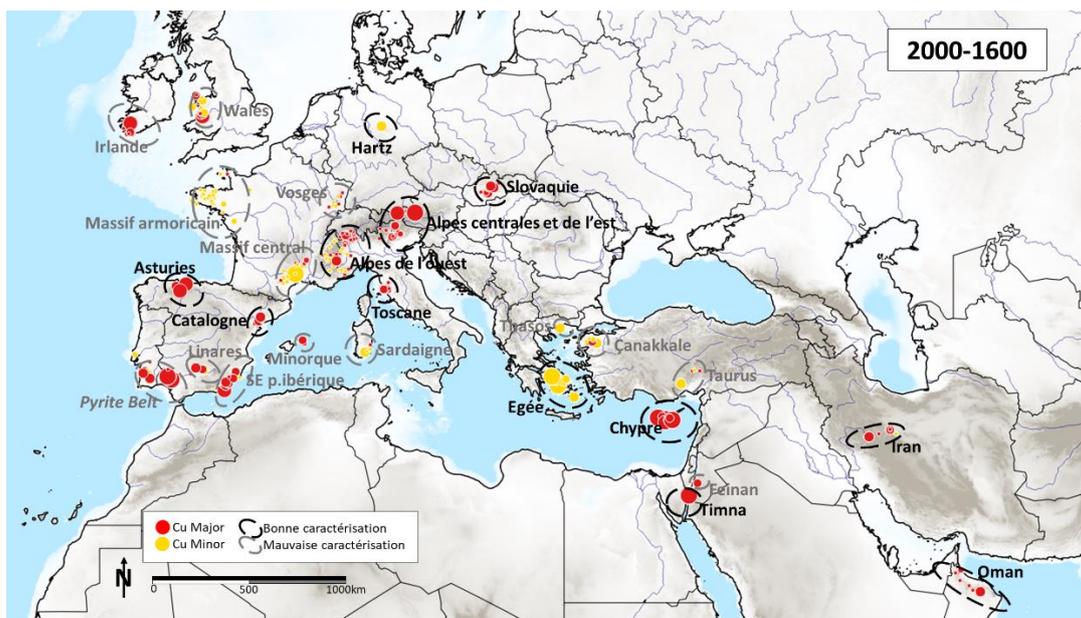
III/3.c Régions retenues pour réaliser les comparaisons par période

Toutes les régions où des exploitations minières sont avérées ne peuvent pas être prises en compte car elles n'ont pas toutes fait l'objet d'analyses isotopiques du plomb. C'est le cas notamment des Pyrénées ou encore de la France. De plus, certaines régions productrices de métaux sont mal caractérisées en isotopie du plomb :

- Car les analyses ne portent pas directement sur des minéralisations de cuivre/de plomb ;
- Car les analyses sont peu nombreuses ;
- Car les signatures sont très hétérogènes.

Ainsi, certaines régions, caractérisées par de nombreuses signatures isotopiques du plomb, qui plus est, homogènes, auront nécessairement plus de chances d'être identifiées comme des sources probables : il s'agit de Chypre, de l'Égée, des Alpes, du district de Timna. À l'inverse, des zones sources aux signatures peu nombreuses et hétérogènes seront très difficilement rapportées à des artefacts (Voges, Feinan, Géorgie). Des zones caractérisées par de nombreuses signatures très hétérogènes se confondront avec d'autres grandes zones hétérogènes (îles Britanniques, Massif armoricain, péninsule Ibérique, Massif central, Balkans). Pour chaque période la qualité des signatures sont donc variables (cf cartes en Figures 204 et 205)





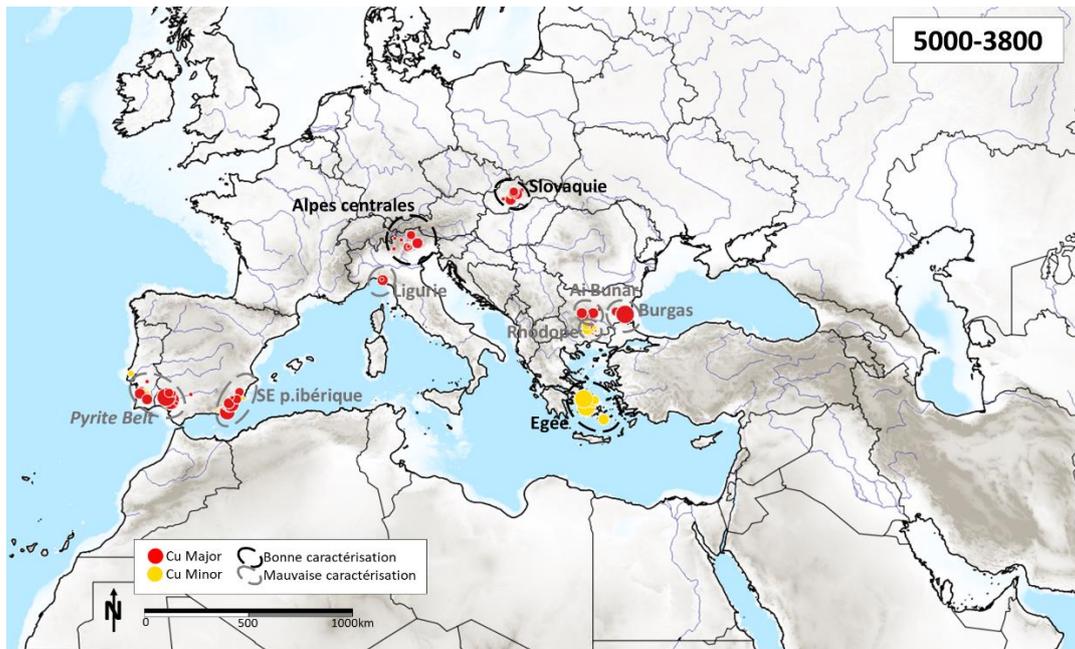
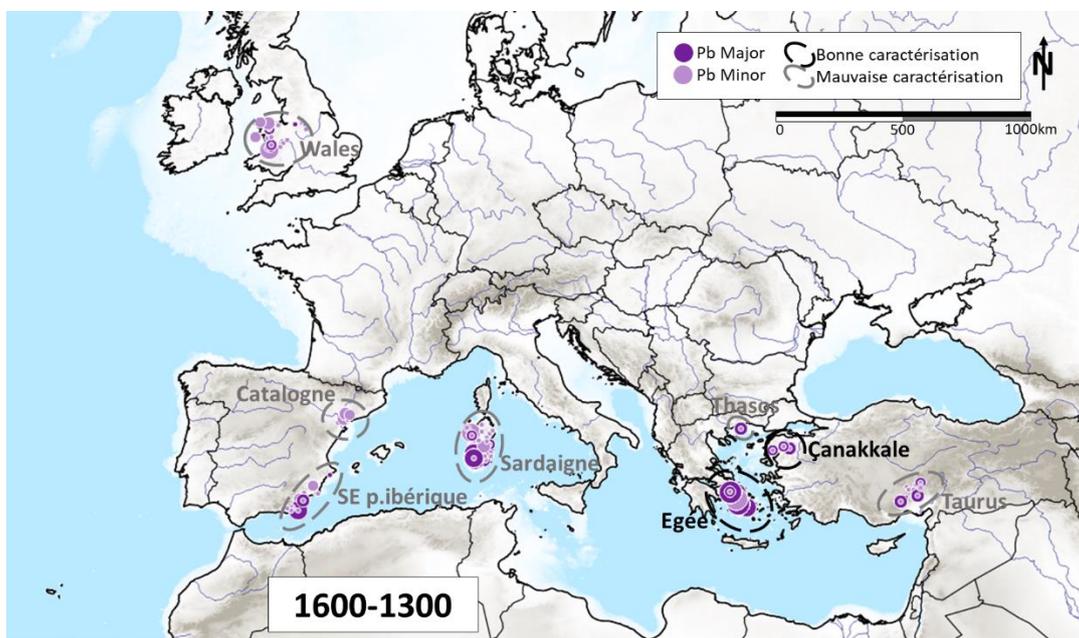
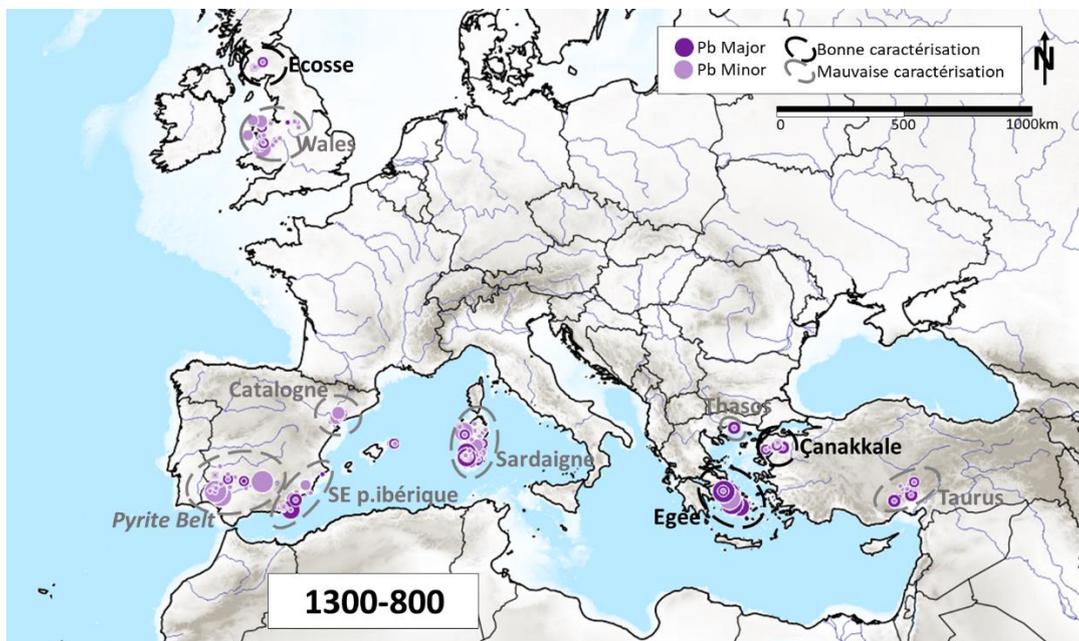
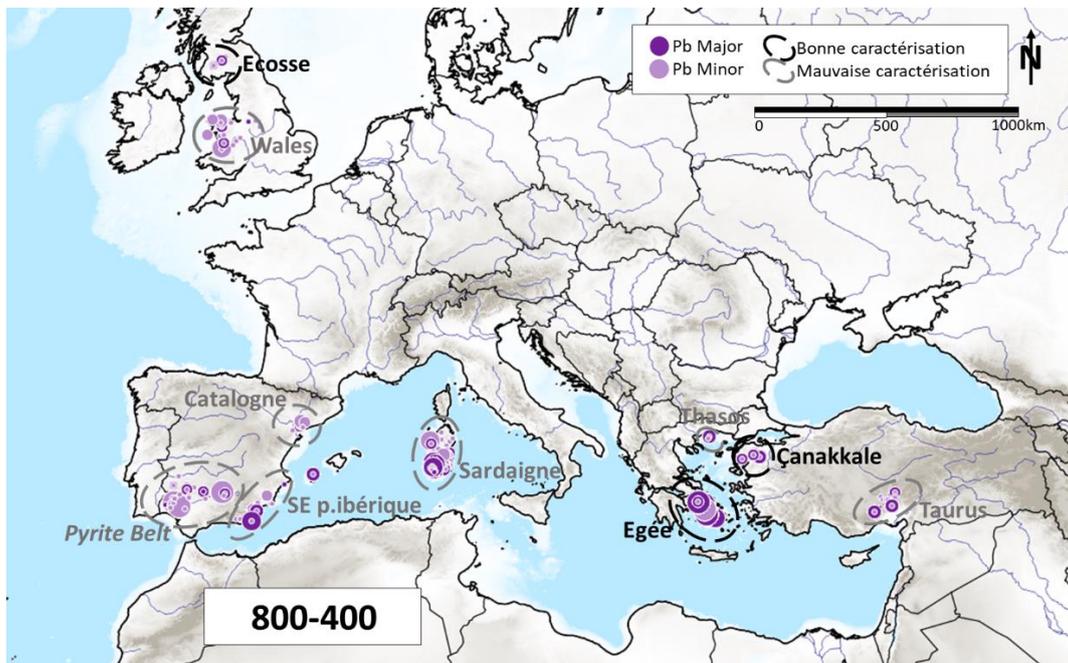


Figure 204 : Signatures isotopiques du plomb de minerais prises en compte par périodes ; référentiel pour le cuivre. Les régions cerclées en gris présentent des signatures hétérogènes, celles cerclées en noir présentent des signatures homogènes.



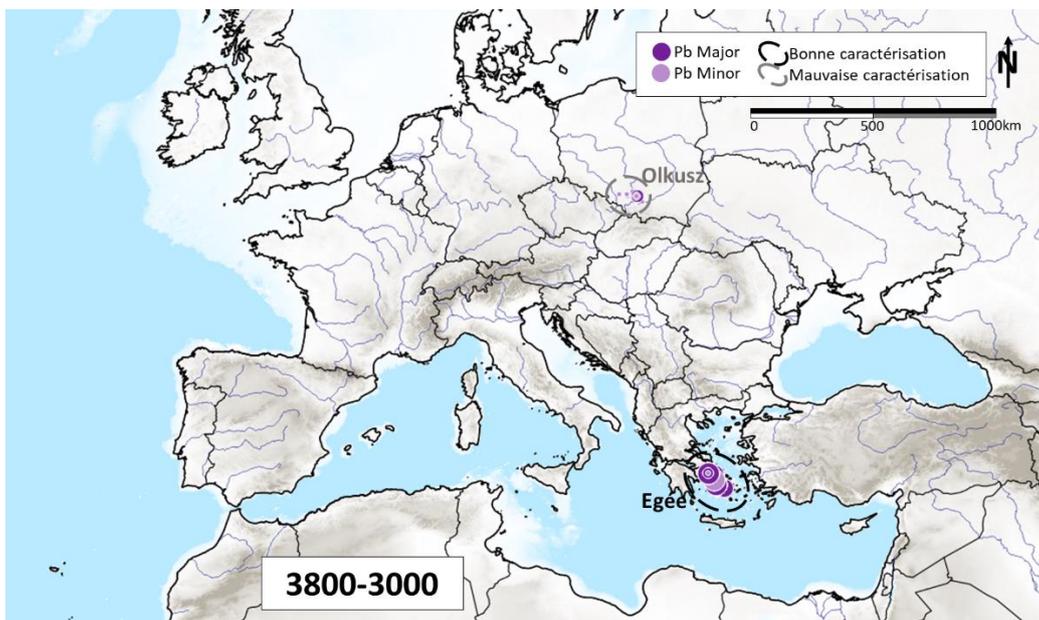
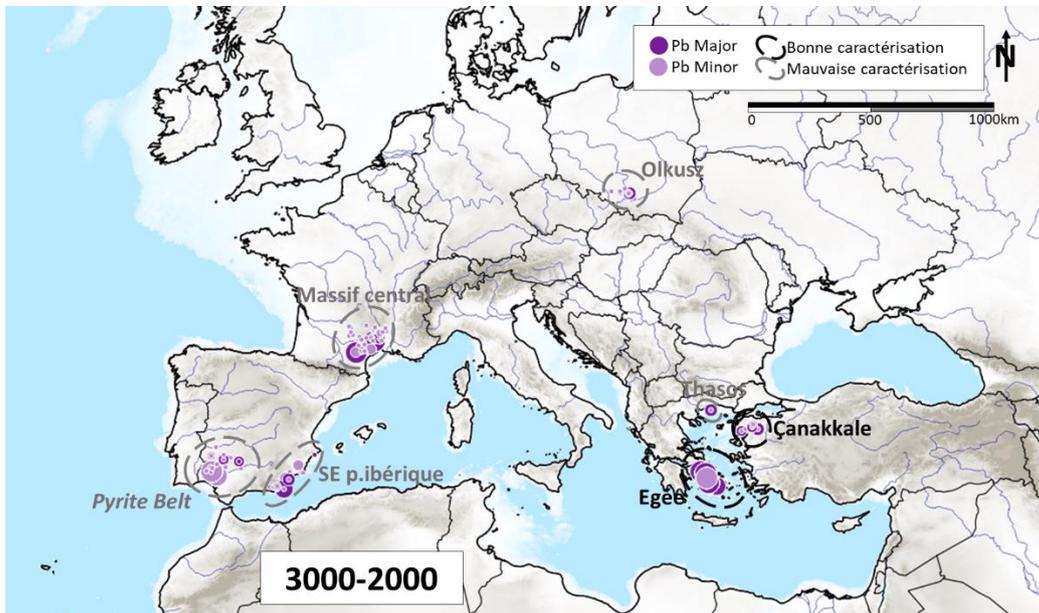
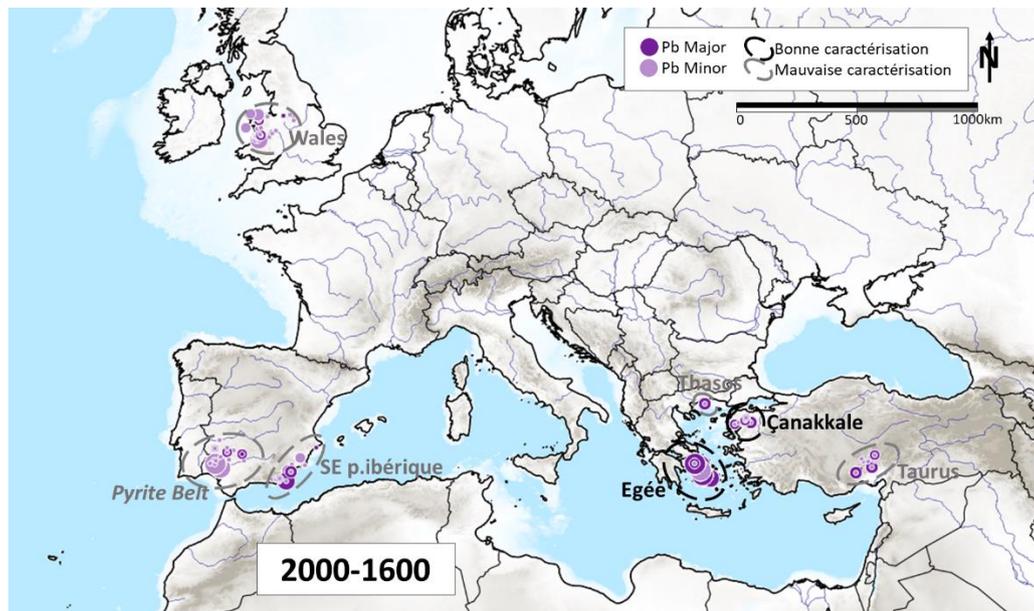


Figure 205 : Signatures isotopiques du plomb de minerais prises en compte par périodes ; référentiel pour le plomb. Les régions cerclées en gris présentent des signatures hétérogènes, celles cerclées en noir présentent des signatures homogènes.

IV/ Tracer les provenances à l'aide de statistiques multivariées

IV/1 État de l'art des méthodes d'étude de provenance

IV/1.a Abondances naturelles transformées en rapports isotopiques

Quelle que soit la méthode de traçage de provenance utilisée, un premier élément ne faisant que peu consensus auprès des chercheurs concerne les rapports isotopiques considérés. Comme nous l'avons déjà évoqué, les spectromètres de masse quantifient une teneur pour chaque isotope du plomb dans un échantillon. Les abondances des 4 isotopes quantifiés (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb) sont ensuite transformées en rapports isotopiques (ce sont ces rapports isotopiques qui sont publiés et non les abondances de chaque isotope). Le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (ou beaucoup plus rarement son inverse : $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) est toujours utilisé, les deux rapports l'accompagnant varient selon les publications. Ainsi, 77,8 % des plus de 6 000 analyses isotopiques du plomb d'artefacts cuivreux recensés dans le cadre de ce travail de thèse ne présentent que les rapports $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ³⁰⁸. Il est cependant possible de recalculer l'ensemble des rapports isotopiques à partir de trois d'entre eux par un simple produit en croix :

- $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \times ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
- $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \times ^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

La question du rapport à utiliser est peu débattue et témoigne plus d'un état de l'art qui diffère entre deux disciplines : les chercheurs issus des géosciences utilisent généralement les rapports normalisés à l'isotope stable soit le ^{204}Pb alors que la norme en archéométrie a longtemps été d'employer les rapports $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Peu d'études se posent la question des informations apportées par chacun des rapports pouvant être pris en compte. En s'appuyant sur les travaux de Faure (1986), Giunti (2011) indique dans son manuscrit de thèse que :

- Le diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ correspond à un indice d'âge : ^{207}Pb provient de la désintégration radioactive de l' ^{235}U et l'isotope ^{206}Pb de celle de l' ^{238}U . Ces deux atomes d'uranium ont des propriétés physico-chimiques très proches et présentent donc un comportement quasi similaire dans les différents réservoirs. Cette propriété permet d'éliminer plusieurs autres facteurs pouvant compliquer le calcul de l'âge de la minéralisation et donc d'estimer plus facilement l'âge de la mise en place de la minéralisation.
- Le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ correspond à un indice caractérisant les réservoirs géologiques : ^{208}Pb est dérivé de la désintégration du ^{232}Th et ^{206}Pb provient de l' ^{238}U . Or, l'uranium et le thorium sont deux éléments au comportement physique et chimique différent. Leur combinaison peut donc être utilisée pour caractériser différentes sources métallogéniques³⁰⁹.

³⁰⁸ Certains auteurs publient préférentiellement les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ou encore les 5 rapports possibles, mais ces derniers ont longtemps été minoritaires.

³⁰⁹ Ceci n'est possible que si l'on analyse du plomb ayant subi une seule formation (modèle à une seule étape) : la teneur en thorium est très variable d'une roche à l'autre, car ce composant a un comportement physico-chimique très complexe.

- Le diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ne permet pas d'interprétation géologique. Les signatures s'alignent sur une ligne droite et le diagramme contient donc beaucoup moins d'informations car les données ne couvrent qu'un espace linéaire réduit.
- Le diagramme $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ n'apporte également pas d'informations concernant les gisements source mais correspond à un indice de précision, car il ne considère pas le ^{204}Pb dont l'abondance relative est très faible et dont l'interférence avec le ^{204}Hg nécessite une correction.

Le problème du bruit apporté par la prise en compte du ^{204}Pb est également souligné par Albarède *et al.* (2020)³¹⁰. Outre une possible correction incorrecte des interférences avec le ^{204}Hg , des rendements incomplets pendant la chimie de purification du plomb ou encore des conditions inhabituelles d'oxydations des gisements peuvent facilement conduire à une mauvaise quantification de cet isotope. Les auteurs indiquent cependant que les données nouvellement acquises reproduisent souvent la courbe de croissance des isotopes du plomb et que les lignes de biais et de fractionnement de masse sont beaucoup moins fréquemment observées dans les signatures quantifiées récemment. Ainsi, selon eux, la spectrométrie de masse par MC-ICPMS semble avoir résolu les problèmes analytiques associés au biais de masse instrumental³¹¹.

Une méthode permettant de déterminer quels rapports isotopiques sont les plus discriminants (donc ceux dont le comportement est le plus différent) consiste en le calcul de coefficients de corrélation de Pearson (Tomczyk *et al.*, 2021b).

Plus la valeur du coefficient de corrélation de Pearson est proche de 1 et plus le lien entre deux variables est fort : les valeurs des deux variables augmentent ou diminuent en même temps. Un coefficient de corrélation de 1 représente donc une relation linéaire positive entre les variables. Inversement, plus la valeur du coefficient est proche de -1, plus le lien négatif entre les variables est fort : quand l'une augmente, l'autre diminue. Enfin, si le coefficient de corrélation est proche de 0, cela signifie qu'il n'y a pas de lien entre les deux variables ; elles sont dites indépendantes. Comme nous cherchons ici à définir les rapports aux comportements les plus différents les uns des autres (en d'autres termes permettant de disperser les points de données dans des graphiques bivariés), nous cherchons à déterminer quels sont les rapports isotopiques dont les coefficients de corrélation de Pearson sont les plus proches de 0.

Le calcul des coefficients de corrélation de Pearson réalisé sur l'ensemble de la base de données de signatures isotopiques du plomb de minerais récoltés permet de constater que les rapports ayant le ^{204}Pb pour dénominateur sont les plus discriminants (Tableau 37). Les rapports normalisés ^{206}Pb n'ont pas un coefficient de corrélation de Pearson proche de 1 (seul le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ s'en rapproche) et sont donc également discriminants.

³¹⁰ L'abondance de cet isotope est plus petite de 15 à 40 fois par rapport à l'abondance des autres isotopes, ce qui introduit un bruit corrélé sur les trois rapports (Albarède *et al.*, 2004).

³¹¹ Grâce à l'ajout de thallium (Tl) en tant que moniteur de biais de masse.

Variables	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1	0,711	-0,869	-0,513	-0,410
$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	0,711	1	-0,663	-0,081	-0,643
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,869	-0,663	1	0,509	0,410
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,513	-0,081	0,509	1	0,157
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,410	-0,643	0,410	0,157	1

Tableau 37 : Coefficients de corrélation de Pearson pour l'ensemble de la base de données de signatures de gisements. La valeur la plus proche de l'indépendance à $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (il s'agit de la valeur pour laquelle le coefficient de corrélation de Pearson est le plus proche de 0 soit 0,410).

Nous n'avons donc pas d'argument permettant clairement de supposer quels rapports isotopiques permettent le mieux de tracer des provenances. Dans le cas d'analyses récentes, les rapports sur ^{204}Pb apparaissent plus pertinents : ils ne présentent que peu de bruit de fond induit par la faible abondance relative de cet isotope, fournissent des informations d'ordre géologique et leur projection spatiale produit des nuages de points plus dispersés et moins interdépendants. Dans le cas d'analyses plus anciennes (acquises avec un TIMS), la question du bruit de fond causé par le ^{204}Pb peut s'avérer problématique et, si les rapports ayant pour dénominateur le ^{206}Pb n'ont alors pas de réalité géologique, ces derniers seraient plus fiables et donc potentiellement plus pertinents à utiliser.

IV/1.b Détermination de provenances par lecture graphique

Les méthodes d'attribution de provenance les plus couramment employées sont celles visant à affecter la signature de l'artefact au(x) point(s) de minerais le(s) plus proche(s) dans deux graphiques bivariés (De Ceuster et Degryse, 2020 p.110). Ces deux graphiques³¹² sont nécessaires afin d'observer les variations de l'ensemble des 4 isotopes stables du plomb et impliquent la prise en compte de trois rapports isotopiques. Par convention, les graphiques tracés sont : $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ou $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

Il est alors aisément possible de définir l'absence de correspondance entre les signatures des artefacts et celles de certaines régions minéralisées. Il est en revanche rare que les provenances puissent être clairement définies : plusieurs origines sont souvent proposées pour un même artefact et, plus le nombre de districts miniers considéré est conséquent, plus le nombre de régions présentant des signatures similaires augmente. Nous illustrerons ce propos par un cas d'étude : les haches à rebords médocaines.

Origine des haches médocaines

Le bassin aquitain ne dispose d'aucune ressource naturelle en cuivre et en étain, mais de nombreuses découvertes d'artefacts y ont pourtant été réalisées. Parmi les artefacts caractéristiques de cette région figurent des haches massives, à rebords élevés et tranchants étroits dont la forme à initialement imité des haches suisses avant de prendre une forme propre à la région (il s'agirait donc d'un transfert typotechnologique (Lagarde-Cardona, 2022)).

³¹² Ces mêmes rapports peuvent être rassemblés dans un unique diagramme 3D. Les articles publiant les données sous cette forme demeurent cependant très rares (Artioli *et al.*, 2014 et Albarède *et al.*, 2020 font à ce titre figure d'exceptions).

Ces haches, dites médocaines, sont caractéristiques de l'âge du Bronze moyen local (environ 1600-1400 av. J.-C.) et sont de trois types. Les deux types les plus courants ont été interprétés par Lagarde-Cardona, (2008 p.89) comme correspondants à deux étapes différentes de la chaîne opératoire de fabrication : le type II correspondrait à un achèvement de la mise en forme de la hache, évasant le tranchant et raccourcissant légèrement la longueur alors que le type I rassemblerait des haches moins travaillées et qui ne sont pas ébarbées. Le troisième type correspond à une variante et rassemble des haches possédant un léger resserrement vers le milieu de la lame tout en présentant des dimensions, une masse et des procédés de fabrication comparables avec les types I et II.



Figure 206 : Haches à rebord médocaines, photographie prise dans les réserves du musée d'Aquitaine.

Les analyses de la composition élémentaire de ces haches réalisées par Lagarde-Cardona (2008 p286) révèlent que celles-ci correspondent à un alliage présentant peu de variations en composition et contenant en moyenne 12 % (± 2 %) d'étain³¹³. Les analyses isotopiques du plomb réalisées conjointement avec Kévin Costa en juillet 2022 à l'Institut de Physique du Globe indiquent que les haches présentent des signatures très similaires : le cuivre qu'elles contiennent pourrait donc être issu d'un même gisement.

Réf.	Lieu de découverte	Profil impureté	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE
60.74.1	Pauillac	Ni>As>Sb>Pb>Ag	38,36915	0,0018	15,66219	0,00061	18,14921	0,00058
60.77.4	Pauillac	Ni>As>Sb>Pb>Ag	38,37469	0,0019	15,66005	0,00063	18,14788	0,00059
60.77.7	Pauillac	Ni>Pb>As>Sb>Ag	38,38603	0,0024	15,66229	0,00076	18,14954	0,00067
2009.1.12	St-Germain-d'Esteuil	Sb>Ni>As>Pb	38,42263	0,0020	15,66163	0,00062	18,19545	0,00058
2009.1.56	St-Germain-d'Esteuil	Ni>As>Pb>Sb>Ag	38,38942	0,0022	15,66544	0,00070	18,17327	0,00064
2009.1.60	St-Germain-d'Esteuil	Pb>Ni>As>Sb>Ag	38,42858	0,0021	15,66447	0,00069	18,18716	0,00064
60.99.1	Ygos	Ni>Pb>As>Sb>Ag	38,40058	0,0021	15,66034	0,00067	18,17383	0,00062

Tableau 38 : Résultat d'analyse de 7 haches médocaines ; la hache d'Ygos présente la particularité d'avoir été percée par un clou en fer (Roussot-Larroque et Queffelec, 2014).

Sachant que les haches médocaines ont imités des types suisses, nous avons testé l'hypothèse que les métaux les constituant pouvaient provenir des Alpes suisses et italiennes (gisements « centre-alpins »).

³¹³ Cette standardisation de forme et de composition laisse supposer qu'elles aient pu faire office de lingot.

La similarité des haches avec les signatures de minerais alpins est satisfaisante et une origine alpine du cuivre pourrait donc être proposée (Figure 207). Ce résultat ne serait pas étonnant puisque les mines alpines auraient produit beaucoup de cuivre entre 1600 et 1400 av. J.-C.

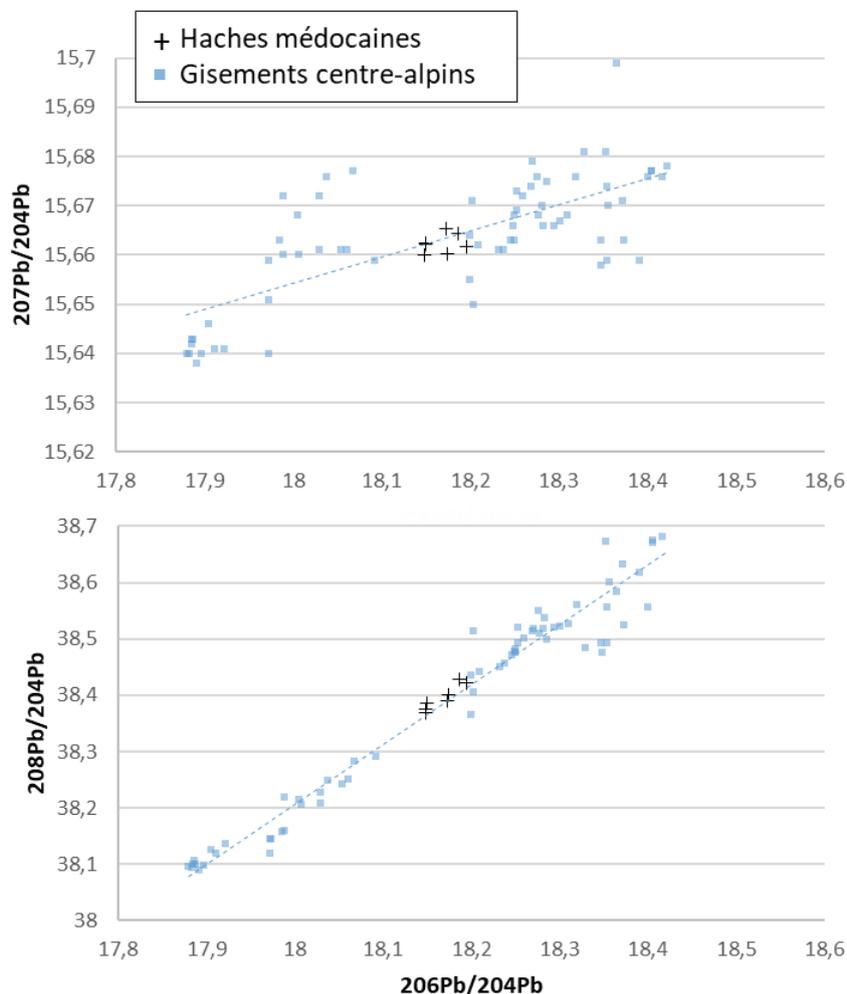


Figure 207 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins (données issues de la compilation réalisée dans le cadre de ce travail de thèse).

Pourtant, si la lecture graphique est efficace pour comparer des signatures d'artefacts (ici les haches) avec des signatures de gisements peu nombreuses, elle devient très complexe dès lors que le nombre de signatures de minerais pris en compte est important.

Dans cet exemple, le fait d'ajouter cinq grandes régions cuprifères supplémentaires aux graphiques rend l'interprétation complexe (Figure 208). Les rapports isotopiques normalisés sur ^{204}Pb montrent alors que les signatures des haches se corrélaient très bien avec les gisements sardes. Certaines haches présentent des signatures qui se rapprochent de gisements du Massif central et du Pays de Galles. Seule une origine de la péninsule Ibérique semble exclue.

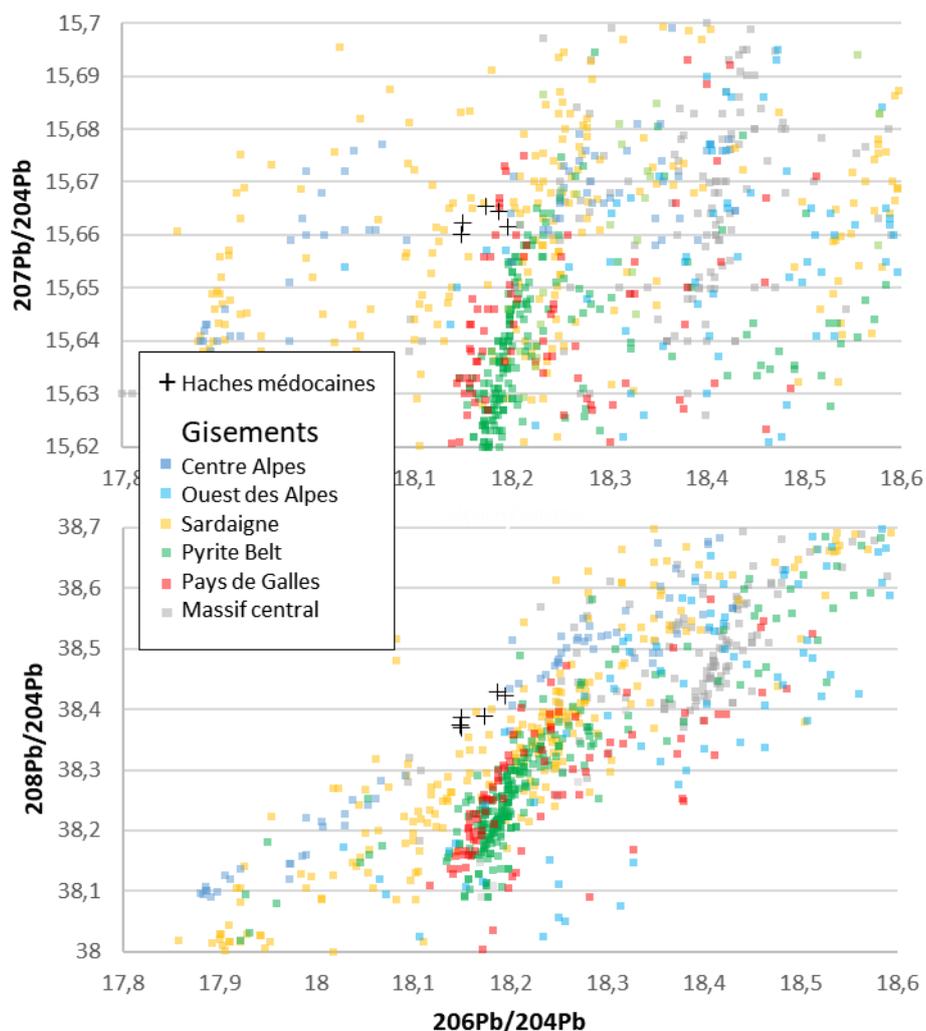


Figure 208 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins, des Alpes de l'Ouest, de Sardaigne, du sud de la péninsule Ibérique, du Pays de Galles et du Massif central ; données normalisées sur le ^{204}Pb .

L'observation en projection bvariée des rapports isotopiques normalisés sur le ^{206}Pb (il s'agit de la lecture graphique employée historiquement par les archéomètres) conduit à des interprétations différentes (Figure 209). Sur ce graphique, l'hypothèse d'une provenance sarde pourrait être proposée pour les haches présentant les rapports les plus forts. Une provenance de la péninsule Ibérique (exclue par l'observation des rapports normalisés sur ^{204}Pb) serait également probable.

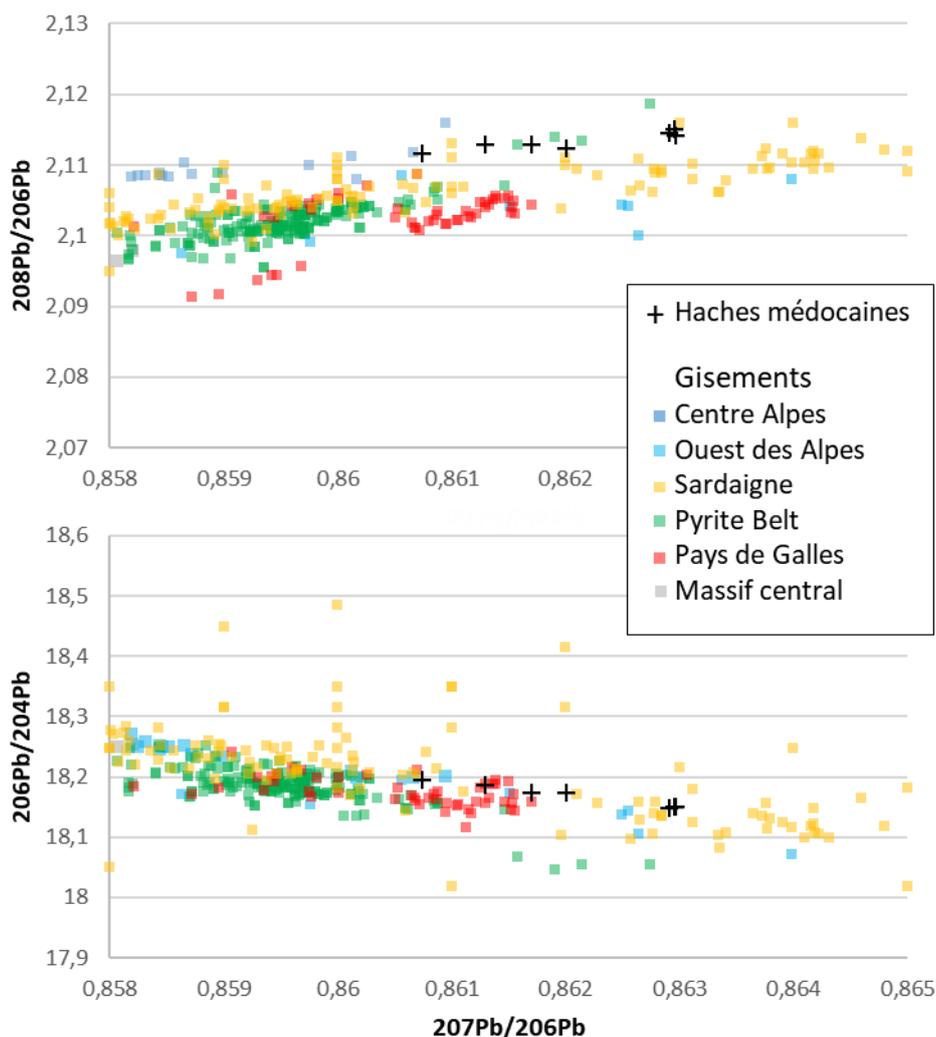


Figure 209 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins, des Alpes de l'Ouest, de Sardaigne, du sud de la péninsule Ibérique, du Pays de Galles et du Massif central ; données normalisées sur le ^{206}Pb .

Limites de la lecture graphique des rapports isotopiques projetés

Comme nous venons de l'illustrer, les provenances sont souvent complexes à interpréter par simple lecture graphique, d'autant plus qu'il est nécessaire de comparer les nuages de points de deux graphiques différents. La sélection des gisements pris en compte influence par ailleurs beaucoup les interprétations de provenance. Il est donc complexe de confronter les provenances interprétées par des auteurs différents pour un même artefact si ces derniers n'utilisent pas les mêmes jeux de données de signatures de gisements.

Par exemple, la signature isotopique du plomb d'un lingot de cuivre trouvé à Chypre a été étudiée par Webb *et al.*, (2006) puis par Stos-Gale et Gale (2010)³¹⁴. Ces deux études ont conduit à des provenances clairement différentes : une origine « mer Égée, côte de l'Anatolie » pour Webb mais une origine « cohérente avec les minerais de cuivre des Cyclades (Kythnos et Seriphos) » pour Stos-Gale et Gale.

³¹⁴ Référence du lingot « 74/5/1 » dans Stos-Gale et Gale et « 3 » dans Webb *et al.*

Un autre exemple, impliquant cette fois-ci en partie de mêmes auteurs (Ling *et al.* (2019) et Ling *et al.* (2014)) concerne un pommeau d'épée en bronze découvert en Suède (référence « 6 : UM 40280_3006 »). Une provenance de « Sardaigne, mine de Calabona » avait été proposée en 2014 contre une provenance des « Alpes orientales italiennes - Southalpine AATV » en 2019.

La lecture graphique présente donc une part de subjectivité importante du fait de la sélection des signatures de minerais prises en compte, mais aussi de la difficulté d'opérer des choix de provenance entre plusieurs régions dont les signatures sont très proches.

Revenir aux âges des réservoirs et aux rapports initiaux Th/U et U/Pb

Comme déjà évoqué, les isotopes du plomb fournissent des informations sur l'âge du gisement et sur les fluides à l'origine de la genèse des gisements (soit deux paramètres indépendants l'un de l'autre).

Des travaux récents proposent de transformer les isotopes du plomb et d'utiliser l'âge du gisement ou plus précisément son modèle âge (T)³¹⁵ et les paramètres μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) et κ ($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$) pour différencier les gisements (Albarède *et al.*, 2012 et 2020). Ces trois paramètres (T, μ et κ) sont calculés en utilisant les constantes de désintégration de ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th (Albarède *et al.*, 2012).

Cette piste n'a cependant jusqu'alors été exploitée que pour discriminer des signatures de gisements à l'échelle de régions restreintes (la Grèce (Albarède *et al.*, 2020), l'Espagne et les Andes Centrales (Albarède *et al.*, 2012)) et n'a pas été appliquée à des études de provenance à l'échelle de l'Europe. Les régions sur lesquelles le modèle a été testé sont par ailleurs connues pour bien se différencier.

L'applicabilité de cette méthode à plus grande échelle reste à définir et des tests réalisés dans le cadre de ce travail de thèse se sont avérés peu concluants pour deux raisons.

Les âges recalculés à partir du modèle d'Albarède *et al.* (2012)³¹⁶ sont extrêmement différents des âges réels des gisements³¹⁷ mais Albarède *et al.* (2012) précisent que si les âges calculés ne correspondent pas à des âges réels (d'où l'emploi du terme de « modèle âge »), ils reflètent une réalité géologique et sont généralement assez précis pour identifier les provinces en fonction de leurs âges de formation tectonique. Des critiques sont régulièrement formulées à l'encontre de la datation Pb-Pb souvent considérée comme ayant de nombreux présupposés (Jahn et Cuvellier, 1994 ; Bau *et al.*, 1999). Elle ne donne l'âge d'un système que si (i) la composition isotopique initiale du plomb était identique à l'échelle du système, (ii) l'ensemble du système possède le même âge, et (iii) l'ensemble du système est resté fermé.

Nous rejoignons ces critiques et doutons de l'utilité de recourir à un modèle âge. Dans le cas du gisement de Janggun (Corée du Sud), Kang *et al.* (2020) ont souligné que les isotopes du plomb fournissent des datations très étendues (plus de 300 Ma) dont certaines correspondent à plus du double de l'âge réel du gisement (Lee *et al.*, 1998) ce qui est aberrant mais surtout moins précis que de considérer directement l'âge réel du gisement.

³¹⁵ Ce dernier ne correspond pas précisément à la date de fin de mise en place des processus de minéralisation.

³¹⁶ La 15^e équation de la publication a été utilisée, le calcul automatisé via l'utilisation d'une macro Excel.

³¹⁷ Par exemple, dans le district de Fayet (Aveyron), les minéralisations permienues et triasiques fournissent des datations éocènes et paléocènes, c'est-à-dire 150 Ma plus jeune que l'âge réel des minéralisations.

Sur l'ensemble de la base de données de signatures de minerais, 11 % des âges théoriques sont négatifs³¹⁸, et la grande majorité des datations calculées donnent des âges extrêmement récents. Seuls les gisements du bouclier scandinave dont l'âge est nettement plus ancien que les autres formations géologiques européennes se dégagent clairement en lecture graphique (Figure 210). De très vieux âges calculés sur des gisements qui ne sont pas localisés dans de vieux cratons correspondent à des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ faibles³¹⁹.

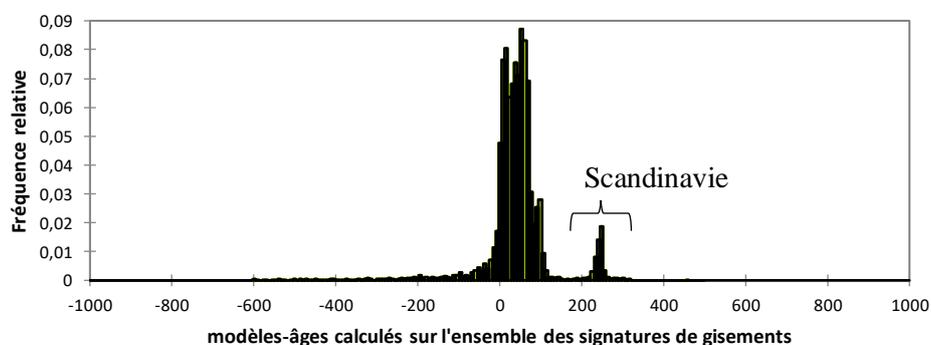


Figure 210 : Histogrammes de répartition des modèles-âges calculés à partir des signatures isotopiques des gisements compilés dans le cadre de cette thèse (n=7289).

Cette transformation possède une seconde limite. Il s'agit des très faibles variations des μ et κ calculés. Ces derniers ne varient que de quelques décimales derrière la virgule et ces décimales sont très sensibles à la qualité de la mesure analytique en entrée. Utiliser les modèles d'Albarède en lecture graphique présente donc les mêmes types de limitation que l'observation directe des rapports isotopiques. Quelles que soient les données utilisées (rapports normalisés sur ^{204}Pb , sur ^{206}Pb ou T, μ et κ), la lecture graphique n'est pas satisfaisante à partir du moment où de nombreuses signatures de gisements sont prises en compte. Pour éviter les biais liés aux lectures graphiques, des essais de traitements statistiques multivariés ont vu le jour afin de mieux discriminer les différentes régions géologiques et/ou de prédire la provenance d'un artefact.

IV/1.c Utilisation de statistiques multivariées

Les statistiques multivariées permettent d'observer simultanément les variations de plusieurs variables en un seul graphique et peuvent donc constituer un complément ou plus encore, une alternative intéressante aux diagrammes bivariés traditionnels (Radivojević *et al.*, 2019; Artioli *et al.*, 2020 ; Killick *et al.*, 2020).

L'utilisation des statistiques multivariées dans le cadre d'études de provenance n'est donc pas nouvelle. Cependant, des obstacles sont inhérents à ce type de traitement, car les données isotopiques du plomb ne présentent pas une distribution normale (Scaife *et al.*, 1996 ; Baxter et Gale, 1998 ; Baxter, 1999a et 1999b ; Baxter *et al.*, 2000 ; Tomczyk et Żabiński, 2023 ; Figure 211) ce qui limite le nombre de traitements statistiques pouvant leur être appliqués.

³¹⁸ Cela se produit lorsque les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sont « à droite » du plomb commun du modèle de calcul de Stacey et Kramers (1975).

³¹⁹ Ces âges pourraient s'expliquer par l'apport de plomb par un magmatisme mantellique ou par des fractionnements de masse analytiques incorrects.

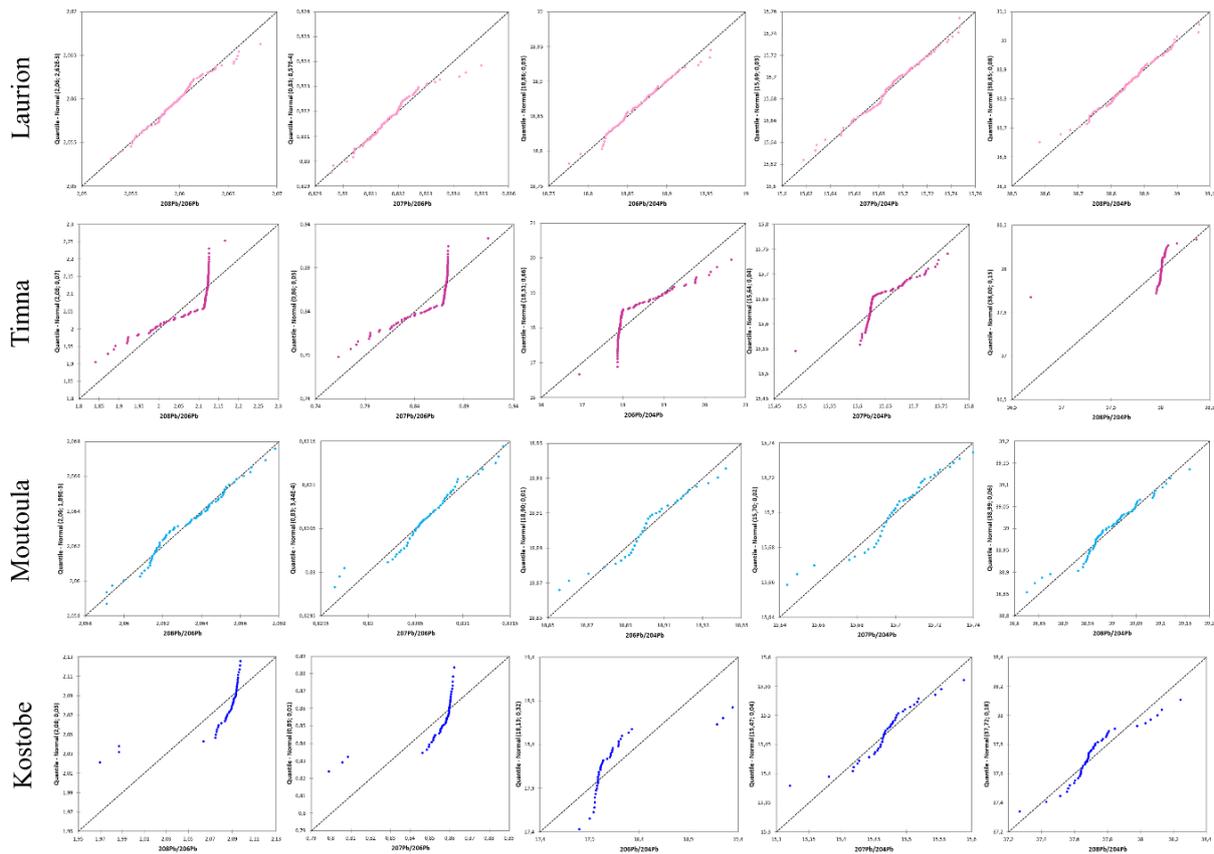


Figure 211 : Graphiques Quantile-Quantile de chaque rapport isotopique du plomb pour les districts miniers du Laurion (Grèce) et de Timna (Israël) et les gisements de Moutoula (île de Seriphos, Grèce) et Kostobe (Kazakhstan). Ces exemples ont été choisis, car ils sont caractérisés par un nombre important de signatures isotopiques (respectivement 116, 111, 73 et 45)³²⁰. Parmi ces 4 exemples, seules les signatures des rapports normalisés sur le ^{204}Pb du Laurion et le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ du gisement de Moutoula présentent une distribution normale (les points s'alignent avec la bissectrice du plan).

Ainsi, certains traitements statistiques ne peuvent pas³²¹ être employés pour déterminer la provenance d'artefacts et l'emploi de la méthode de Ward par Gebhard et Krause (2020) pour définir la provenance d'artefacts du célèbre dépôt de Nebra a été vivement critiquée par Pernicka *et al.* (2020) et Bray (2022) en raison de l'absence de distribution normale des rapports isotopiques du plomb des gisements.

Estimation par noyau

À la fin des années 1990, Baxter *et al.* (1997) ont discuté de l'utilisation d'estimation par noyau (en anglais *Kernel density estimation (KDE)*) pour modéliser des regroupements de signatures de

³²⁰ Selon Baxter *et al.* (2000) la normalité d'un jeu de données ne peut être effective que si ce jeu de données est caractérisé par au moins 40 signatures isotopiques du plomb. Cette remarque nécessite toutefois d'être pondérée par le fait qu'il est primordial que le gisement en question présente une histoire géologique simple. L'absence très nette de normalité observée dans le cas du gisement de Kostobe s'explique par les nombreuses phases de minéralisations (Wong *et al.*, 2017) et ce, même si le nombre d'analyses réalisées est très important.

³²¹ Certains auteurs précisent que les distributions des signatures de certaines régions sont proches de la normalité et que des regroupements de minerais pourraient être réalisés en utilisant des traitements statistiques nécessitant une distribution normale (Sayre *et al.*, 2001 ; Longman *et al.*, 2018). Nous doutons de cela car très peu de régions présentent effectivement une distribution proche de la normalité.

minerais (voir également Beardah et Baxter, 1999 et Scaife *et al.*, 1999). L'une des motivations du choix de cette méthode était que l'utilisation d'estimations par noyau ne suppose pas une distribution normale des données.

Ce traitement statistique permet d'estimer la fonction de densité de probabilité d'une variable (ici les rapports isotopiques) et de déterminer le degré de chevauchement entre différentes zones minières. Cependant peu d'études ont utilisé cet outil d'interprétation par la suite et ce n'est que 20 ans plus tard que Hsu *et al.* (2018) utilisent à nouveau les estimations par noyau pour visualiser les isotopes du plomb et souligner les possibles chevauchements de signatures (Figure 212).

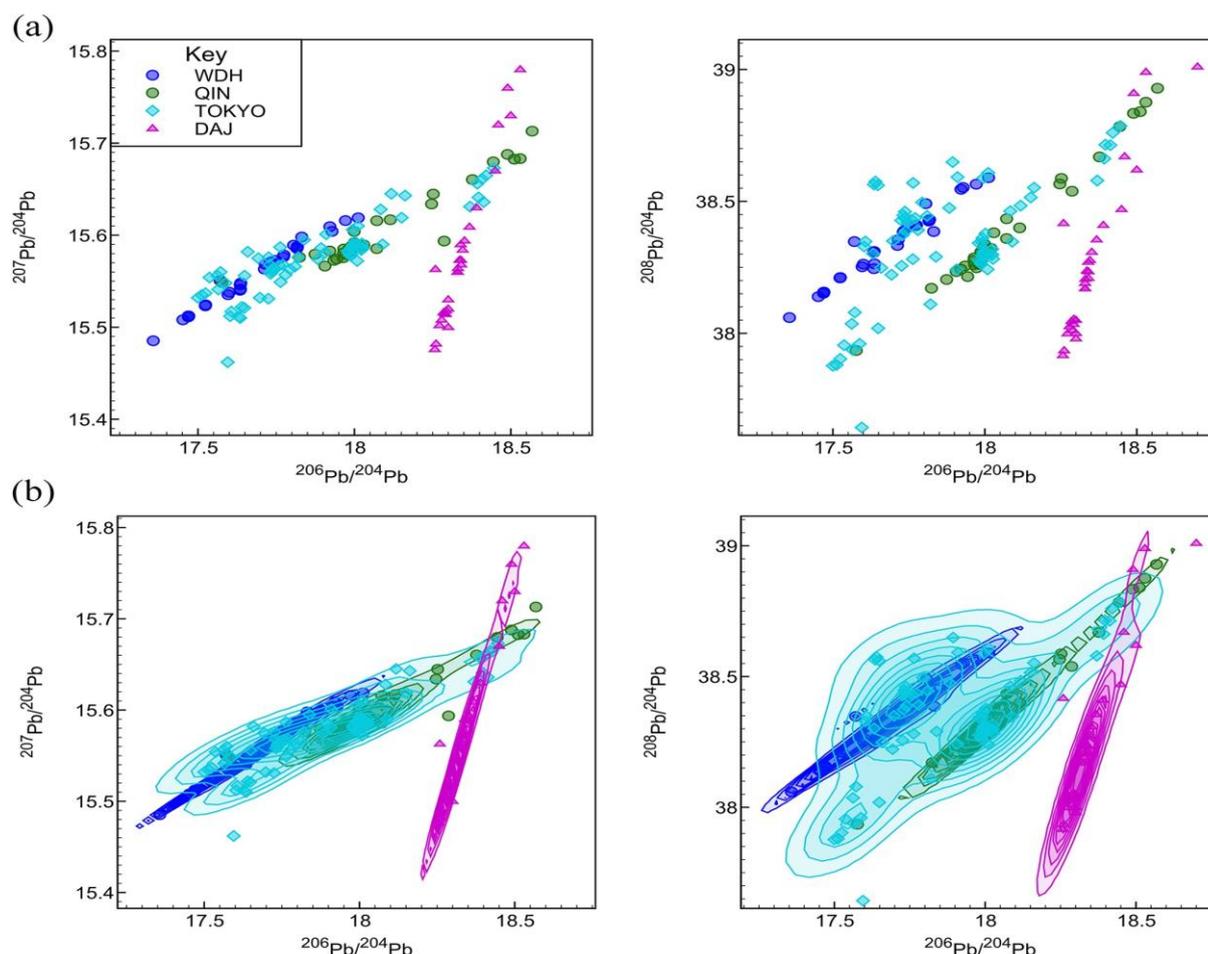


Figure 212 : Distributions des densités de probabilité de signatures isotopiques du plomb de gisements chinois. Source Hsu *et al.* (2018).

Une approche supervisée (les probabilités de provenance ont été calculées pour des groupes de données correspondant aux signatures de gisements) a récemment été appliquée par De Ceuster et Degryse (2020) dans une série d'études de cas comprenant des artefacts en plomb et en argent de la période romaine. Les auteurs ont alors démontré que l'emploi d'estimations par noyau permet une évaluation visuelle et mathématique (et donc plus robuste) de la provenance et l'identification de scénarios de mélange et de recyclage possibles (De Ceuster et Degryse, 2020 ; sur l'applicabilité des estimations par noyau voir également Pollard (2009) et Gale (2009)).

Cependant, si les estimations par noyau permettent de créer efficacement des regroupements de signatures de minerais, elles ne sont efficaces que pour des ensembles de données importants. Les

gisements pris en compte doivent être caractérisés par au moins 20 analyses (Baxter *et al.*, 2000 ; De Ceuster et Degryse 2020). Or, à l’heure actuelle très peu de gisements sont caractérisés par autant d’analyses, ce qui limite le nombre d’entités géologiques pouvant être considérées.

Distances euclidiennes

Depuis quelques années le calcul de distances euclidiennes est utilisé pour les études de provenance. Cette méthode consiste à déterminer les voisins les plus proches d’un point donné. Dans le cas des études de provenance, ce traitement consiste à rechercher les points de signatures de gisements les plus proches de la signature d’un artefact donnée³²². Les données en entrée n’ont pas besoin de présenter une distribution normale. Les trois rapports isotopiques utilisés peuvent être normalisés au ²⁰⁴Pb ou au ²⁰⁶Pb.

Les premiers calculs de distances euclidiennes ont été utilisés pour les études de provenance au début des années 2010 et sont depuis régulièrement appliqués pour déterminer des provenances (voir les travaux de : Wolf *et al.*, 2003 ; Stos-Gale et Gale, 2009 ; Artioli *et al.*, 2014 ; Ling *et al.*, 2014 ; Artioli *et al.*, 2017 ; Canovaro *et al.*, 2019 ; Holmqvist *et al.*, 2019 ou encore Birch *et al.*, 2020).

Cette approche ne permet pas toutefois pas d’obtenir une vue d’ensemble des populations de minerais (Albarède *et al.*, 2020) car les signatures de minerais sont considérées de manière individuelle et non en termes de « groupes » de signatures. Les distances euclidiennes présentent donc le risque d’associer une signature peu représentative d’une région à un artefact donné. Ce risque est d’autant plus élevé lorsque les données en entrée ne sont pas en adéquation avec les données en sortie.

Les très récents travaux de Rodríguez *et al.* (2023), présentent le mérite de proposer une interface en ligne permettant de calculer des correspondances par distances euclidiennes de la signature d’un artefact à un jeu de données d’entrée. Ils présentent également la faiblesse de ne pas demander d’informations chronologiques et de mal renseigner le métal constituant l’artefact. Si nous lançons ce traitement sans plus de renseignements, des correspondances incluant des artefacts en or (qui plus est beaucoup plus récents) découverts en Espagne, des artefacts en cuivre scandinave ou encore des galènes du Pays de Galles (Tableau 39) sont proposées comme provenance des haches en bronze médocaines.

Ref. no./Orig. ID	Location	Country	Euclidean Distance	Material
MA-134919	Vester-Vandet	Denmark	0.079	Cu metal – Artifact
MA-134912	Store-Lyngby	Denmark	0.077	Cu metal – Artifact
CH 9291/RMG 2	Tomb 66A Chiavari Necropolis	Italy	0.076	Cu metal – Artifact
T249	Kentria: 5B.31 Thasos	Greece	0.074	Cu metal – Artifact
AM 1214	Fryksdalen Östra Ämtervik	Sweden	0.074	Cu metal – Artifact
BMR8.92 NAN 5	Nantyreira/Snowbrook Nantiago	Wales	0.073	Galena
MSA1	Montevecchio, San Antonia, Iglesias	Italy	0.071	Galena, Sphalerite, Cerussite, ...
4358b	Laurières A/M Saint Yrieix-La-Perche	France	0.067	Gold + Arsenopyrite, Pyrite, ..
4358	Laurières A/M Saint Yrieix-La-Perche	France	0.066	Gold + Arsenopyrite, Pyrite, ...

Tableau 39 : Correspondances présentant les meilleures corrélations avec la hache médocaine portant l’identifiant 2009.1.60 d’après l’application AMALIA (Rodríguez *et al.*, 2023).

³²² La tridimensionnalité des données isotopiques du Pb est adaptée à l’espace euclidien, où la distance entre deux points est mesurable.

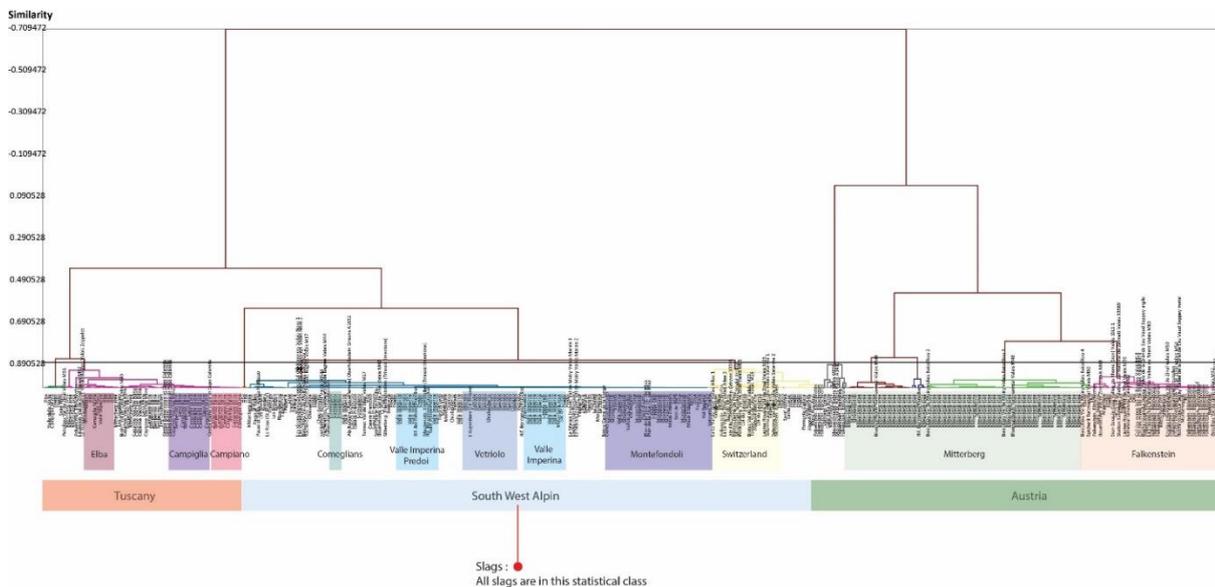
Classification Ascendante Hiérarchique

Une option intéressante permettant de prendre en compte de grands ensembles de données est l'utilisation d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (Tomczyk *et al.*, 2021b). Comme précisé précédemment, la CAH utilise un algorithme qui, dans un premier temps, rassemble les couples d'individus les plus ressemblants, puis agrège progressivement les autres groupes d'individus en fonction de leur similarité, jusqu'à ce que la totalité des individus ne forme plus qu'un seul groupe. La classification est ainsi dite ascendante, car elle part des observations individuelles. Elle est de plus hiérarchique, car elle crée des regroupements (classes)³²³.

La CAH ne nécessite pas que les données en entrées présentent une distribution normale. De plus, contrairement aux estimations par noyau qui demandent de disposer d'au moins 20 signatures de gisements, ici seules trois observations par gisement sont nécessaires.

Les gisements ne sont discriminés que sur un critère de ressemblance de signatures isotopique. Les signatures d'un même gisement peuvent se projeter dans plusieurs classes si elles n'ont pas été créées par le même phénomène minéralisateur³²⁴. Un gisement aux signatures hétérogènes sera redécoupé permettant de discriminer des groupes de signatures similaires. Les CAH présentent également l'avantage d'isoler des valeurs aberrantes dans des classes uniques (ces valeurs peuvent correspondre à des erreurs analytiques ou encore à des filons sous-échantillonnés). Ces dernières s'isolant dans des classes uniques, elles ne perturbent pas le modèle.

Un artefact dont la provenance est recherchée peut être incorporé au jeu de données. Sa signature sera comparée à l'ensemble des signatures de gisements prises en compte. La classe et surtout la sous-classe dans laquelle s'insère l'artefact permettent alors de définir son origine (Figure 213). Un artefact dont le gisement d'origine n'est pas connu s'isolera dans une classe unique.



³²³ Ces regroupements peuvent comprendre des sous-groupes (sous-classes).

³²⁴ Des phases de minéralisations différentes d'un même gisement présentent des signatures isotopiques du plomb légèrement différentes et ne se projettent pas dans la même classe.

Cependant, si l'utilisation d'une CAH permet de discriminer efficacement les minerais selon leur signature isotopique, elle ne permet pas d'interroger la provenance de plusieurs artefacts de manière simultanée. En effet, injecter de nombreux artefacts dans le modèle entraîne la création de (sous)classes constituées parfois quasi exclusivement d'artefacts. Il est donc nécessaire de tester les provenances une à une pour éviter ce phénomène. Or, réaliser plusieurs milliers de CAH (une par artefact analysé) aurait été beaucoup trop chronophage. Nous proposons alors d'employer une Analyse Factorielle Discriminante (AFD) afin d'automatiser le processus de prédiction d'appartenance des artefacts à une sous-classe (Tomczyk *et al.*, 2019).

IV/2 Protocole retenu

IV/2.a CAH puis AFD et éventuellement K-means

L'emploi d'une AFD permet de maximiser la variance (la dispersion des données)

Comme notamment évoqué par Villa (2009) et Baron *et al.* (2010), le traçage de provenance utilisant les isotopes du plomb se base sur l'hypothèse que les gisements peuvent être clairement distingués les uns des autres. Statistiquement parlant, cela se traduit par le fait qu'il faut chercher à obtenir une forte variabilité interclasse et une faible variabilité intraclasse (Szekely et Rizzo, 2005 ; Albarède *et al.*, 2020).

L'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) vise à trouver un sous-espace discriminant dans lequel des groupes prédéfinis sont le mieux séparés. Elle repose sur la transformation de variables originales (ici les rapports isotopiques) en un ensemble de variables latentes, appelées fonctions discriminantes, qui maximisent la variance³²⁵ entre les groupes et minimisent la variance à l'intérieur des groupes. L'AFD permet également de prédire l'appartenance d'individus à des groupes prédéfinis, soit, dans notre cas, de rechercher de quelle région minéralisée la signature d'un artefact est particulièrement proche. Le nombre de signatures d'artefacts n'influe pas sur le modèle statistique, car chaque provenance est interrogée de manière individuelle.

L'utilisation d'une AFD nécessite de disposer de groupes prédéfinis

L'utilisation d'une AFD est particulièrement adéquate lorsque les données sont réparties dans un espace multidimensionnel et qu'il est nécessaire de réduire la dimensionnalité tout en préservant autant d'informations discriminantes que possible. Sa réalisation repose nécessairement sur un prédécoupage des données en plusieurs groupes. Dans notre cas, il est donc nécessaire de scinder les signatures isotopiques du plomb des minerais en plusieurs groupes. Pour être statistiquement valide, chaque groupe prédéfini doit être représenté par au moins 3 individus (Harbottle, 1976).

Considérer les régions d'origine des minerais ne conduit pas à une discrimination satisfaisante

Il serait envisageable de considérer l'origine géographique des minerais pour créer les groupes en entrée de l'AFD mais prendre en compte de grandes régions d'origine n'est que peu satisfaisant, car

³²⁵ La variance exprime la dispersion des données, il s'agit de la moyenne des carrés des écarts à la moyenne.

(i) des gisements très différents peuvent coexister dans une même région et que (ii) des régions éloignées peuvent présenter des signatures très similaires (cf II/3.b).

Si nous utilisons directement ces données, nous pourrions clairement identifier certaines provenances correspondant aux régions dont les points s'isolent (Figure 214). Des régions comme Chypre (points jaune-or³²⁶) possèdent des signatures assez nettement différentes des autres gisements européens et se distinguent aisément alors que d'autres régions, aux signatures très similaires, ne pourraient pas être isolées (par exemple le Massif central (en gris) et l'ouest des Alpes (en bleu ciel)).

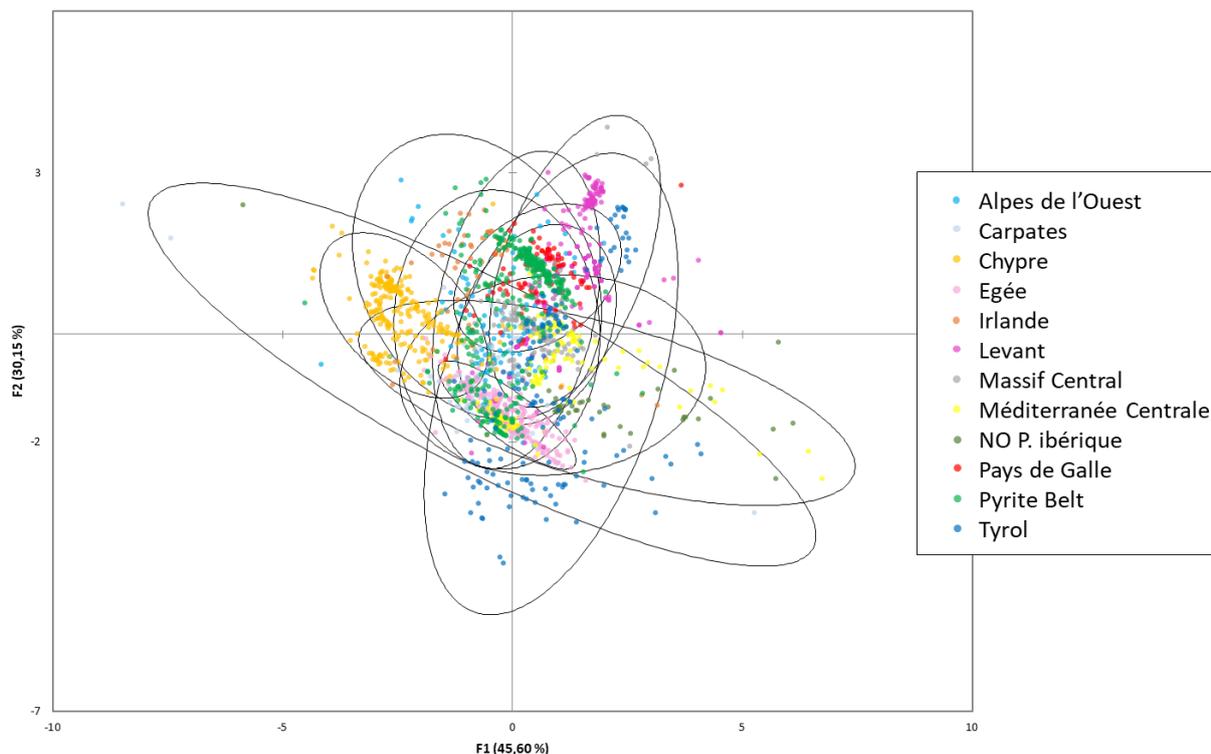


Figure 214 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD³²⁷ réalisée sur 1944 signatures de minerais (Cu major et minor) en considérant les grandes régions minières comme groupes en entrée du modèle. Les points sont très regroupés et beaucoup de points de régions éloignées se chevauchent.

Un autre avantage de l'AFD est qu'elle permet de tester la probabilité d'attribution des signatures isotopiques aux groupes prédéfinis en entrée du modèle (c'est-à-dire de vérifier si la signature d'un gisement localisé dans les Alpes est similaire aux signatures des autres gisements alpins ou si cette signature est plus proche de celles de gisements d'une autre région, par exemple Chypre). Plus en détail, des coordonnées factorielles vont être calculées pour chaque signature de minerai. Les coordonnées d'un point peuvent alors être très cohérentes avec l'ensemble des points représentant les signatures de cette même région et, si nous devons supposer de l'origine de ce point, il serait associé à sa région d'origine³²⁸. Chaque observation (ici chaque signature de minerai) est donc reclassée dans la classe où sa probabilité d'attribution est maximale.

³²⁶ Il serait même possible de définir plusieurs origines chypriotes différentes, car le nuage de points chypriotes se divise en trois classes distinctes.

³²⁷ Le premier axe factoriel (F1) est ici légèrement plus discriminant (45,60% contre 30,15% pour F2).

³²⁸ Plus précisément, la probabilité d'attribution à chacun des groupes se calcule par le carré des distances de Mahalanobis au centroïde de chacun des groupes.

Le résultat du reclassement des observations peut être retrouvé dans un tableau : la matrice de confusion (Tableau 40). Le « % correct » correspond au rapport du nombre d'observations dont la provenance recalculée correspond à la provenance d'origine sur le nombre total d'observations.

from \ to	O. Alpes	Aram	Carp	Chyp	Égée	Egypt.	GB	Ir	MCentral	Sard	PIbé	Tyrol	Total	% correct
O. Alpes	0	0	0	13	27	8	1	1	0	7	59	0	116	0,00 %
Aram	0	22	0	1	16	0	0	0	0	0	0	0	39	56,41 %
Carp.	0	1	0	7	31	0	0	0	0	3	20	1	63	0,00 %
Chyp.	0	0	0	246	5	0	0	1	0	0	16	0	268	91,79 %
Égée	0	0	0	7	269	0	0	0	0	0	0	0	276	97,46 %
Égypte	0	22	0	0	8	149	3	1	0	4	39	0	226	65,93 %
GB	0	0	0	0	0	28	0	0	0	1	60	0	89	0,00 %
Ir	0	2	0	12	0	0	0	8	0	0	26	2	50	16,00 %
MCentral	0	0	0	0	2	4	0	0	0	9	119	0	134	0,00 %
Sard	0	0	0	0	41	0	0	0	0	41	49	0	131	31,30 %
PIbé	0	0	0	7	92	3	0	0	0	5	289	0	396	72,98 %
Tyrol	0	9	0	0	32	25	0	0	0	4	40	46	156	29,49 %
Total	0	56	0	293	523	217	4	11	0	74	717	49	1944	55,04 %

Tableau 40 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée sur 1944 signatures isotopiques de minerais issues de 12 grandes régions d'Europe. Simplification des noms de régions : O. Alpes = Ouest des Alpes, Aram = Asturies (grande mine d'El Aramo ; NO de la péninsule Ibérique), Carp = Carpates, Chyp = Chypre, GB = Pays de Galles, Ir = Irlande, MCentral = Massif central, Sard = Sardaigne, PIbé = péninsule Ibérique.

Dans ce cas précis, seuls les minerais chypriotes et égéens se distinguent clairement des autres minerais d'Europe (ils présentent un pourcentage de reclassement correct supérieur à 90 %). Les minerais des Alpes de l'ouest, des Carpates, de Grande-Bretagne ou encore du Massif central ne sont en revanche pas reclassés dans leur région (groupe) d'origine : il n'est pas possible de tracer leur provenance en considérant directement les régions sources comme des groupes pertinents.

Prendre en compte les districts miniers (et non pas les grandes régions géographiques) conduit également à une discrimination très peu satisfaisante (Figure 215) cela car les signatures de certaines zones minières sont très hétérogènes et qu'un même gisement peut présenter plusieurs phases de minéralisation.

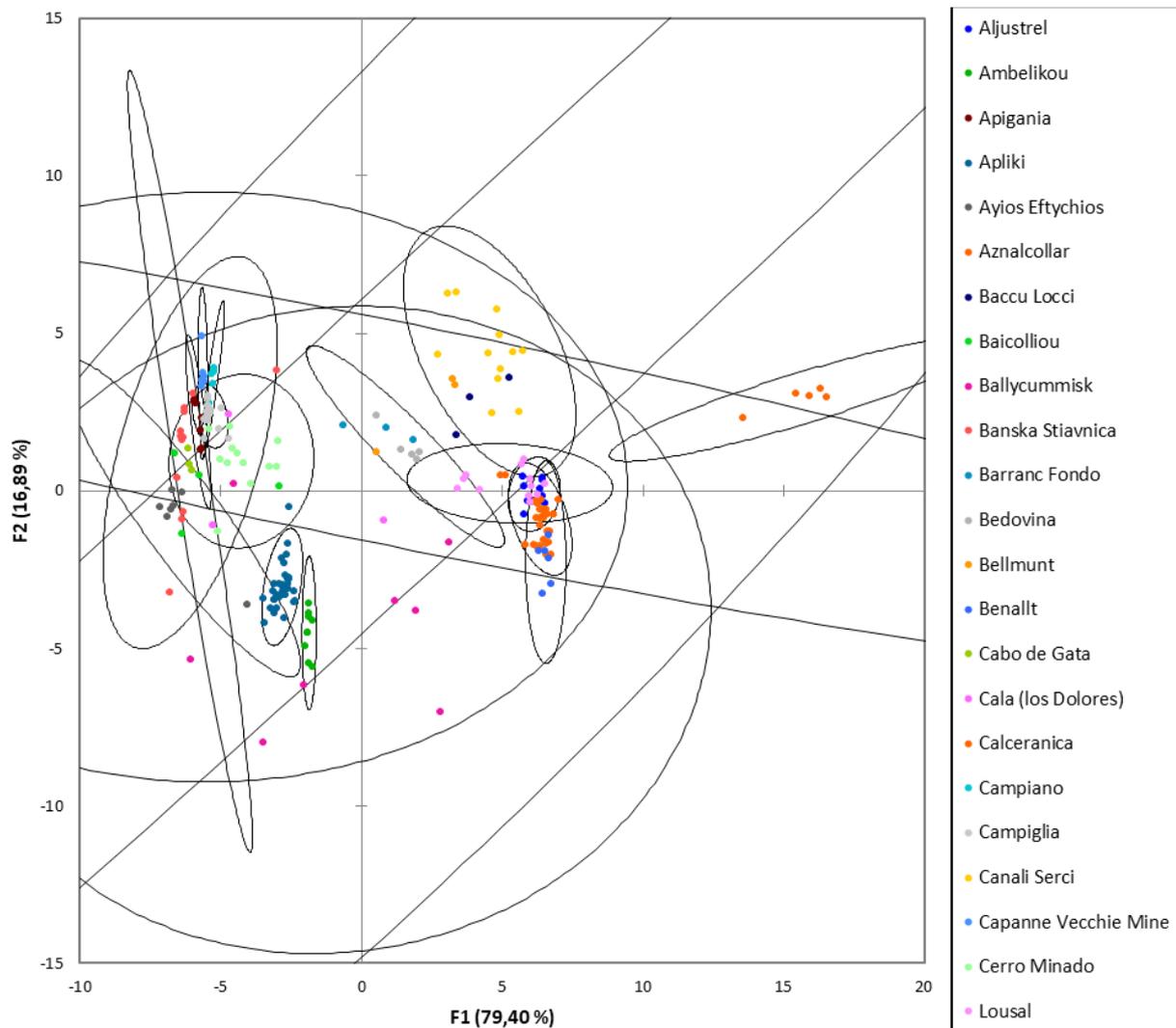


Figure 215 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD réalisée sur 222 signatures de minerais issues de 23 districts miniers sélectionnés au hasard. Le pourcentage de reclassement correct de l'ensemble des données prises en compte est de 66,67%. Ce pourcentage diminue avec l'ajout de nouvelles données et en particulier l'ajout de signatures de districts miniers aux signatures très hétérogènes (c'est notamment le cas de la mine de Ballycummisk dont les 8 signatures sont éparpillées dans ce diagramme).

Utiliser des informations d'ordre géographiques (que cela soit les grandes régions géologiques ou les zones les minières) ne permet donc pas de créer des regroupements statistiques qui peuvent être différenciés les uns des autres. Au contraire, les signatures de certaines localités sont tellement similaires que leurs signatures se confondent.

La solution que nous proposons est alors de ne pas considérer les grandes zones minières (comme cela est classiquement fait) mais de créer de grands regroupements statistiques basés uniquement sur des ressemblances de signatures isotopiques. Ces groupes peuvent rassembler plusieurs régions géographiques.

Discrétiser efficacement les minerais par la similarité de leurs signatures isotopiques

Comme nous venons de le voir, une CAH permet de créer des regroupements statistiques et peut être appliquée aux signatures de minerais.

Nous avons repris l'ensemble des données précédemment considérées (les mêmes 1944 signatures de minerais que celles projetées dans la Figure 214) et nous avons réalisé une CAH sur ces données. La CAH a permis de distinguer 8 groupes (classes) de signatures de minerais. Ces groupes ne sont basés que sur des ressemblances chimiques.

La réalisation d'une AFD basée sur les regroupements géochimiques obtenus par CAH nous permet d'observer (Figure 216) que certaines zones minières aux signatures peu communes se distinguent très clairement : il s'agit des classes 3 à 8 qui se projettent à différents endroits à la droite du graphique. Ces signatures correspondent à des signatures très récentes, caractérisées par un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ très fort (> 20), mais un rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ « normal » (environ 38). Il s'agit des signatures des mines karstiques du nord-ouest de la péninsule Ibérique³²⁹ mais aussi de certains des gisements alpins dont les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sont également très forts (environ 20) et dont les rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sont très élevés (environ 40). Les gisements alpins se projettent en classes 7 et 8 soit en bas à droite du graphique. Elles se différencient des mines asturiennes projetées dans le quart en haut.

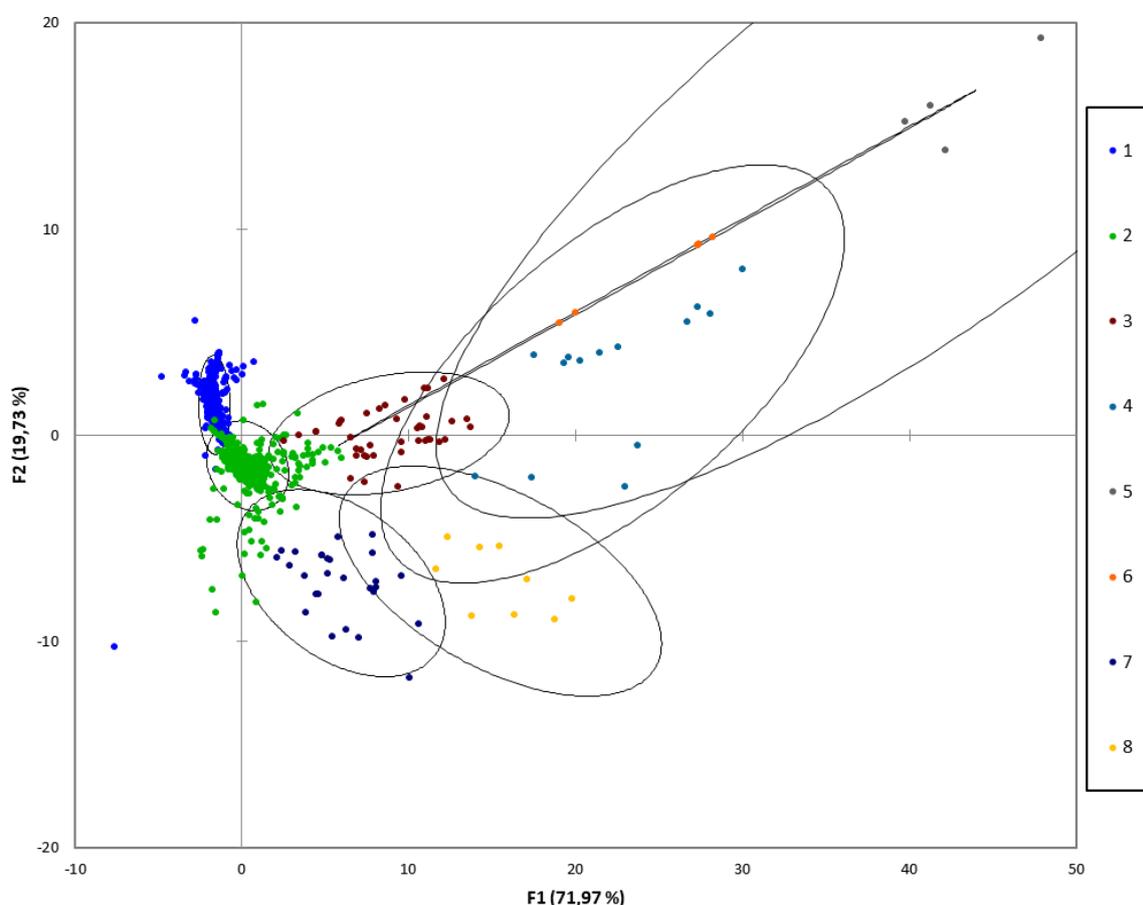


Figure 216 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD des mêmes 1944 signatures de minerais que précédemment (Figure 215), mais en considérant cette fois les groupements de signatures des minerais créés par CAH en données d'entrée.

Mis à part ces quelques régions aux signatures remarquables, la quasi-totalité (ici 95 %) des signatures isotopiques de minerais sont regroupées dans un nombre très réduit de grandes classes (classes 1 et 2) comprenant des minerais de nombreuses régions. Les signatures de grandes régions telles que le Pays de Galles, le sud de l'Irlande, le sud-est de la péninsule Ibérique, la *Pyrite Belt* ibérique ou

³²⁹ Les signatures de la plus grande mine de cette région, celle d'El Aramo se rassemblent dans la classe 4.

encore la Sardaigne ne sont pas différenciables à ce stade des discrétisations : elles ne commencent à se distinguer qu'à partir de plusieurs sous-classes (en découpant les classes 1 et 2 en plusieurs groupes).

Les classes créées par la CAH ne comprennent pas le même nombre d'individus, mais elles se distinguent nettement les unes des autres et c'est précisément ce que nous recherchions. Réaliser une CAH en amont de l'AFD permet d'alimenter l'AFD avec des groupes très bien définis : le pourcentage de reclassement correct est bien meilleur (Tableau 41) qu'en considérant directement les grandes régions minières.

from \ to	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	% correct
1	934	27	0	0	0	0	1	0	962	97,09 %
2	9	863	6	0	0	0	3	0	881	97,96 %
3	0	1	40	0	0	0	0	0	41	97,56 %
4	0	0	1	12	0	1	0	0	14	85,71 %
5	0	0	0	0	4	0	0	0	4	100,00 %
6	0	0	0	0	0	6	0	0	6	100,00 %
7	0	0	0	0	0	0	25	2	27	92,59 %
8	0	0	0	0	0	0	0	9	9	100,00 %
Total	943	891	47	12	4	7	29	11	1944	97,38 %

Tableau 41 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée sur les mêmes 1944 signatures isotopiques de minerais que précédemment, mais avec des groupes définis par CAH.

Nous pouvons donc employer cette discrétisation et utiliser les regroupements de signatures de minerais pour les comparer aux signatures des artefacts. L'AFD nous indiquera pour chaque artefact sa probabilité d'appartenir à un groupe de signatures de minerais.

IV/2.b Pas à pas détaillé du traitement statistique mis au point

Le fondement du protocole retenu consiste à discriminer les signatures de minerais à l'aide d'une CAH puis de discuter de l'appartenance des signatures des artefacts aux regroupements de signatures de minerais créés par CAH à l'aide d'une AFD. Ce protocole a fait l'objet de plusieurs publications (Tomczyk *et al.*, 2019 et 2021b). Dans le cas où la CAH ne permet plus de discrétiser convenablement des sous-classes, l'utilisation de K-means a été entreprise. Ce traitement a été effectué sur les signatures isotopiques du plomb précédemment recensées. Les fichiers Excel comportant les étapes de discrétisation et le résultat de l'attribution des signatures d'artefacts à une classe statistique sont disponibles en annexe. Les fichiers Excel ont été séparés dans plusieurs dossiers correspondants aux différentes périodes considérées.

Le logiciel XSLSTAT (Version 2014.5.03) a été utilisé afin de réaliser l'ensemble des traitements statistiques.

CAH sur les minerais puis AFD sur minerais et artefacts

Chaque document Excel comprend une première feuille avec les signatures des gisements pris en compte et une seconde feuille avec les signatures des artefacts dont nous cherchons à déterminer la provenance.

Une première CAH est alors entreprise sur les signatures de minerais afin de les discrétiser (soit de les séparer en plusieurs classes statistiques). Les classes qui contiennent 3 individus ou moins sont

retirées (« feuille rejets ») et une nouvelle CAH est réalisée jusqu'à ce que les classes constituées soient toutes représentées par au moins 3 individus.

Une fois les classes de signatures de minerais définies, une AFD est réalisée. Les données qualitatives sélectionnées correspondent aux classes statistiques de signatures de minerais précédemment établies. Les données quantitatives correspondent aux signatures isotopiques des minerais. La provenance des artefacts est recherchée via l'outil de prédiction.

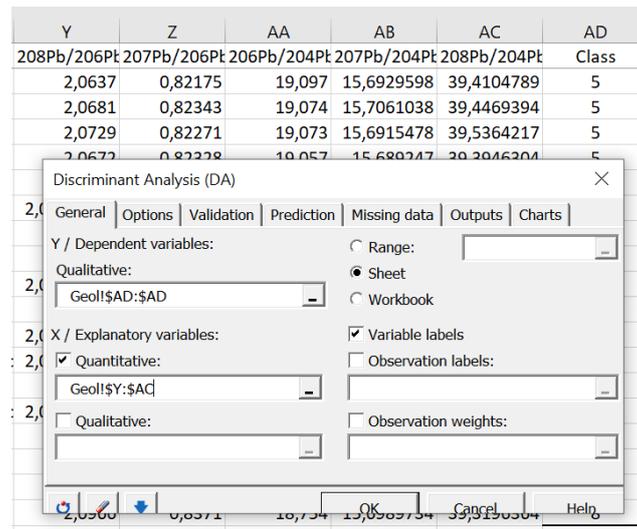


Figure 217 : Interface du logiciel XLSTAT pour la réalisation des AFD.

Première AFD : des artefacts très radiogéniques à écarter

Un défaut de l'outil de prédiction de l'AFD est qu'il cherche toujours à établir une correspondance. Il n'indique donc pas clairement qu'une signature d'artefact ne correspond à aucune classe de signature de minerai³³⁰. Ainsi, la première AFD réalisée présente le risque de proposer une correspondance entre des signatures d'artefacts et des signatures de minerais aux coordonnées factorielles très différentes de celles de la région dont leur provenance est supposée (Figure 218). Il est donc important de contrôler les résultats de ce premier traitement.

³³⁰ Ce que permet une CAH : un artefact dont la provenance ne correspond à aucune classe de signatures de minerais s'isole dans une classe dont il est le seul représentant.

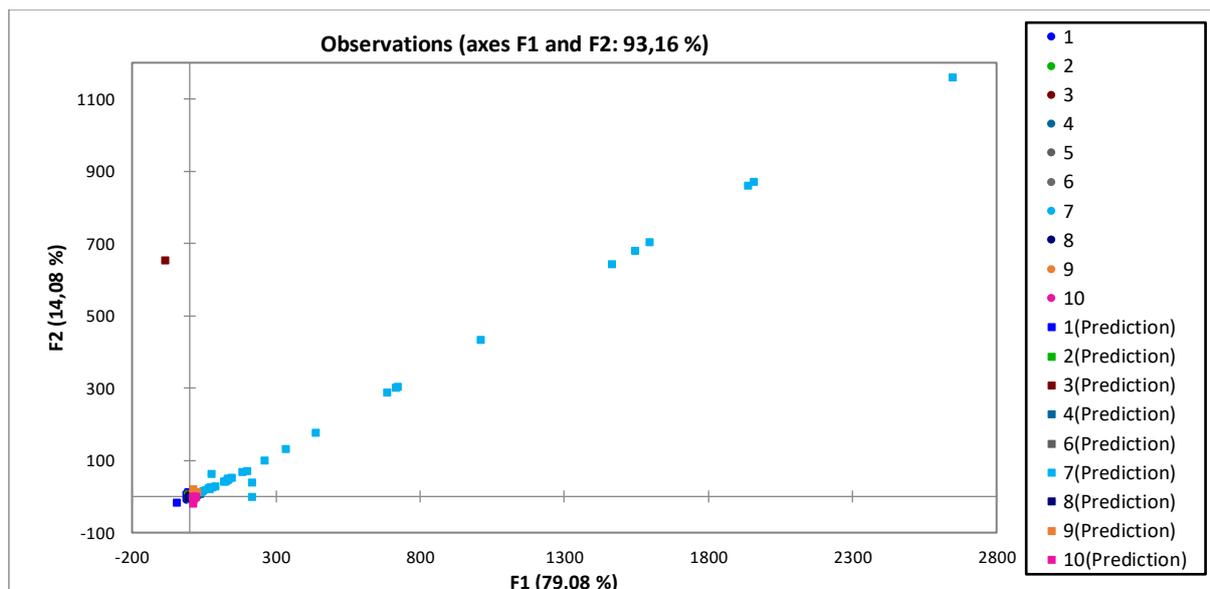


Figure 218 : Exemple d'AFD prédisant l'appartenance d'artefacts (carrés) à une classe constituée de signatures de minerais (au centre du graphique). Certains artefacts prédits comme appartenant à la classe 7 (en bleu clair) se projettent en haut à droite du graphique. Leur provenance est douteuse, car ces points se projettent largement au-delà du barycentre de la classe 7 : leurs coordonnées factorielles sont beaucoup trop importantes.

Ces signatures très différentes des autres auraient pu être identifiées directement par simple lecture du tableau de données : le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de ces objets dépasse souvent 25 alors qu'il se situe normalement autour de 18,7 (Tableau 42).

$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
0,971	0,409	41,285	16,867	40,083
1,05346	0,45393	36,5736	16,6018	38,529
1,057	0,455	36,432	16,581	38,501
1,12507	0,48132	34,2466	16,4834	38,5296
1,13616	0,485	33,95	16,4656	38,5727
1,157	0,493	33,429	16,472	38,663
1,27574	0,53892	30,1884	16,2692	38,5129
1,37724	0,57772	27,9655	16,1563	38,5157

Tableau 42 : Exemples de rapports isotopiques d'artefacts présentant des projections aberrantes.

Les motifs expliquant les valeurs très élevées de ces rapports peuvent être multiples incluant de possibles erreurs analytiques, mais aussi le fait qu'il pourrait s'agir d'artefacts issus de l'exploitation de gisements aux signatures peu communes, en particulier les gisements karstiques de la péninsule Ibérique ou certaines mines alpines. Pour autant, leurs coordonnées factorielles sont très éloignées de celles des gisements aux rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés³³¹. Dans l'état actuel de nos connaissances, aucune correspondance claire de provenance ne peut être établie pour ces artefacts. Ils ont donc été isolés et auront une provenance indiquée par un « x » signalant l'absence de résultat.

³³¹ Des gisements très radiogéniques sont courants dans le bouclier scandinave (Brown, 1966 ; Romer, 1989) mais aussi en Asie du sud-est (Pryce *et al.*, 2018 ; Hsu et Sabatini, 2019). Ils ne correspondent pas à ce que nous observons.

Des prédictions de provenance plus ou moins précises

La première étape du traitement statistique permet d'affecter les signatures d'artefacts à des classes de minerais. Chacune de ses classes est ensuite découpée en sous-classes par une nouvelle CAH. Une nouvelle AFD est réalisée afin de définir dans quelle sous-classe les signatures d'artefacts se projettent. Dans la grande majorité des cas, les résultats des AFD conduisent à des attributions plus ou moins franches à des classes statistiques de minerais.

Prenons l'exemple du découpage en sous-classes de la classe 1 des artefacts plombifères de la période 800-400 av. J.-C.³³² (Tableau 43). Certaines classes se distinguent très clairement des autres (leur « % correct » est de 100 %) alors que certaines présentent des similitudes importantes avec d'autres classes (ici la classe 3 présente des similarités avec les classes 1 et 2 d'où son mauvais pourcentage de reclassement de 58,82 %).

from \ to	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total	% correct
1	125	22	0	6	0	1	0	0	0	0	0	154	81,17 %
2	12	213	6	0	0	4	0	0	0	0	7	242	88,02 %
3	2	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	17	58,82 %
4	2	0	0	76	1	0	0	1	0	1	0	81	93,83 %
5	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	9	100,00 %
6	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	23	100,00 %
7	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	6	100,00 %
8	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	31	100,00 %
9	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	19	100,00 %
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	11	100,00 %
11	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	36	38	94,74 %
Total	141	242	16	82	10	28	6	32	19	12	43	631	88,59 %

Tableau 43 : Matrice de confusion des 11 sous-classes définies par la CAH

Le pourcentage de reclassement total est de 88,59 %. Graphiquement, cela se traduit en projection bivariée par des barycentres qui se chevauchent et des points de classes différentes qui se superposent (Figure 219).

³³² Fichier Excel Pb 800-400 BCE – 1

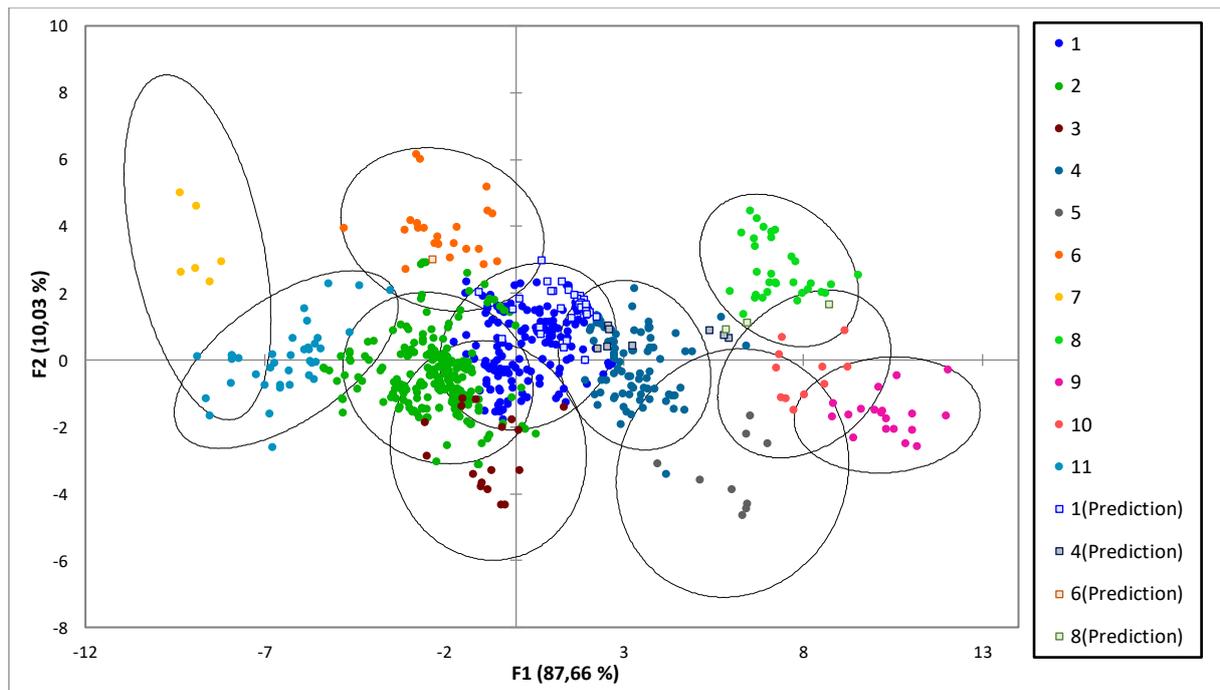
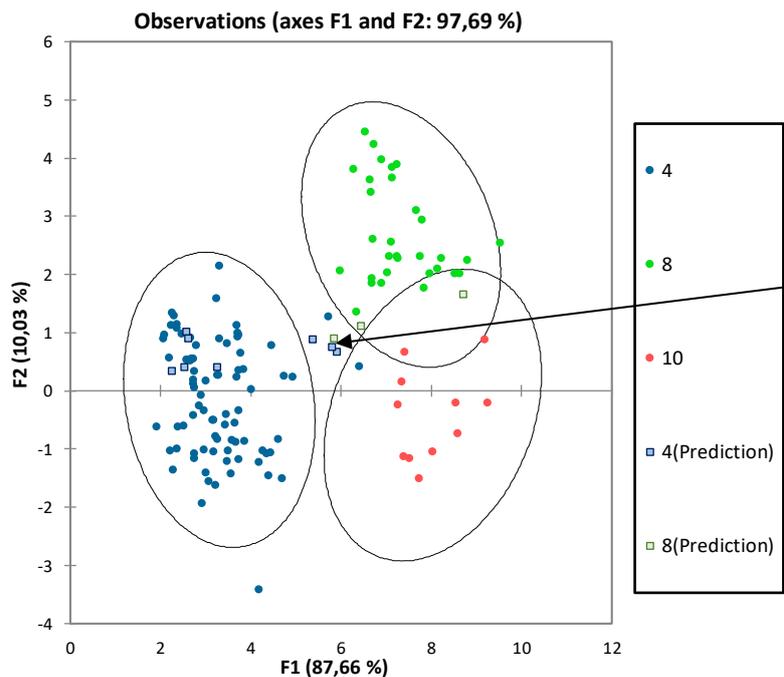


Figure 219 : Projection sur les deux premiers facteurs de l'AFD : toutes les signatures d'artefacts (carrés) ne se projettent pas clairement dans une classe constituée de signatures de minerais (cercles).

Une mauvaise variabilité interclasse joue nécessairement sur l'attribution des artefacts à une classe statistique. Dit plus simplement, plus des classes sont difficiles à différencier statistiquement et moins les artefacts pourront être clairement associés à une classe de signatures de minerais. Les déterminations de provenance sont donc plus ou moins précises car tous les artefacts ne sont pas nécessairement associés à une classe statistique.

Il n'est pas possible d'attribuer une provenance à un artefact dont les signatures se projettent entre plusieurs classes (Figure 220). Sa provenance sera indiquée « x » au même titre que les artefacts dont les coordonnées factorielles sont trop éloignées de celles des gisements. Nous pourrions émettre des hypothèses pour tenter d'expliquer pourquoi ces artefacts ne se projettent dans aucune classe : ils pourraient correspondre à des mélanges de sources ou provenir d'une mine non référencée dans la base de données. Sans plus d'informations ces hypothèses ne peuvent pas être clairement tranchées.



Dans notre exemple, certains artefacts se projettent entre plusieurs classes. C'est le cas du nuage de points d'artefacts localisé entre les classes 4 et 8. Ils présentent autant d'affinité (~48 %) pour chacune de ces classes. Les ~4 % de correspondances restantes sont pour la classe 10.

Figure 220 : Zoom sur les classes 4, 8 et 10 de la Figure 219.

Certaines provenances sont en revanche très claires. Par exemple (Figure 221), l'artefact dont la provenance est associée à la classe 6, très bien isolée (comme en témoigne son « % correct » de 100 %), possède 96,8 % de correspondance avec cette classe et seulement 2,3 % de correspondance avec la classe 2 et 0,9 % avec la classe 1. Si cette classe 6 n'est composée que de signatures de minerais d'une même région alors la provenance de l'artefact peut être considérée comme quasi-certaine. La fiabilité est indiquée comme « ok ». En revanche, si cette classe est constituée de minerais de plusieurs régions, une discrétisation supplémentaire (en « sous-sous-classe ») sera effectuée. Un nouveau document Excel est alors créé. Cette opération est renouvelée tant que l'artefact ne s'intègre par à une classe statistique correspondant à une sous-classe correspondant à une grande zone minière précédemment définie.

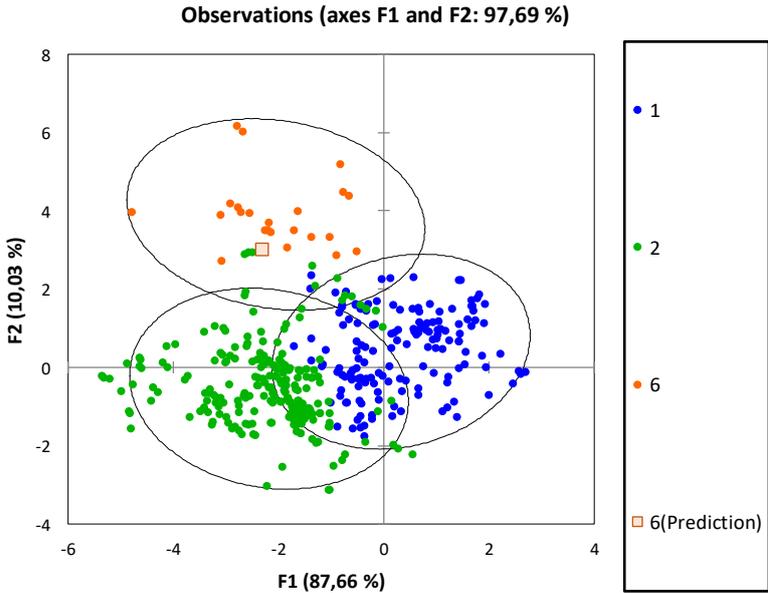


Figure 221 : Zoom sur les classes 1, 2 et 6 de la Figure 219.

Utilisation de K-means

Le traitement statistique couplant une CAH à une AFD présente une limite car il ne permet pas de descendre infiniment dans les sous-classes : les signatures finissent par trop se ressembler et la réalisation d'une CAH conduit à une variabilité interclasse quasi nulle pour l'ensemble des rapports isotopiques pris en compte. Nous proposons alors d'utiliser des K-means³³³ et donc de partitionner un ensemble de données en un nombre de classes préalablement défini. L'objectif principal est de regrouper les données de manière à ce que les points au sein d'une même classe soient similaires entre eux, tandis que les points appartenant à des classes différentes sont dissimilaires³³⁴. Ce type de traitement est souvent utilisé lorsque les jeux de données sont de taille réduite, il serait alors plus performant que le regroupement hiérarchique (Abdalla, 2022).

L'algorithme commence par sélectionner un nombre de points initiaux choisis au hasard parmi les données. Le nombre de points initiaux correspond au nombre de classes demandées³³⁵. L'analyse est itérative : pour chaque nouveau point de données, l'algorithme calcule la distance entre ce point et les centres des classes. Le point est ensuite assigné à la classe dont le centre est le plus proche. Une fois que toutes les données ont été assignées à des classes, les centres des classes sont mis à jour et remplacent les centres précédents. Les étapes d'assignation et de mise à jour des centres de classes sont répétées jusqu'à ce que la convergence soit atteinte.

Les données sélectionnées sont les mêmes que précédemment (les 5 rapports isotopiques des minerais et des artefacts appartenant à une même sous-classe). À la fin du traitement statistique, nous observons la répartition des signatures dans les différentes classes.

Ce traitement permet de « forcer » la discrimination, mais présente deux limites. Tout d'abord, dans le cas de données très homogènes, il se peut que les classes ne soient pas significativement différentes les unes des autres, ce qui rend difficile l'interprétation (et conduit à beaucoup d'hypothèses de provenance ne pouvant pas ou difficilement être tranchées). Les découpages en n classes ne présentent alors pas de résultats comparables et seules les tendances fortes seront communes à ces demières³³⁶. Plus encore, les comparaisons s'effectuent point par point via un calcul de distances euclidiennes³³⁷ pour mesurer la similarité entre les points de données et les centroïdes. Une hypothèse de provenance ne possède donc pas le même degré de fiabilité si l'artefact est inclus dans une classe ne présentant qu'une signature de minerais ou si ce dernier est associé à de nombreuses signatures d'une même zone minière. Plusieurs niveaux de précision d'attribution peuvent être distingués :

³³³ Parfois dénommés sous le terme « méthode des nuées dynamiques ».

³³⁴ L'objectif de l'algorithme est de minimiser l'inertie intraclasse, c'est-à-dire de réduire la variance à l'intérieur de chaque classe, tout en maximisant la séparation entre les classes.

³³⁵ À la différence des CAH qui calculent automatiquement le nombre de classes le plus adéquat, l'utilisation de K-means nécessite de spécifier un nombre de classes souhaitant être créées. Dans notre cas nous proposons de diviser le nombre d'analyses par environ 3 à 5.

³³⁶ La classification k-means est une méthode itérative qui, quel que soit son point de départ, converge vers une solution. La solution obtenue n'est pas nécessairement la même, quel que soit le point de départ : un artefact peut être affecté à une classe au cours d'une itération puis changer de classe à l'itération suivante (alors que les découpages opérés par une CAH présentent une répliquabilité quasi parfaite). En multipliant les points de départ et les répétitions, on peut explorer plusieurs solutions possibles et ne retenir que la solution la plus optimale pour le critère choisi.

³³⁷ Ce traitement statistique ne présente que peu de différences avec l'emploi d'une distance euclidienne seule (que nous aurions pu employer). Son avantage principal réside dans le fait qu'elle permet d'observer les différences d'attributions en fonction du nombre de classes créées.

- La signature de l'artefact s'isole, elle n'est associée à aucun minerai et sa provenance ne peut pas être supposée (la provenance est notée « x » dans les fichiers Excel) ;
- La signature de l'artefact ne s'associe qu'à une à deux signatures de minerais, la prédiction de provenance ne repose pas sur un nombre conséquent de signatures de minerais, elle est considérée douteuse et peut varier en fonction du nombre de classes demandé (résultat indiqué « gris » dans les fichiers Excel) ;
- La signature de l'artefact s'associe à plusieurs signatures de minerais (≥ 3) :
 - a. Ces minerais proviennent tous de la même région, la provenance peut être supposée, elle est indiquée « ok » et associée au nom de la région ou sous-région correspondante ;
 - b. Ces minerais proviennent de deux régions différentes : l'artefact provient probablement de l'une de ces régions sans qu'il soit possible de déterminer laquelle (le code « deuxposs » est indiqué dans le fichier de résultats accompagné des noms des différentes régions). Si trois provenances ou plus ne peuvent pas être distinguées alors le résultat est indiqué « ? » suivi de la liste des régions d'origine probables.

Les hypothèses de provenance présentent donc des niveaux de fiabilité différents. Même si un artefact correspond très bien à une région minière, il peut en réalité provenir d'un mélange de plusieurs sources. La signature de ce mélange correspondrait alors à celle d'une grande zone minière sans que le cuivre ou le plomb constituant l'artefact n'ait été produit dans la région pour laquelle une provenance a été définie. Le terme de provenance que nous employons correspond donc à une forme d'abus de langage. Le terme « similarité importante de signatures » serait plus opportun car il souligne le possible biais que nous venons d'évoquer. Toutefois, pour éviter des formulations trop complexes, nous continuerons d'utiliser le terme provenance.

IV/2.c Pourquoi prendre en compte les 5 rapports isotopiques ?

Comme déjà évoqué, il est nécessaire de prendre en compte au moins trois rapports isotopiques afin de pouvoir observer les variations des quatre isotopes du plomb (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb) dans deux diagrammes bivariés. Cinq rapports isotopiques sont alors couramment employés : $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ou $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Utiliser les 5 rapports est possible, mais peut sembler peu adéquat car il est possible de calculer l'ensemble des rapports isotopiques à partir de trois d'entre eux. Cependant, comme précédemment montré par l'observation des coefficients de Pearson, chaque rapport isotope se comporte de manière différente : il n'y a pas de relation de corrélation liant les différents rapports isotopiques (ils n'augmentent ou ne diminuent pas de manière simultanée). Il est donc pertinent de considérer l'ensemble des rapports isotopiques disponibles, car chacun influe sur la précision des attributions de provenance. De plus, les différents rapports isotopiques n'influencent pas les modèles statistiques de la même manière selon les niveaux de découpages en classes et sous-classes.

Cela s'observe graphiquement dans les cercles de corrélations qui expliquent la projection des points. Les variables sont représentées par des vecteurs qui partent de l'origine du cercle et s'étendent jusqu'à ses extrémités. La longueur de chaque vecteur représente la variance de la variable, tandis que la direction du vecteur indique la corrélation entre cette variable et les autres variables.

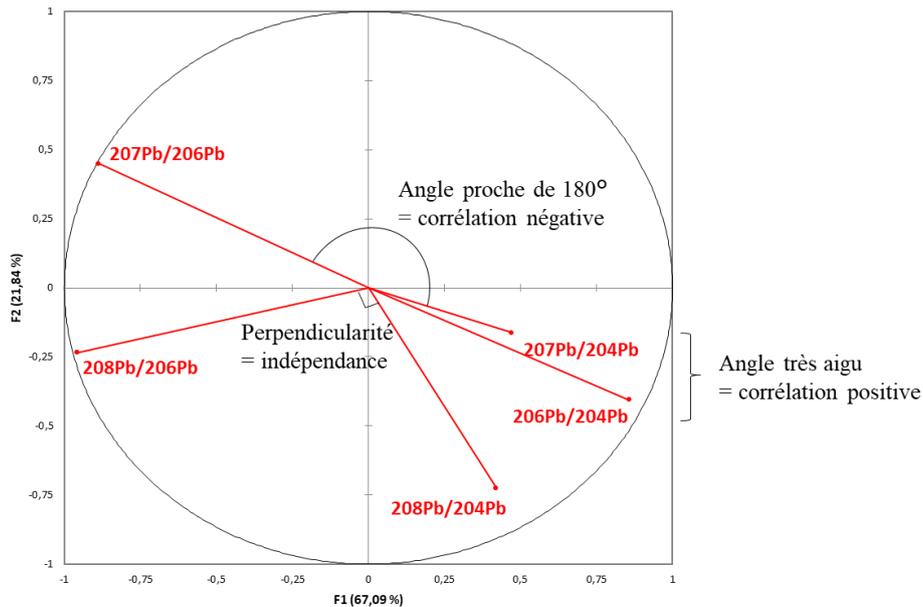


Figure 222 : Cercle de corrélation commenté (découpage de la sous-classe 2 du fichier 3000-2000 Cu).

La lecture du cercle de corrélation permet de définir quels sont les rapports isotopiques les plus discriminants, soit les segments (Figure 222) :

- Les plus longs, car plus une variable se positionne loin du centre du cercle (correspondant à la coordonnée 0,0) plus elle influence le modèle ;
- Dont les angles sont proches de la perpendicularité : un angle de 90° indique que les variables sont indépendantes l'une de l'autre (les variables dont les segments sont proches (angle proche de 0°) sur le cercle sont fortement corrélées, tandis que les variables qui sont diamétralement opposées (à 180°) sur le cercle sont négativement corrélées³³⁸).

Les informations déduites de la lecture du cercle de corrélation peuvent être retrouvées par l'observation des coefficients de corrélation Pearson : les coefficients les plus proches de zéro (ici - 0,146) correspondant aux rapports les plus indépendants (présentant un angle proche de 90° dans le cercle de corrélation) soit les rapports $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dans l'exemple cité. Les rapports présentant un angle proche de zéro dans le cercle de corrélation : $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ présentent une corrélation positive et donc un coefficient de corrélation de Pearson proche de 1 (ici +0,740). Les rapports séparés par un angle de 180° soit $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ avec $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ présentent une corrélation négative soit un coefficient de corrélation de Pearson proche de -1 (-0,945).

Variables	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1	0,740	-0,676	-0,288	-0,146
$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	0,740	1	-0,945	-0,479	-0,706
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,676	-0,945	1	0,740	0,828
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,288	-0,479	0,740	1	0,772
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	-0,146	-0,706	0,828	0,772	1

Tableau 44 : Coefficients de corrélation de Pearson correspondants au cercle de corrélation en Figure 222.

³³⁸ Des angles aigus indiquent donc une corrélation positive, tandis que des angles obtus indiquent une corrélation négative.

Dans cet exemple, le rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ n'est que peu discriminant, car il se corrèle bien avec $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. La corrélation n'est pas pour autant parfaite (auquel cas le coefficient de corrélation de Pearson serait égal à 1). Si la prise en compte ou non de ce rapport influence de façon moindre le découpage statistique, ce rapport influence tout de même la qualité du découpage obtenu : cela permet d'étirer légèrement le nuage de points.

Ne pas sélectionner l'ensemble des rapports isotopiques implique donc le risque de diminuer la précision des provenances prédites car les rapports les plus discriminants varient en fonction des ensembles de données et de leurs niveaux de découpage. Sans que cela ne soit systématique, il nous semble que les rapports normalisés sur ^{204}Pb influent sur la création des classes, tandis que les sous-classes sont davantage influencées par les rapports normalisés sur ^{206}Pb . Le choix a donc été fait de prendre en compte les 5 rapports isotopiques du plomb³³⁹.

Nous aurions toutefois pu choisir de nous abstenir d'utiliser les rapports isotopiques. Une solution envisageable, développée dans Tomczyk et Żabiński (2023), serait alors de recalculer les abondances de chaque isotope du plomb à partir des rapports isotopiques et de réaliser les traitements statistiques directement sur ces valeurs (Figure 223).

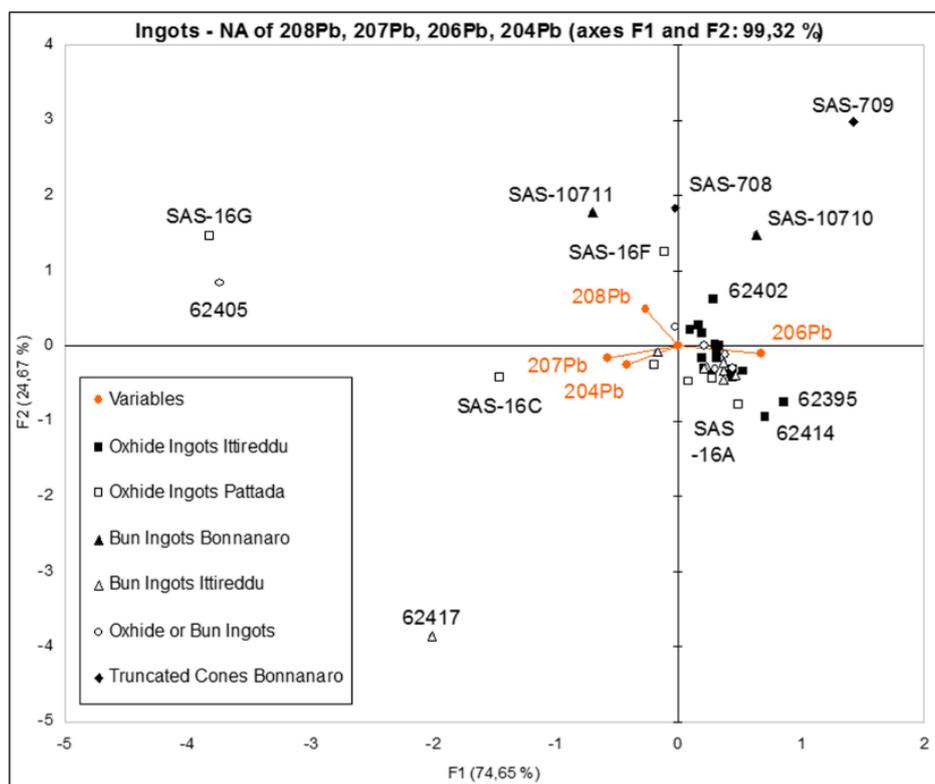


Figure 223 : Analyse en Composantes Principales (ACP) de lingots sardes avec pour données d'entrée les abondances naturelles de ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb et ^{204}Pb . Source : Tomczyk et Żabiński, 2023.

³³⁹ S'il ne fallait retenir que trois rapports isotopiques, l'observation des nombreux cercles de corrélation correspondant aux classes et sous-classes des signatures de minerais mène à un constat : le rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ n'influe toujours que très peu sur les modèles alors que le rapport $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ semble plus discriminant. Le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ influe toujours beaucoup sur le modèle. Les rapports impliquant le ^{208}Pb semblent pouvoir être utilisés de manière indifférenciée qu'ils soient normalisés sur le ^{204}Pb ou sur le ^{206}Pb .

IV/3 Critique du traitement statistique appliqué

IV/3.a Des provenances pouvant rarement être supposées

Nous avons choisi de séparer les hypothèses de provenance en cinq grandes catégories :

- « ok » : une provenance très probable a été définie : il existe une très bonne correspondance entre la signature de l'artefact et celle de la zone minière ;
- « deuxposs » : deux régions sources dont les signatures sont trop proches pour être distinguées pourraient correspondre à la source de l'artefact ;
- « ? » : trois régions sources ou plus dont les signatures sont trop proches pour être distinguées pourraient correspondre à la source de l'artefact ;
- « gris » : l'artefact ne présente de correspondance de signature qu'avec une ou deux signatures de minerais et non pas avec au moins 3 signatures d'une même région minière ;
- « x » : aucune hypothèse de provenance ne peut être proposée, car la signature de l'artefact ne correspond à aucune signature de minerais.

Cette précision des attributions varie selon les périodes considérées et est particulièrement mauvaise pour la période 3800-3200 av. J.-C. pour les artefacts en cuivre comme pour ceux en plomb (Figure 224 et Figure 227).

Pourcentage d'artefacts en cuivre dont la provenance peut être supposée

Les artefacts cuivreux dont les provenances sont les mieux définies (Figure 224) sont ceux datant du tout début du Chalcolithique en Europe (5000-3800 av. J.-C.). Peu d'*overlaps* (au moins deux régions sources possibles) ont lieu étant donné que peu de signatures de minerais sont incluses dans les données initiales. Il n'est donc pas surprenant qu'environ 50 % des provenances soient jugées très probables (« ok »).

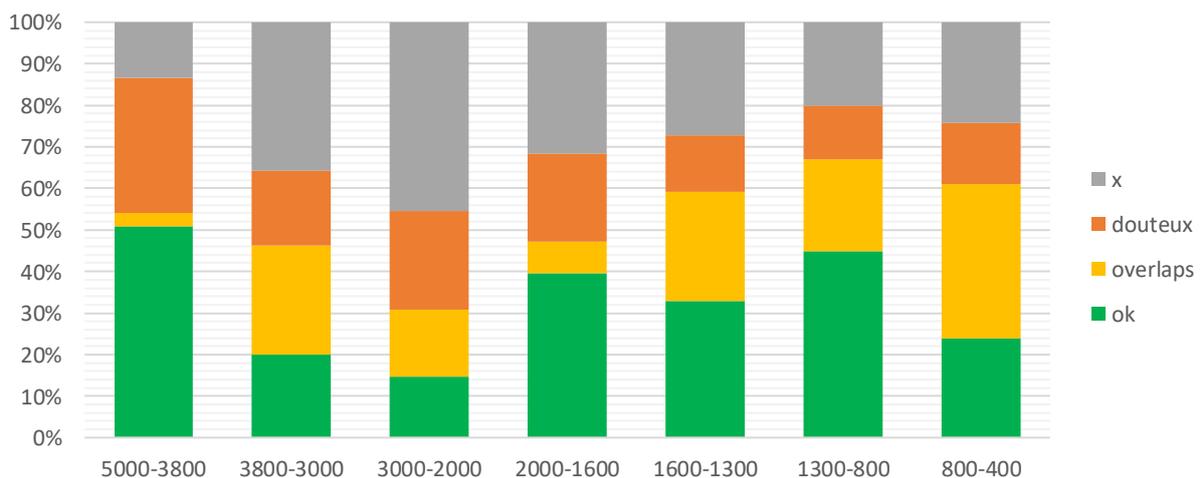


Figure 224 : Précision de l'attribution des provenances des artefacts cuivreux par grandes périodes.

Beaucoup de provenances indéterminées à la fin du Néolithique

Ces très bons taux d'attribution chutent brutalement entre 3800 et 2000 av. J.-C. : seuls moins de 20 % des provenances supposées peuvent alors être considérées comme fiables. Le nombre d'*overlaps* augmente du fait du nombre beaucoup plus important de régions considérées et aucune provenance ne peut être définie pour environ 35 à 40 % des artefacts analysés.

Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer cette difficulté d'identification des provenances :

- Le traitement statistique ne permettrait pas de différencier un nombre très important de régions ;
- Les artefacts pourraient avoir fait l'objet de recyclages ;
- Les artefacts pourraient être issus de districts miniers non analysés/non référencés.

La première hypothèse est à exclure car, bien que de nombreuses régions (et donc de signatures de minerais) ont également été prises en compte pour la période 2000-1600 av. J.-C., les attributions très probables (« ok ») sont beaucoup plus nombreuses pour ce laps de temps.

L'hypothèse de recyclages importants aux périodes anciennes est plausible. Bien que les preuves de recyclage soient ténues pour ces périodes (cf II/3.a), il est raisonnable de postuler qu'à une époque où le métal commence à circuler, les objets brisés étaient régulièrement réparés et refondus.

La dernière hypothèse est en revanche une quasi-certitude. De nombreuses petites mines étaient exploitées dans presque toutes les régions cuprifères du pourtour méditerranéen à la fin du Néolithique (cf partie 1 IV/2.e). Ces zones minières n'ont pas toutes fait l'objet de campagnes d'échantillonnage et l'origine du cuivre des artefacts issus de ces petites exploitations ne peut donc malheureusement pas être tracée.

Souvent plusieurs provenances possibles à l'âge du Bronze

Le fait que beaucoup d'artefacts en cuivre présentent des signatures qui pourraient correspondre à deux zones minières ou plus (« *overlaps* » de signatures) aux périodes 1300-800 et 800-400 av. J.-C. pourrait en grande partie s'expliquer par la prise en compte des signatures des gisements sardes en entrée du traitement statistique. Les signatures sardes étant très dispersées, elles présentent des similarités très fortes avec une grande partie des signatures européennes :

- Pour la période 1300-800 av. J.-C., la Sardaigne est une option possible pour 109 des 427 artefacts présentant deux origines possibles. Les gisements sardes sont donc impliqués dans 25 % des *overlaps* ;
- Pour la période 800-400 av. J.-C., une origine sarde est possible pour 55 des 250 artefacts présentant deux origines possibles. Les gisements sardes sont donc impliqués dans 22 % des *overlaps*.

La forte proportion de similarités pour la période précédente (1600-1300 av. J.-C.) est en revanche plus complexe à expliquer. Nous reviendrons sur cette difficulté de différencier certaines régions minières plus loin dans cette partie (cf IV/3.c) et nous commenterons également la répartition des artefacts aux provenances indéterminées (cf V/5.d).

Concernant ce dernier point, nous pouvons cependant dès à présent dire que les artefacts ne présentent pas plus de provenances indéfinies dans certaines zones géographiques et semblent se répartir de manière assez aléatoire dans l'espace (Figures 225 et 226).

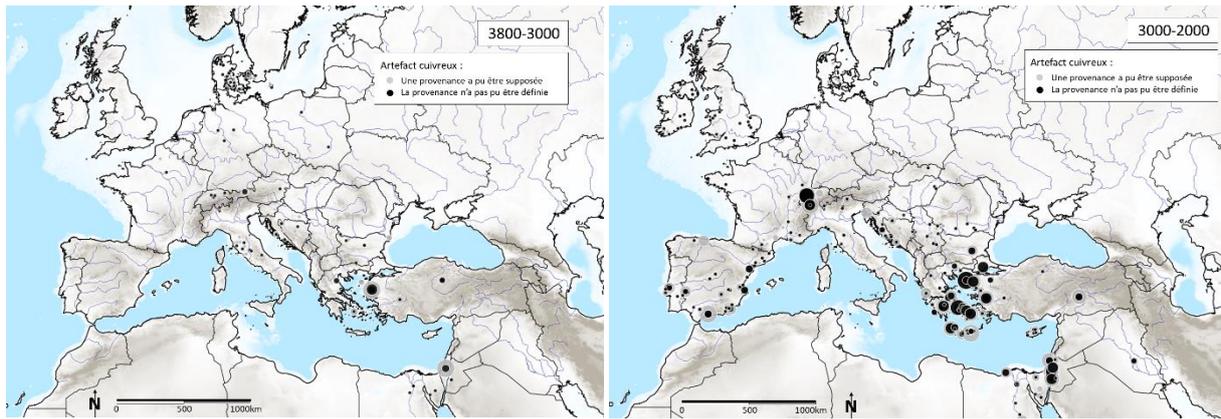


Figure 225 : Répartition des artefacts en cuivre (datés de 3800-3000 et 3000-2000 av. J.-C.) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).

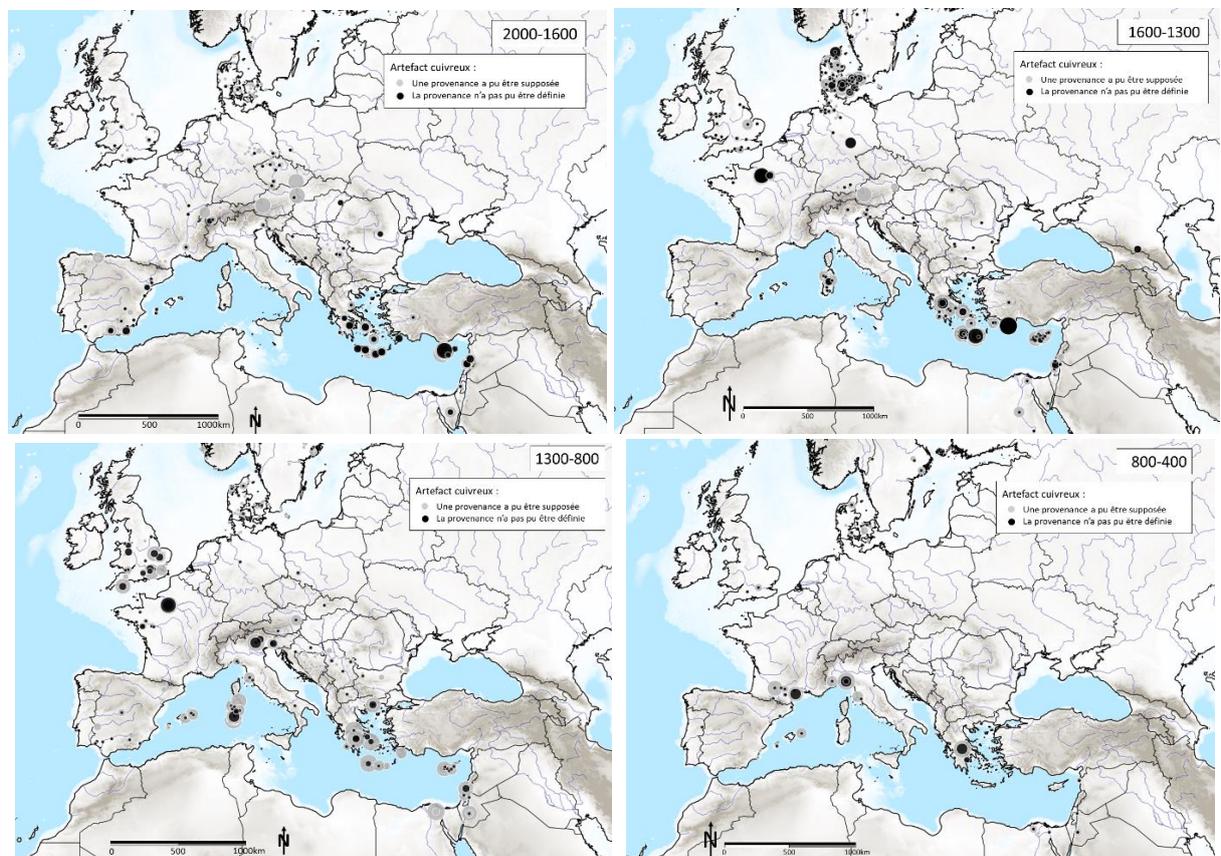


Figure 226 : Répartition des artefacts en cuivre (datées de l'âge du Bronze) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).

Pourcentage d'artefacts en plomb dont la provenance peut être supposée

Les pourcentages de provenances supposées (« ok ») et indéterminées (« x ») varient moins fortement selon les périodes pour les artefacts en plomb (Figure 227) qu'elles ne varient pour ceux en cuivre.

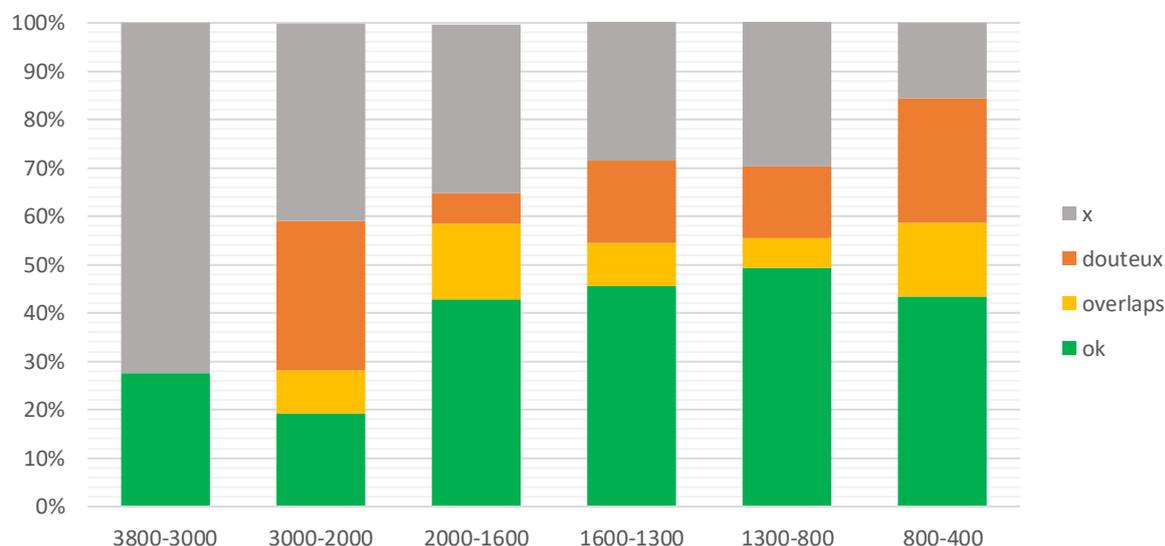


Figure 227 : Précision de l'attribution des provenances des artefacts riches en plomb par grandes périodes.

Les provenances sont également mal identifiées pour les périodes 3800-3000 et 3000-2000 av. J.-C. mais, entre 2000 et 400 av. J.-C., des provenances probables (« ok ») peuvent être proposées dans 40 à 45 % des cas et les *overlaps* ne sont observés que pour 10 à 15 % des provenances proposées³⁴⁰. Les provenances douteuses et non définies représentent environ 40 % des attributions.

Les provenances indéfinies (« x ») sont en revanche plus nombreuses pour les artefacts en plomb datant d'avant l'âge du Bronze (soit avant 2000 av. J.-C.) que pour ceux en cuivre (environ 20-30 % des attributions prédites). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le plomb contenu dans les artefacts proviendrait de sources dont les mines sont encore probablement à découvrir. Il ne serait également pas à exclure qu'un recyclage plus important du plomb puisse alors avoir lieu (cela sera discuté par la suite, cf VI/1).

Tout comme nous l'avons observé pour le cuivre, les artefacts contenant du plomb dont la provenance ne peut pas être tracée ne se répartissent pas dans des secteurs géographiques spécifiques au Néolithique (Figure 228) comme à l'âge du Bronze (Figure 229).

³⁴⁰ L'explication la plus plausible serait alors que les régions prises en compte ne variant que très peu, les *overlaps* sont à peu près toujours les mêmes.

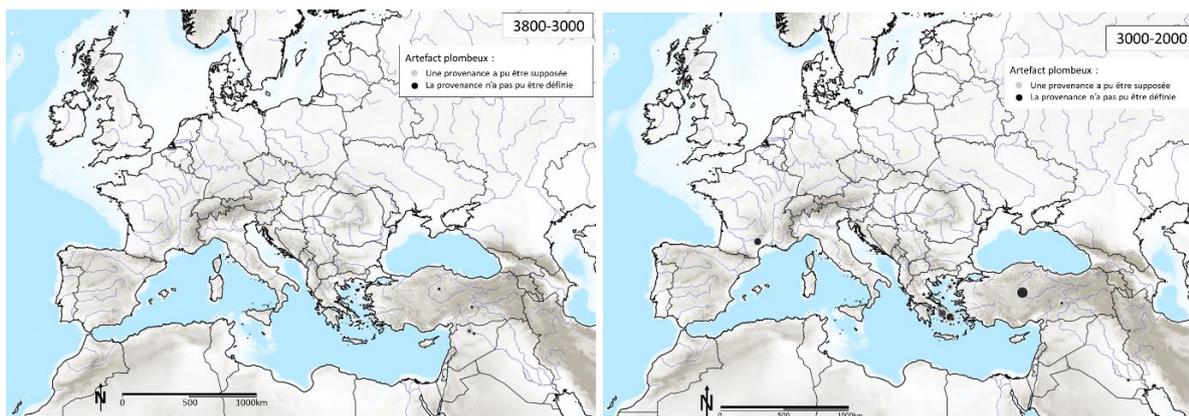


Figure 228 : Répartition des artefacts plombeux (datés de 3800-3000 et 3000-2000 av. J.-C.) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).

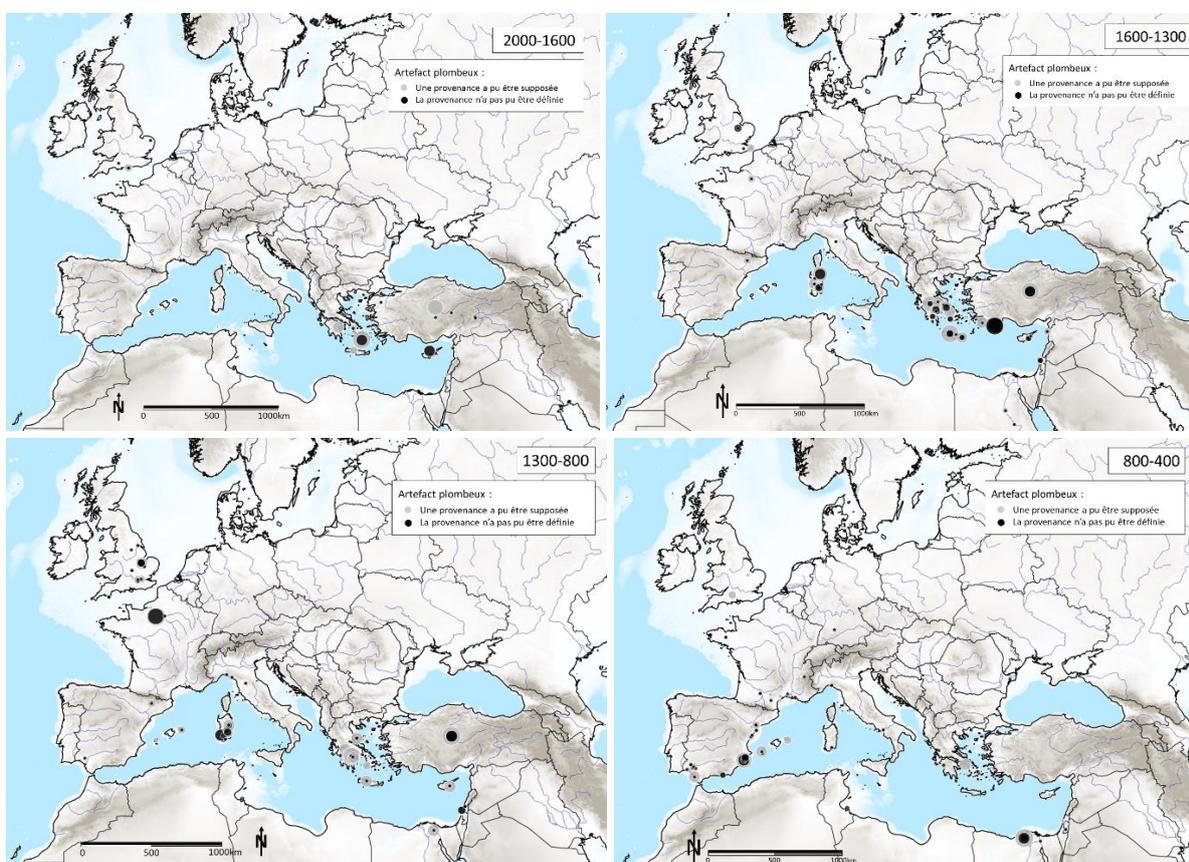


Figure 229 : Répartition des artefacts plombeux (datés de l'âge du Bronze) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).

En conclusion, le protocole employé permet de définir des similarités de signatures entre des régions de production et des artefacts contenant du métal produit dans ces régions.

Le nombre d'artefacts pouvant être clairement reliés à des régions de production (« ok ») est faible : il est d'environ un tiers pour les artefacts en cuivre et de 40 % pour ceux contenant du plomb. Ces correspondances ne sont toutefois basées que sur la chimie et les mathématiques. La question de la cohérence de ces résultats avec les données archéologiques doit donc être posée.

IV/3.b Cohérence des résultats avec les données archéologiques

Des résultats comparables avec eux que nous aurions pu obtenir par lecture graphique

Scories et lingot de l'atelier du Planet

Les résultats du traitement statistique et ceux obtenus par lecture graphique sont similaires en ce qui concerne les productions néolithiques du site du Planet (Aveyron). En observant attentivement la projection bivariée des rapports isotopiques des minerais environnants et des productions du site, nous étions arrivés à la conclusion que le gisement précis d'origine des productions de l'atelier reste à déterminer (cf II/3.a)³⁴¹. Or, le traitement statistique ne trouve également pas de similarité entre les minerais échantillonnés dans les filons analysés et les matériaux retrouvés sur site. Il n'en détecte pas non plus avec d'autres régions distantes.

Le traitement statistique fournit donc un résultat attendu : le gisement dont sont issus les minerais traités dans l'atelier doit encore être recherché.

Des résultats similaires à ceux que nous aurions pu obtenir par lecture graphique

Cette première constatation souligne qu'un résultat de provenance «ok» n'est fourni que lorsque l'artefact présente une similarité (quasi)parfaite avec les minerais pour l'ensemble des 5 rapports isotopiques considérés.

Cela semble se confirmer à plus large échelle : les signatures des minerais issus des grandes régions (archéo)géologiques et celles des artefacts dont la provenance est quasi-certaine («ok») sont très fortement corrélés comme le montrent les digrammes bivariés de l'ensemble des rapports isotopiques (exemple en Figure 230).

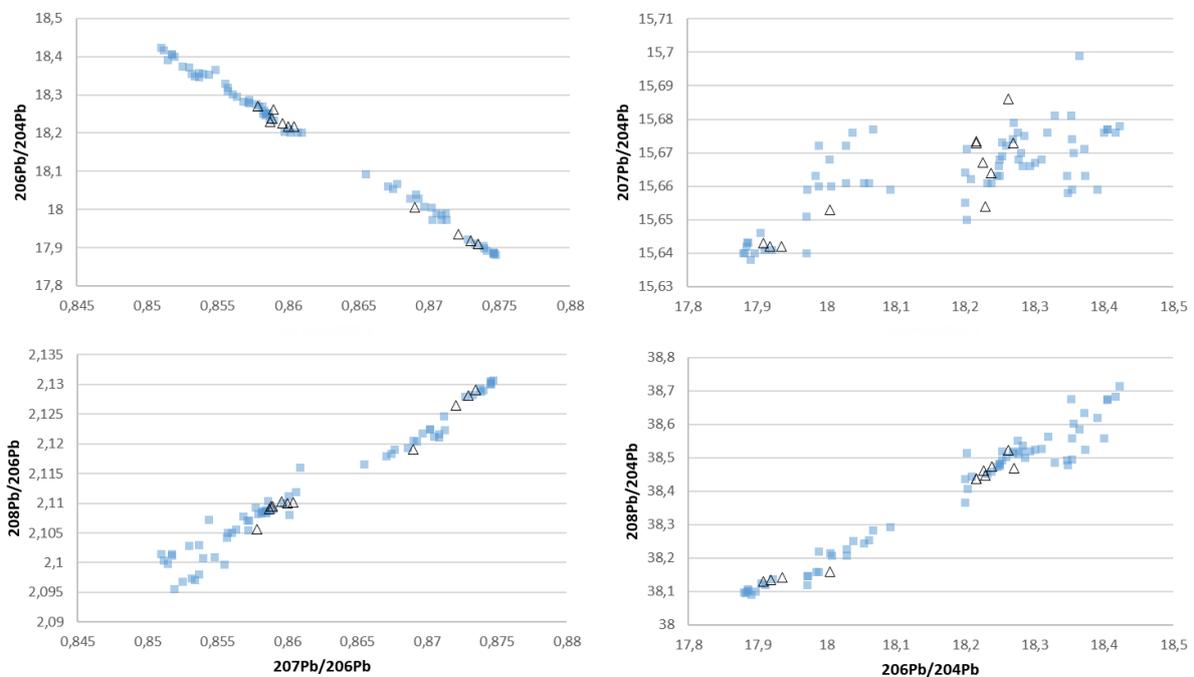


Figure 230 : Projection des signatures de minerais (carrés) des Alpes centrales considérées dans notre étude et des artefacts affectés à cette provenance (triangles) pour la période 2000-1600 av. J.-C.

³⁴¹ Les matériaux archéologiques possèdent des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ légèrement plus faibles que les minerais échantillonnés

De plus, et de façon quelque peu surprenante, les provenances que nous considérons douteuses (« gris »), car ne se corrélant qu'avec une faible quantité de signatures de minerais (< 3) présentent des signatures graphiquement très proches des régions qui leur ont été attribuées, et ce même pour les régions présentant des données très hétérogènes telles que le Massif central (Figure 231). Elles auraient certainement été considérées comme des provenances possibles par lecture graphique.

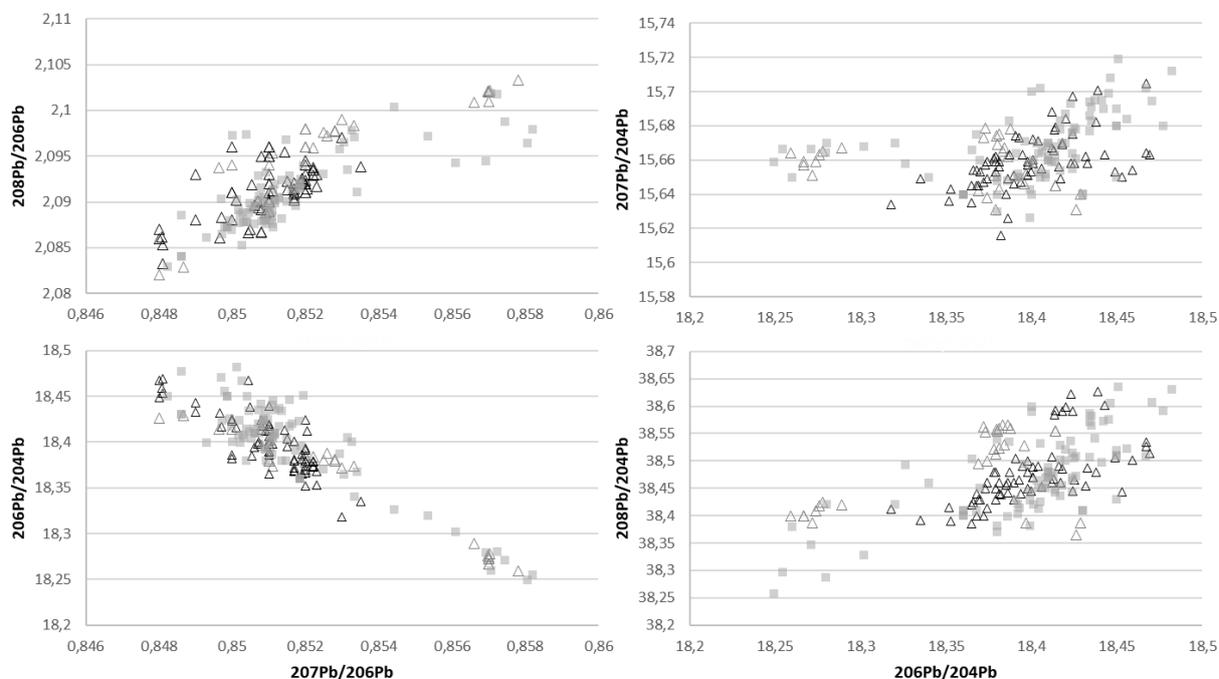


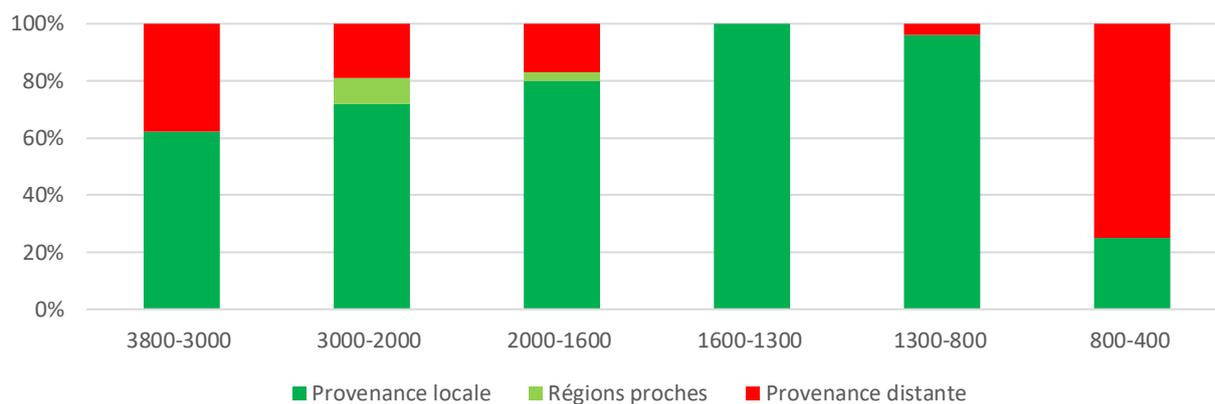
Figure 231 : Projection des signatures de minerais (carrés) du Massif central des artefacts affectés à cette provenance de manière considérée fiable (« ok ») (petits triangles noirs) et douteuse (grands triangles gris) pour la période 2000-1600 av. J.-C.

Cependant, la lecture graphique présente une part importante de subjectivité et il est essentiel de pouvoir estimer si les traitements proposés fournissent des résultats cohérents du point de vue archéologique. Pour ce faire, nous proposons d'étudier la pertinence des résultats obtenus et des provenances attendues pour des artefacts aux provenances pouvant être établies :

- Les scories de réduction dont la provenance est supposée locale ;
- Les lingots peau de bœuf supposés d'origine chypriote ;
- Les artefacts cuivreux de la période 5000-3800 av. J.-C. qui ne s'échangent très probablement pas à très grande distance.

Test sur des scories de réduction : des provenances théoriquement locales

Si très peu de scories de réduction de plomb(-argent) ont été analysées, ce n'est pas le cas des scories de réduction de cuivre. La provenance attribuée à ces scories d'extraction devrait théoriquement indiquer qu'elles sont issues de la fonte de minerais locaux mais une provenance locale n'est pas retrouvée dans de nombreux cas (Tableau 45).



	Provenance locale	Régions proches	Provenance distante	n « ok »	n total
800-400	25 %	0 %	75 %	4	27
1300-800	96 %	0 %	4 %	53	122
1600-1300	100 %	0 %	0 %	46	81
2000-1600	80 %	3 %	17 %	35	57
3000-2000	72 %	9 %	19 %	32	191
3800-3000	63 %	0 %	38 %	32	91

Tableau 45 : Provenance des scories de réduction de cuivre : pour 15 à 61 % des scories analysées une provenance « ok » a été supposée, les déterminations correctes parmi ces provenances supposément fiables varient : toutes les provenances sont correctes pour la période 1600-1300 av. J.-C. (100% de provenances locales) mais seules 25% des scories ont été attribuées à leur région de production pour la période 800-400.

Ces mauvais résultats pourraient s'expliquer par la fonte de minerais présentant des signatures différentes³⁴² mais l'explication la plus plausible est que tous les gisements localisés à proximité des lieux de découverte des scories de réduction n'ont pas nécessairement été analysés. Cette dernière remarque expliquerait pourquoi les scories de réduction issues de sites pour lesquels les gisements n'ont pas été caractérisés possèdent des taux d'attribution très mauvais.

Les sources locales n'étant pas présentes dans la base de données, les signatures scories sont associées à des gisements présentant des signatures très proches des gisements d'origine. Ces possibles erreurs affectent principalement les scories découvertes dans des régions éloignées de l'Europe de l'Ouest, notamment en Iran et en Irak (Tableau 46). Les provenances des scories sont attribuées à des sources européennes ; par exemple, les scories découvertes à Arisman (Iran) sont associées à des sources alpines.

	Provenance locale	Régions proches	Provenance distante	n « ok »	n total
800-400	-	-	-	0	4
1300-800	50 %	0 %	50 %	1	10
1600-1300	100 %	0 %	0 %	1	10
2000-1600	0 %	0 %	100 %	1	5
3000-2000	0 %	38 %	63 %	8	43
3800-3000	10 %	0 %	90 %	10	36

Tableau 46 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre de provenance « lointaines » dont la provenance est supposée fiable (« ok ») : peu d'attributions sont correctes du fait de l'absence de caractérisation des gisements.

³⁴² Elles pourraient également contenir des matériaux exogènes aux gisements de cuivre, en particulier des fondants dont la signature peut différer de celles du gisement de cuivre.

Les limites que nous venons d'évoquer concernant l'absence d'analyse de certaines zones minières en activité s'appliquent également aux produits finis (soit aux artefacts) produits à partir de ces gisements. Pour les artefacts s'ajoute, qui plus est, le risque de possibles recyclages (dont la signature obtenue pourrait correspondre à celle d'une région minière dont n'est pas issu le métal constituant l'artefact).

Les artefacts découverts dans les régions éloignées et dont les gisements sont mal caractérisés (Iran, Irak, Russie, Émirats arabes unis, Arabie Saoudite, Yémen) présentent un risque important de ne pas présenter d'attributions fiables du fait du faible nombre de données de signatures de gisements disponibles pour ces régions. Nous avons donc choisi de ne pas les considérer et de concentrer nos interprétations sur l'Europe et le Proche-Orient (Anatolie et Levant) pour lesquels les attributions semblent beaucoup plus fiables (Tableaux 47 et 48).

	Provenance locale	Régions proches	Provenance distante	n « ok »	n total
800-400	100 %	0 %	0 %	1	6
1300-800	100 %	0 %	0 %	4	9
1600-1300	100 %	0 %	0 %	1	2
2000-1600	50 %	0 %	50 %	2	2
3000-2000	100 %	0 %	0 %	2	13
3800-3000	90 %	0 %	10 %	10	21

Tableau 47 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes au Proche-Orient dont la provenance est supposée fiable (« ok »).

Alors qu'en Europe la couverture des gisements est meilleure, la lecture du Tableau 48 indique que les provenances que nous considérons comme fiables ne le sont pas toutes. Si les déterminations se sont avérées correctes dans 95 à 100% des cas pour les scories des périodes 3000-2000 et 1600-800 av. J.-C., 17 et 13 % des provenances de scories présentées comme fiables ne sont pas associées à leur zone de production pour les périodes 3800-3000 et 2000-1600 av. J.-C.

	Provenance locale	Régions proches	Provenance distante	n « ok »	n total
800-400	0 %	0 %	100 %	3	17
1300-800	98 %	0 %	2 %	47	103
1600-1300	100 %	0 %	0 %	44	69
2000-1600	84 %	3 %	13 %	32	50
3000-2000	95 %	0 %	5 %	22	136
3800-3000	83 %	0 %	17 %	12	34

Tableau 48 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes en Europe dont la provenance est supposée fiable (« ok »).

De plus, les provenances de scories que nous avons considérées comme douteuses³⁴³ (en zone « grise ») ne sont que très rarement associées aux sources locales attendues (Tableau 49). La pertinence de ces provenances n'étant pas satisfaisante, nous avons décidé de ne pas afficher les provenances douteuses dans nos cartes de résultat.

³⁴³ Car les signatures ne seraient pas associées à un groupe de signature de minerais, mais à une signature isolée.

	Provenance locale	Régions proches	Provenance distante	n « gris »	n total
800-400	-	-	-	0	17
1300-800	0 %	7 %	93 %	15	103
1600-1300	50 %	0 %	50 %	2	69
2000-1600	29 %	0 %	71 %	7	50
3000-2000	63 %	4 %	33 %	52	136
3800-3000	0 %	0 %	100 %	4	34

Tableau 49 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes en Europe dont la provenance a été déterminée comme douteuse (« gris »).

Lorsque deux provenances étaient possibles, la source locale est listée dans les deux choix dans 93 à 95% des cas. Ce chiffre tombe à 50% en péninsule Ibérique dont les signatures sont hétérogènes et très proches de celles des gisements du Massif central (Tableau 50).

	Provenance locale	Provenance distante	Détail des provenances distantes
Chypre	8	3	Massif central, Sardaigne
Cyclades	20	1	Balkans
Pays de Galles	0	3	Péninsule Ibérique
Péninsule Ibérique	2	1	Massif central
Alpes centrales et de l'est	58	3	Égée, Balkans
Levant (Timna)	15	1	Balkans

Tableau 50 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes dans différentes régions d'Europe dont la provenance a été déterminée comme fiable (« ok »). Les scories considérées prennent en compte l'ensemble des périodes à partir de 3800 av. J.-C.

Ce constat souligne une fois de plus que certaines régions affichent des signatures isotopiques très similaires (en plus d'être parfois très dispersées). Les chances de retrouver les sources attendues dépendent donc fortement des régions considérées. Les provenances sont largement mieux prédites pour des régions présentant des signatures très peu dispersées et assez différentes des autres régions (telles que les Cyclades et les Alpes centrales et de l'est³⁴⁴) alors que la provenance des scories découvertes dans certaines régions aux signatures très dispersées sera mal définie (Pays de Galles, péninsule Ibérique).

Les correspondances présentées comme fiables (« ok ») auraient donc des degrés de fiabilité différents selon les régions prédites en fonction de la dispersion des signatures isotopiques régionales.

Qualité des provenances prédites pour les lingots peau de bœuf

Les lingots de type peau de bœuf³⁴⁵ ont été très largement diffusés dans l'ensemble de la Méditerranée à la fin de l'âge du Bronze³⁴⁶ (Figure 232).

La découverte d'un nombre important de lingots en Sardaigne, en Crète et à Chypre a initialement semé le doute quant à une possible pluralité de zones de productions mais de nombreuses

³⁴⁴ Ces régions se distinguent si on utilise les statistiques multivariées ; sur les diagrammes bivariés, ces régions présentent des signatures très proches d'autres régions.

³⁴⁵ Cette dénomination provient du fait que leur forme paraît imiter celle d'une peau de bœuf étirée. Cette forme spécifique avait probablement un objectif pratique, facilitant le transport et le stockage de ces lingots. Elle pouvait également avoir une signification symbolique ou rituelle.

³⁴⁶ Des gravures les représentant sont même connues en Scandinavie (Ling et Stos-Gale, 2015).

études (typologiques, composition élémentaire et isotopiques) dont celle menée par Gale et Stos-Gale (1986) ont permis de définir que les lingots peau de bœuf produits à la fin de l'âge du Bronze avaient théoriquement une provenance chypriote.

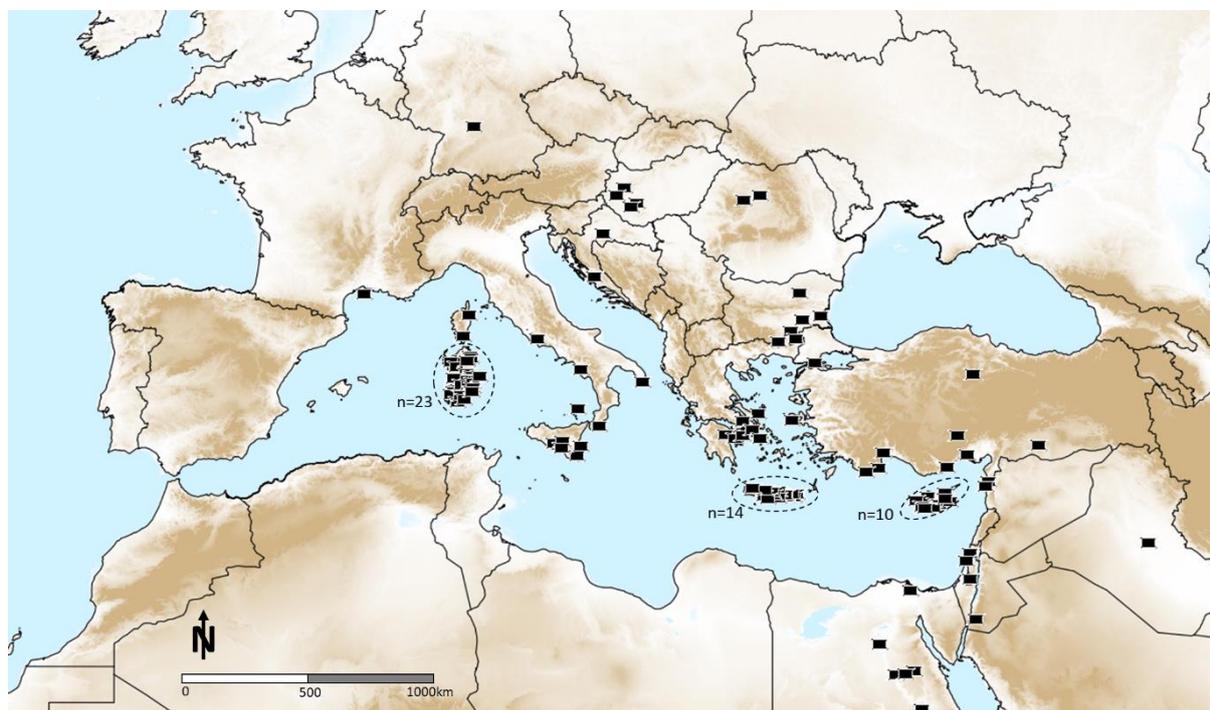


Figure 232 : Sites où des lingots de type peau de bœuf ont été découverts. Données issues de Kaiser (2013), Liard (2010), Ling et Stos-Gale (2015) et Sabatini (2016a).

Critique des provenances considérées fiables (« ok »)

Si l'on ne considère que les provenances supposées fiables (« ok »), le résultat obtenu est chypriote pour au moins 95 % des lingots peau de bœuf, ce qui est cohérent avec l'état de l'art actuel (Tableau 51).

	Chypre	Autre	n
800-400 av. J.-C.	100%	0%	65
1300-800 av. J.-C.	95%	5%	212
1600-1300 av. J.-C.	98%	2%	264

Tableau 51 : Pourcentage de provenances chypriotes pour les lingots de type peau de bœuf dont la provenance a été déterminée comme fiable (« ok »).

La cohérence de ces résultats avec ceux attendus est alors bien meilleure que pour les scories (une provenance chypriote n'a été affectée qu'aux 2/3 des scories découvertes sur l'île).

Il est encore très complexe de définir pourquoi, contrairement aux lingots, les scories ne présentent pas des provenances clairement identifiées comme locales. Il est aussi délicat de définir si les ~5 % de lingots ne possédant pas de provenance chypriote peuvent avoir été produits en dehors de l'île car il est très probable que des imitations de ces lingots aient été réalisées dans d'autres régions telles que la Sardaigne (Sabatini, 2016b)³⁴⁷. Dans notre cas, les provenances autres que chypriotes

³⁴⁷ Des analyses géochimiques ont rapidement permis de rejeter l'hypothèse d'un centre unique de production de tous les lingots, car, comme précisé par Lo Schiavo *et al.* (1985), les compositions des lingots ne constituent pas

correspondent majoritairement au district minier de Timna soit un secteur où aucune imitation de ce type de lingot n'a été supposée³⁴⁸. Des similarités de signatures isotopiques ne peuvent que difficilement justifier la probabilité d'une provenance du Levant tout comme les données archéologiques. Des représentations de lingots peau de bœuf sont bel et bien connues dans le Levant (voir la synthèse de Jones, 2007 p. 33-40) mais rien ne permet d'y supposer des imitations locales.

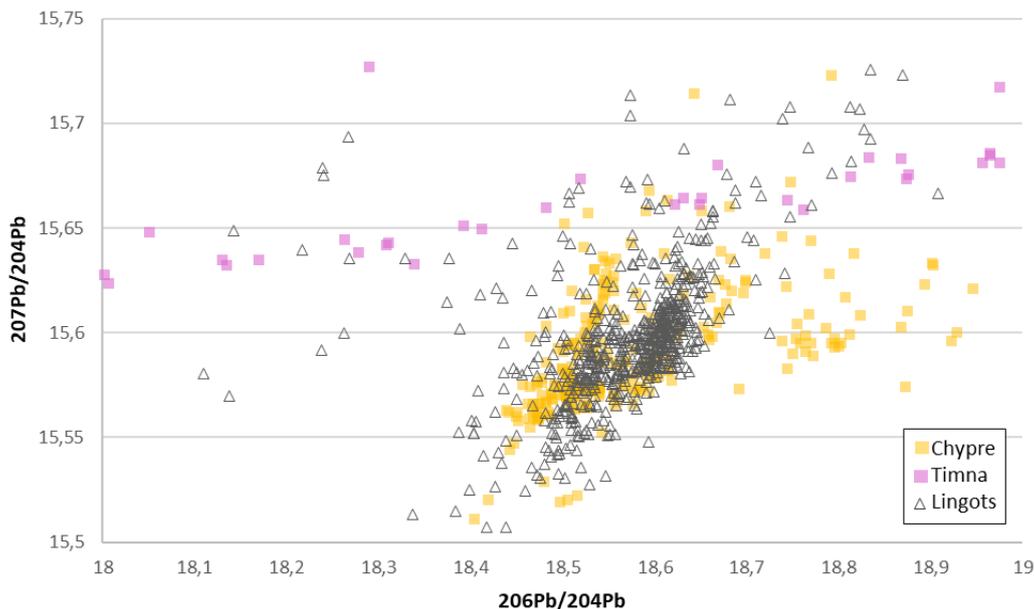


Figure 233 : Projection bivariée des rapports isotopiques du plomb $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des gisements chypriotes et de Timna et des lingots de type peau de bœuf.

Critique des provenances non fiables

Les provenances douteuses des lingots (« gris ») sont très majoritairement erronées si l'on considère que les lingots sont de source chypriote (Tableau 52). En revanche, les lingots pour lesquels plusieurs provenances peuvent être supposées (« deux poss ») présentent, dans un tiers des cas, au moins une fois l'île de Chypre parmi des origines possibles.

	Résultat ok		Résultat douteux		Deux possibilités		Trois possibilités		x	n
	Chypre	Autre	Chypre	Autre	Chypre	Autre	Chypre	Autre		
800-400	58%	0%	0%	4%	4%	2%	2%	0%	30%	113
1300-800	76%	4%	0%	3%	5%	3%	0%	1%	8%	267
1600-1300	41%	1%	1%	6%	14%	4%	0%	0%	32%	624

Tableau 52 : Précision des attributions supposées pour les lingots peau de bœuf.

un groupe de composition unique. Plusieurs hypothèses ont alors été émises pour expliquer ces variations de composition : la fonte de minerais hétérogènes chypriotes, des centres de productions existants en Sardaigne ou en Crète ou encore des recyclages importants. Il n'est cependant pas à exclure que des imitations de la forme peau de bœuf puissent avoir lieu ailleurs en Europe : une imitation de lingot a été découverte en Bulgarie (Lichardus *et al.*, 2002).

³⁴⁸ Des provenances ibériques, sardes, iraniennes et galloises ont également été identifiées bien que plus rares.

Aucune provenance ne peut être supposée (« x ») pour près d'un tiers des lingots peau de bœuf. Ce chiffre rappelle que, même pour des artefacts supposément peu recyclés, des recyclages, ou des productions issues de gisements non référencés peuvent avoir eu lieu.

Artefacts en cuivre datés de 5000-3800 av. J.-C.

Un autre test de la fiabilité des attributions de provenance issues du modèle statistique concerne les artefacts les plus anciens de la base de données, dont la datation est comprise entre 5000 et 3800 av. J.-C. Ces artefacts sont tous en cuivre, aucun n'est en plomb et la détermination de provenance n'est pas d'un grand intérêt puisque la quasi-totalité des artefacts se concentrent dans les Balkans qui sont, à cette époque, la plus grande région productrice de cuivre. Retrouver ou non une provenance des Balkans permet de tester la validité du modèle statistique.

Les régions prises en compte correspondent à celles où des exploitations sont connues. Le nombre de régions considérées est bien plus faible que pour les périodes ultérieures mais il n'en demeure pas moins que des similarités de signatures importantes sont à signaler. Par exemple, certaines régions de la péninsule Ibérique présentent des signatures très proches de gisements des Balkans (Figure 234).

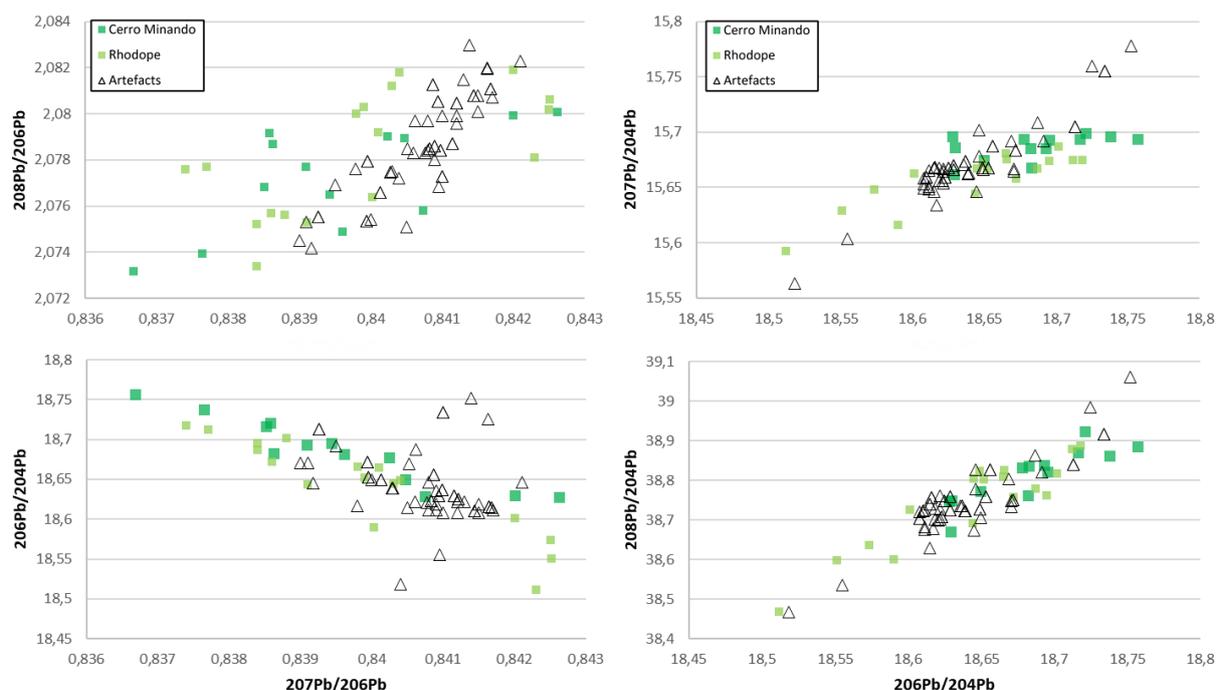


Figure 234 : Similarité (« overlaps ») de signatures entre la zone minière de Cerro Minando (péninsule Ibérique) et une partie des minerais de Rhodope (Balkans). La provenance des nombreux artefacts se projetant dans la sous-classe « 3-3-3-1 » ne peut pas être tranchée³⁴⁹.

³⁴⁹ Cela est d'autant plus vrai que les analyses ont été réalisées par TIMS et présentent donc une marge d'erreur importante ($\pm 0,1$) : tous les points sont dans la marge d'erreur analytique donc indiscernables même en employant des statistiques multivariées.

Les résultats montrent que les artefacts dont les provenances peuvent être clairement supposées se projettent tous dans des régions cohérentes avec ce qui pourrait être attendu (Figure 235) :

- Tous les artefacts des Balkans seraient de source locale ;
- Un artefact égéen pourrait être produit avec du cuivre local ;
- Quelques artefacts pourraient être composés de cuivre des Carpates.

Toutes ces régions étaient en exploitation à cette période, dans ce cas, les provenances fiables (« ok ») présentent un résultat cohérent avec ce qui était attendu.

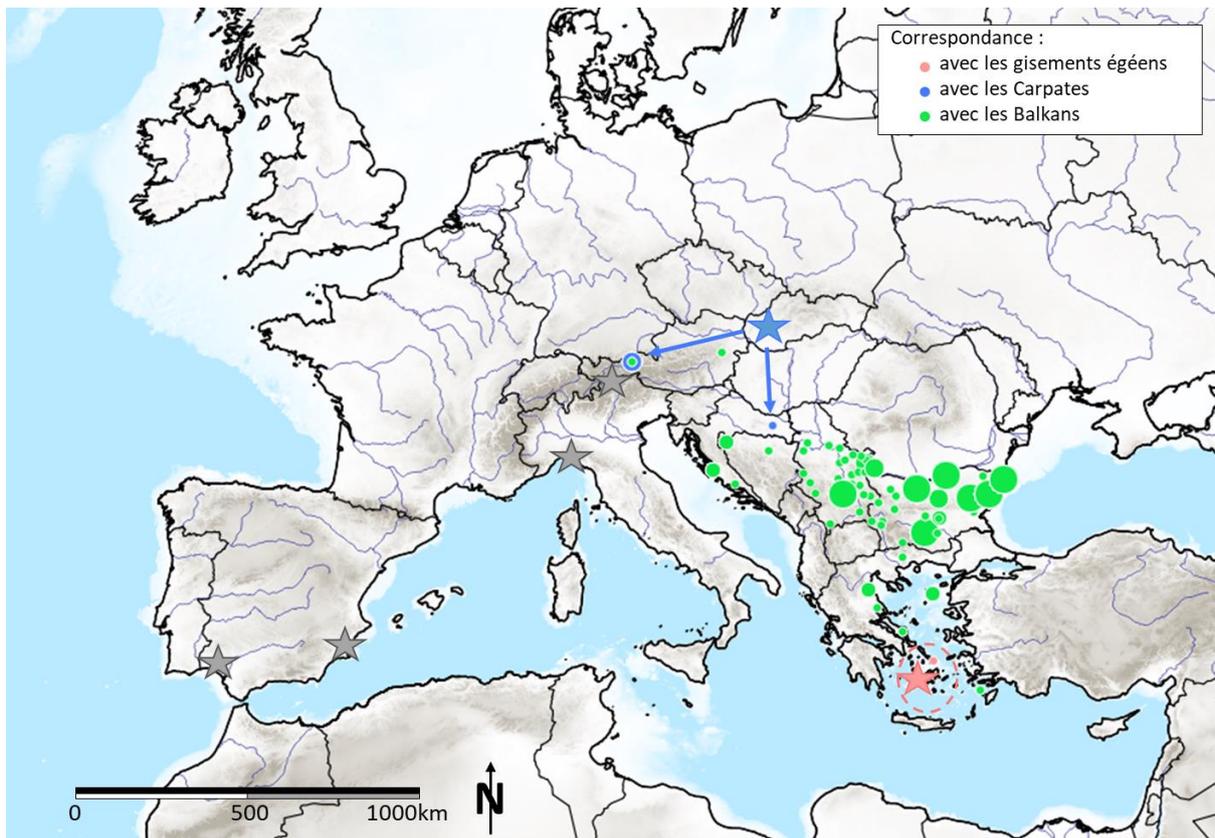


Figure 235 : Provenances fiables identifiées. Les étoiles correspondent aux zones minières considérées, celles grisées indiquent les zones minières pour lesquelles aucune exportation n'a pu être identifiée.

Les provenances déterminées sont donc bonnes pour ces artefacts comme pour les lingots chypriotes. Elles le sont moins pour les scories et pour les artefacts découverts à des distances trop importantes de notre zone d'étude. Les raisons de ces disparités peuvent être nombreuses et nous nous proposons de les détailler.

IV/3.c Hétérogénéité ou non des signatures isotopiques

Identification des régions aux attributions de provenance les plus fiables

Les données géologiques, et plus précisément leur hétérogénéité, jouent un rôle crucial dans la détermination des provenances.

Les régions dont les gisements sont caractérisés par des signatures homogènes et très différentes de celles des autres régions présentent les attributions les plus fiables. C'est le cas des Cyclades, mais aussi de Chypre, dont les signatures sont homogènes et assez différentes du reste de l'Europe du fait de

leur rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ légèrement plus fort³⁵⁰. Les Alpes de l'est (Tyrol autrichien) et centrales (Alpes italiennes) présentent des signatures qui se distinguent assez bien, car il s'agit de données récentes et très peu dispersées.

En revanche, certaines régions productrices sont mal identifiées car elles présentent des signatures très dispersées, souvent similaires à celles d'autres régions. C'est le cas notamment de la Sardaigne, de la péninsule Ibérique ou encore du Pays de Galles dont la prise en compte entraîne des difficultés d'identification des autres régions³⁵¹.

Le modèle statistique est donc moins soumis aux similarités des signatures que la simple lecture graphique, mais il ne peut pas complètement surmonter cette difficulté.

Les régions présentant des signatures hétérogènes ont presque toutes été caractérisées anciennement et la réalisation de nouvelles analyses, prenant en compte la complexité des minéralisations et utilisant des spectromètres de masse à multi-collecteurs pourraient certainement diminuer l'hétérogénéité des signatures isotopiques. Les prédictions de provenance pourraient théoriquement être améliorées avec des signatures plus précises pour les régions mal caractérisées et permettre l'identification de provenances pour les artefacts pour lesquels aucune provenance n'a été identifiée jusqu'à présent. Le risque d'une dispersion des données encore plus forte n'est toutefois pas à exclure et l'intégration d'une nouvelle région en entrée du modèle statistique pourrait malheureusement entraîner l'apparition de nouvelles similarités de signatures.

Ainsi, malgré le traitement statistique employé, des similarités de signatures isotopiques du plomb (*overlaps*) persistent entre grandes régions :

- Les Alpes centrales et de l'est et le district minier de Timna (actuel Israël)
- Chypre, Le Massif central, le Massif armoricain, les Vosges, une partie des Alpes de l'ouest
- Les Balkans, le Massif central, une partie de la péninsule Ibérique
- Les îles Britanniques et la péninsule Ibérique, une partie des Alpes de l'ouest

De nombreux artefacts issus de minéralisations récentes, mais impossibles à localiser

Les minéralisations récentes telles que les minéralisations karstiques présentent un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ très fort (pouvant atteindre 25).

Elles sont très mal caractérisées en Europe où peu de ces gisements ont fait l'objet d'une caractérisation. Les gisements de cuivre exploités en Calabre (Grotta del Tesauo, Grotta della Monaca) n'ont pas été analysés et seuls de rares gisements ibériques, autrichiens et israéliens³⁵² ont été analysés en isotopie du plomb. Cela est dommage car les gisements karstiques présentent l'avantage de permettre

³⁵⁰ Ces régions sont historiquement connues pour présenter de grands *overlaps* de signatures avec d'autres régions minières cependant, ces *overlaps* sont gommés dès lors que l'on sépare les gisements de cuivre et de plomb.

³⁵¹ Les gisements du Pays de Galles présentent des signatures très hétérogènes, principalement en raison de l'ancienneté des analyses, mais plus encore, du fait qu'il n'y a pas assez d'échantillons par mines et pas de contexte géologique accompagnant les analyses. Les signatures des gisements du Massif central sont également très hétérogènes et ne concernent pas des mines de cuivre actives à la Protohistoire. Les gisements égyptiens/du Levant souffrent d'une mauvaise caractérisation, alors que de nombreuses mines y sont signalées. De plus, ils présentent des similarités de signatures avec les gisements du Tyrol. Enfin, les gisements sardes, bien qu'ayant fait l'objet de nombreuses analyses, présentent un spectre de signatures extrêmement large et dispersé.

³⁵² Ils sont localisés dans le nord-ouest de la péninsule Ibérique, dans les Asturies et dans la région de Timna (Néguev, Israël) et dans les Alpes autrichiennes.

une progression aisée en souterrain : les mineurs peuvent profiter des galeries déjà creusées et d'une altération importante des roches.

Le manque de référentiel pour les gisements à fort rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ne permet pas clairement de définir l'origine des artefacts présentant ce type de signature. Nous pouvons supposer qu'ils ont été façonnés avec un cuivre issu d'une minéralisation très récente (potentiellement karstique) mais ne pouvons guère en dire plus si ce n'est que leur nombre augmente fortement entre 3000 et 1600 av. J.-C. soit à la période d'exploitation des mines d'Asturies (nord-ouest de l'Espagne).

	n
800-400	0
1300-800	13
1600-1300	5
2000-1600	28
3000-2000	51
3800-3000	0
5000-3800	7

Tableau 53 : Nombre d'artefacts présentant des signatures isotopiques du plomb indiquant que le cuivre qui les compose a été formé récemment.

Mine	Région	Exploitation	Références
El Aramo	Asturies	2875-2035	Domergue, 1987 ; de Blas Cortina, 1996 et 2005
El Milagro	Asturies	2700-1600	de Blas Cortina, 1996 et 2008 ; Huelga-Suarez <i>et al.</i> , 2012
La Profunda	León	2860-2200	de Blas Cortina, 1996 et Fernandez, 2010 ; Huelga-Suarez <i>et al.</i> , 2014

Tableau 54 : Datation des trois grandes mines asturiennes implantées dans des cavités karstiques.

La répartition spatiale des artefacts constitués de cuivre récent se concentre autour du nord-ouest de la péninsule Ibérique et donc des Asturies (Figure 236). C'est un second argument en faveur d'un export conséquent de cuivre depuis ces mines. Cependant, notre méconnaissance des signatures d'autres gisements karstiques appelle à la prudence concernant ces résultats. Ils restent donc hypothétiques et ne figureront pas sur les grandes cartes de synthèse proposées.

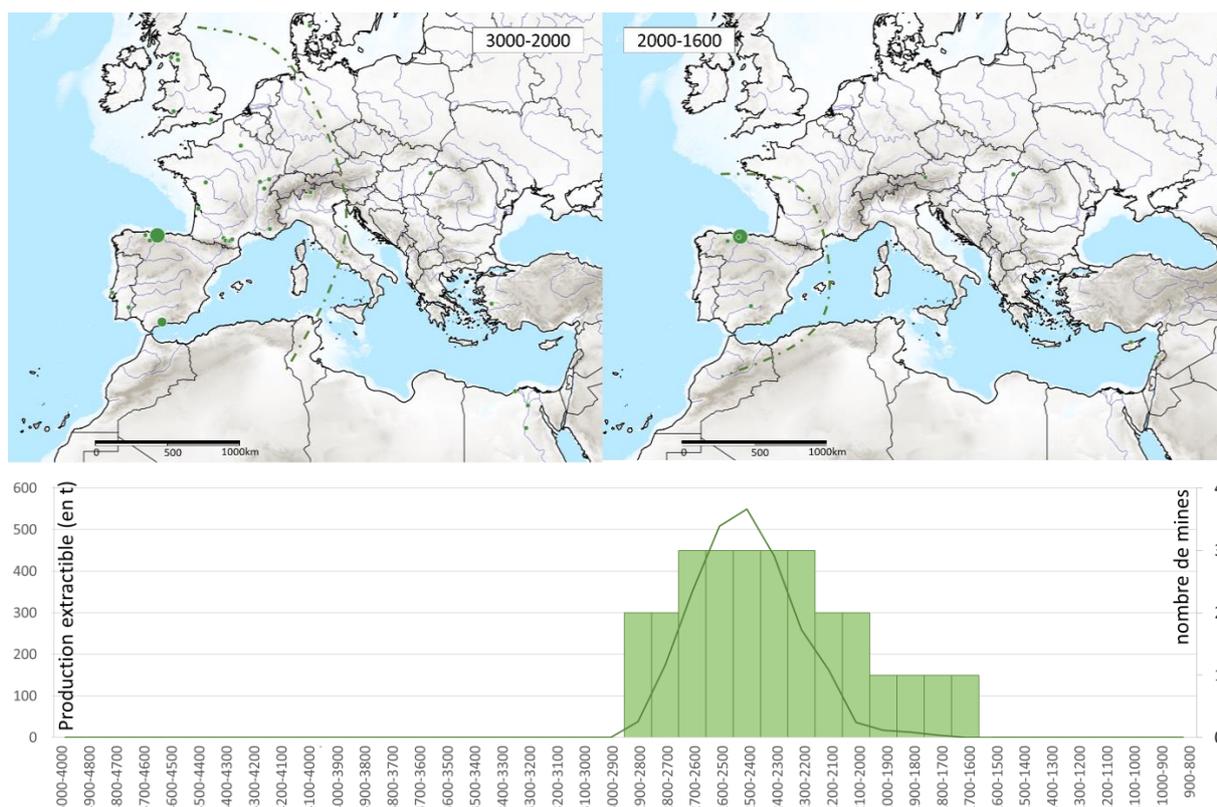


Figure 236 : En haut : localisation des artefacts pour lesquels une provenance karstique est supposée, en bas : productions théoriques des mines d'Asturies.

Incidence des signatures de minerais prises en compte

Les données en entrée du modèle statistique influencent probablement la détermination des provenances. Les nombreux artefacts sardes pour lesquels la précision de la datation est mauvaise, soit ± 1800 ans (c'est-à-dire l'ensemble de l'âge du Bronze), nous permettent de tester ces différences.

Des provenances ont été recherchées pour trois périodes : 2000-1600 av. J.-C., 1600-1300 av. J.-C. et 1300-800 av. J.-C., avec des données différentes en entrée du modèle statistique. Sur les 153 artefacts concernés, une provenance parfaitement similaire a été trouvée pour 112 d'entre eux pour les trois périodes. 73 % des attributions de provenance ne varient donc pas malgré les différences de signatures de minerais pris en compte en entrée du modèle (Tableau 55). De manière peu surprenante, il s'agit des attributions chypriotes, mais aussi aux districts de Timna et Feinan (Levant) soit des régions dont les signatures isotopes sont assez homogènes et qui se différencient bien des autres régions.

	Nombre d'artefacts	% total
Même sous-région prédite	112	73 %
Même grande région prédite	20	13 %
Au moins l'une des provenances diffère	21	14 %

Tableau 55 : Récapitulatif des similarités des provenances prédites.

13 % des provenances prédites peuvent être considérées comme très proches car les signatures sont affectées dans une même grande région (par exemple le sud-est de la péninsule Ibérique et la Catalogne ou encore les districts miniers de Timna et Feinan distants de seulement 100 km)³⁵³.

Malheureusement, 14 % des prédictions présentent au moins une des provenances qui diffère clairement des deux autres : en général aucune provenance n'a été identifiée pour l'une des périodes (l'une des provenances est notée « x » alors qu'une région d'origine a été supposée pour d'autres périodes). Un même artefact traité avec notre protocole statistique, mais comparé à des données d'entrées différentes, présentera donc un résultat proche dans 86 % des cas, mais ce résultat pourrait être clairement différent dans 14 % des cas.

Il était intéressant de conserver des signatures d'artefacts mal datées en entrée du modèle pour mener cette courte étude. Intégrer ces artefacts aux résultats définitifs de notre étude n'est en revanche pas pertinent car nous ne pouvons pas juger de la période à laquelle ces artefacts ont été produits. Nous avons donc opéré un tri des artefacts afin de ne pas prendre en compte les artefacts aux datations trop vagues.

Nous n'avons pas considéré un même écart d'années pour chaque période, mais nous avons examiné les datations des artefacts individuellement. Une incertitude de datation de ± 700 ans peut ainsi être conservée si elle s'inscrit dans le pas de temps 3000-2000 av. J.-C. alors que l'artefact sera mis de côté s'il date de l'âge du Bronze où les intervalles considérés sont plus resserrés. Nous avons également évité de faire figurer un même artefact dans plusieurs périodes. Un artefact daté 1310-1100 av. J.-C. sera pris en compte dans le pas de temps 1300-800, mais pas dans celui de 1600-1300 av. J.-C., ce dernier étant plus représentatif du Bronze final que du Bronze moyen d'Europe occidentale.

Ce découpage n'exclut pas de possibles erreurs, car, même si un artefact présente une datation très précise, il a fallu un délai à l'objet (où à sa matière première) pour se rendre de sa zone de production à sa zone de consommation (Pollard *et al.*, 2014). Ce délai peut être quasiment instantané lorsque ces deux zones sont géographiquement très proches mais des temps de trajets conséquents ont dû être nécessaires si ces deux zones sont distantes de plusieurs centaines de kilomètres. Outre le temps de trajet lié aux échanges, certains objets se sont certainement transmis de génération en génération. La datation de la fabrication d'un artefact n'est donc pas toujours celle de la couche qui la contient et des décalages de plusieurs décennies ne sont pas à écarter.

IV/3.d Essai de résolution des *overlaps*

Le nombre de signatures d'artefacts qui se répartissent dans une classe statistique englobant plusieurs régions géographiques (« deuxposs » et « ? ») varie entre 3 et 32 % en fonction des périodes étudiées. Plus de 1600 artefacts présentent donc deux provenances possibles ou plus. Identifier la provenance la plus probable parmi ces provenances a demandé de rechercher plusieurs critères afin de définir quelle origine est la plus probable. Certains critères sont particulièrement pertinents pour certaines périodes, tandis que d'autres ne peuvent être utilisés que comme éléments de validation (Tableau 56). Le résultat proposé sera la région répondant au plus grand nombre de critères.

³⁵³ Elles impliquent surtout des régions présentant des signatures isotopiques plus éparpillées telles que la péninsule Ibérique et dans une moindre mesure les îles britanniques.

Critère	Hypothèse de départ	Pertinence	Limites
Distance à la source ?	La source la plus proche serait la plus pertinente en particulier au début du Néolithique.	Cette hypothèse est moins pertinente quand les échanges à grande distance sont courants soit à partir de l'âge du Bronze.	Les sources possibles sont parfois équidistantes du lieu de découverte. Le mode de transport (terrestre ou maritime) peut influencer les facilités d'export ³⁵⁴ .
Même complexe culturel ?	Les échanges seraient plus nombreux au sein d'un même complexe culturel.	Rejoint l'idée précédente, mais plus pertinente dans le cas de sites peu distants.	Les deux sources possibles peuvent être dans le même complexe culturel ³⁵⁵ .
Typologie caractéristique ?	L'artefact a-t-il une typologie caractéristique d'une région de production ?	Limitée, car la typologie n'indique pas l'origine des minerais ³⁵⁶ : elle permet de définir une aire de consommation.	Très peu de typologies sont précisément décrites. Plus rares encore sont celles liées à des zones de production.
Exploitations contemporaines ?	Le métal composant l'artefact a plus de chances de venir d'une zone minière en activité.	Forte pour le cuivre, car les zones minières sont assez bien définies, plus faible pour le plomb.	Les activités minières sont souvent mal datées et le métal peut provenir d'une zone où aucune mine n'a encore été découverte.
Gisement à arsenic ?	Un artefact en cuivre arsénié a théoriquement été produit à partir d'un gisement contenant de l'arsenic.	Limitée lorsque les cuivres arséniés sont en circulation, car presque toutes les zones minières exploitent des gisements à As/Sb.	Il n'est pas toujours possible d'affirmer qu'une mine ou qu'une zone minière n'ait pas pu contenir des filons riches en arsenic aujourd'hui disparus.
Correspondance basée sur un gisement de cuivre ou de plomb ?	Un artefact en cuivre provient d'une minéralisation cuprifère et non d'une minéralisation ne contenant que des mouchetures de cuivre.	Moyenne, car des mouchetures de cuivre peuvent posséder une signature proche des gisements de cuivre locaux.	Certaines régions n'ont fait l'objet que d'analyses de minéralisations plombifères alors qu'elles présentent des gisements de cuivre (ex : le Massif central).

Tableau 56 : Critères pris en compte pour la détermination de la provenance la plus probable dans le cas où plusieurs sources possibles ne peuvent pas être différenciées statistiquement.

Par exemple, un artefact de typologie galloise découvert au Pays de Galle daté d'une période où les mines sont en exploitation dans cette région aura plus de chance d'être constitué de cuivre gallois que de cuivre alpin. Ce simple croisement d'information permet de proposer une provenance clairement préférentielle parmi celles possibles pour au moins les deux tiers des artefacts. Seule, la provenance de 36 à 20 % des artefacts ne peut pas être résolue à l'aide des critères sélectionnés (Tableau 57).

³⁵⁴ Un artefact découvert dans les Cyclades est à quasi-équidistance de Chypre et des Balkans, mais les modes d'acheminement du minerai seraient différents.

³⁵⁵ Par exemple : le Pays de Galles, le sud de l'Irlande et la Bretagne sont tous dans le complexe Atlantique.

³⁵⁶ Plusieurs sources de métal peuvent alimenter un atelier et des « jumeaux typologiques » produits dans cet atelier pourraient présenter des compositions différentes : Gabillot (2021 p.125-126) précise qu'il faut plusieurs heures pour que le métal contenu dans un moule refroidisse complètement et qu'il faudrait 4 jours dédiés à couler du métal dans un même moule pour obtenir 8 lingots issus de ce même moule.

Provenance	supposable	non résolue
800-400	65,9 %	34,1 %
1300-800	78,6 %	21,4 %
1600-1300	79,5 %	20,5 %
2000-1600	75,6 %	24,4 %
3000-2000	72,8 %	27,2 %
3800-3000	63,6 %	36,4 %

Tableau 57 : Pourcentage d'artefacts pour lesquels une provenance apparaît nettement plus pertinente suite à la prise en compte de critères permettant de trancher entre deux provenances possibles.

Après avoir réalisé ce long travail de compilation et de traitement statistique, nous n'avons déterminé une origine que nous considérons relativement fiable que pour un peu moins d'un tiers des artefacts analysés en isotopie du plomb. Les provenances déterminées à l'aide du traitement statistique que nous avons mis au point ne sont pas infaillibles et contiennent sans nul doute des erreurs. Si nous prenons en compte les tests réalisés sur les artefacts sardes, les lingots chypriotes et les scories, nous pouvons supposer qu'entre 5 et 17% des provenances considérées comme fiables pourraient correspondre à des erreurs. Cette proportion n'est pas anodine et il sera important de la garder en mémoire lors de l'interprétation des résultats.

Les grands axes d'échange que nous allons nous efforcer de tracer seront basés sur un nombre conséquent de provenances similaires afin d'éviter les erreurs d'interprétation.

V/ Résultat : cartes des exportations par régions productrices et par période

Les provenances obtenues ont été présentées par grandes régions minières³⁵⁷ (colonne « Inter resu ») pour le cuivre et le plomb. Les sous-régions auxquelles les artefacts sont affectés sont visibles dans les tableaux de données en Annexe de ce manuscrit, dans la colonne « sous resu ». Elles n'ont pas été incluses dans les cartes produites, dans un souci de simplification et de lisibilité. Cependant, des changements notables de sous-régions productrices seront évoqués dans le corps du texte. Par exemple, nos résultats indiquent que les provenances égéennes seraient liées à l'exploitation des gisements de Çanakkale et du Laurion entre 3000 et 2000 av. J.-C., puis des Cyclades et du Laurion entre 1300 et 800 av. J.-C.

Certaines régions ne semblent ni avoir produit ni avoir exporté³⁵⁸ du cuivre et/ou du plomb à certaines périodes. Elles ne figurent que dans les résultats de leurs périodes de production.

Dans un premier temps, nous avons choisi de présenter des cartes de résultats bruts par grandes régions afin d'observer plus aisément les variations des exportations dans ces dernières à travers le temps. Pour améliorer la lisibilité des cartes compilées, qui seront ensuite générées à partir des données brutes, nous avons décidé de représenter chaque région exportatrice ainsi que les artefacts issus de son métal à l'aide de couleurs distinctes.

Des figurés ont été sélectionnés afin de faciliter la lecture des cartes. Ont été représentés sous la forme de points :

- En couleur, les artefacts dont les signatures présentent une correspondance forte (« ok » ou *overlaps* clairement résolu) avec la région productrice ;
- En gris, l'ensemble des artefacts considérés pour la période (incluant les artefacts aux provenances inconnues, et ceux provenant d'autres régions)³⁵⁹.

Nous avons approximativement marqué le centre des régions productrices par une étoile et nous avons relié par une flèche les régions de production (les étoiles) aux points de découverte des artefacts contenant du métal issu de cette région.

Le choix sémiologique de ces flèches est double. Tout d'abord, elles facilitent le repérage des artefacts supposément originaires d'une région. Ensuite, le type de trait utilisé permet d'avoir un regard sur la quantité d'artefacts reliés par les flèches. Des flèches en pointillé sont utilisées pour les axes moins marqués (où peu d'artefacts issus de la région étudiée ont été identifiés dans la zone pointée). En revanche, lorsque de nombreux artefacts présentent hypothétiquement une provenance de la zone de production pointée, la flèche est pleine (et son épaisseur est proportionnelle à la quantité d'artefacts supposément issus de cette région).

³⁵⁷ Les régions sont celles définies en partie 1 : les zones minières ont été regroupées en grandes régions présentant des exploitations contemporaines.

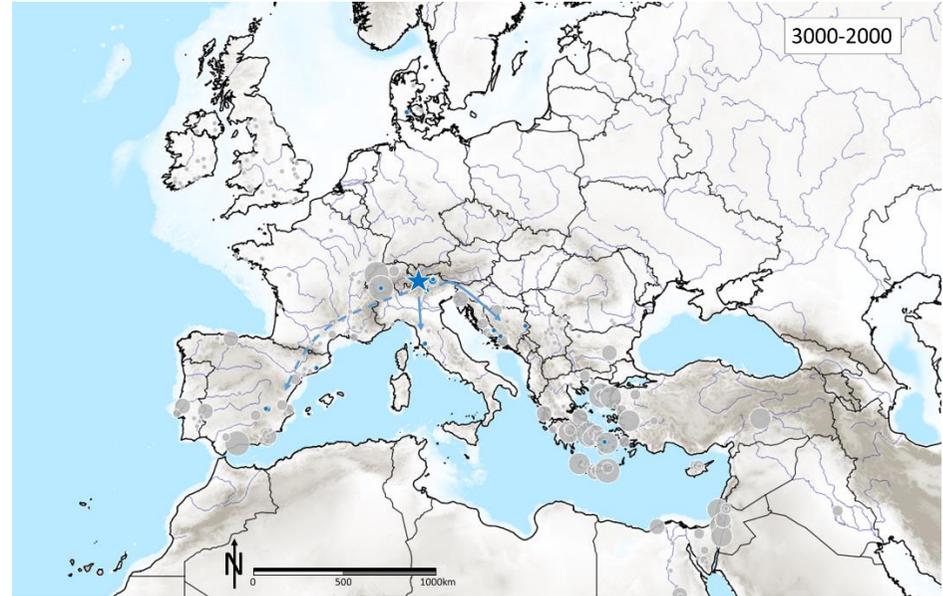
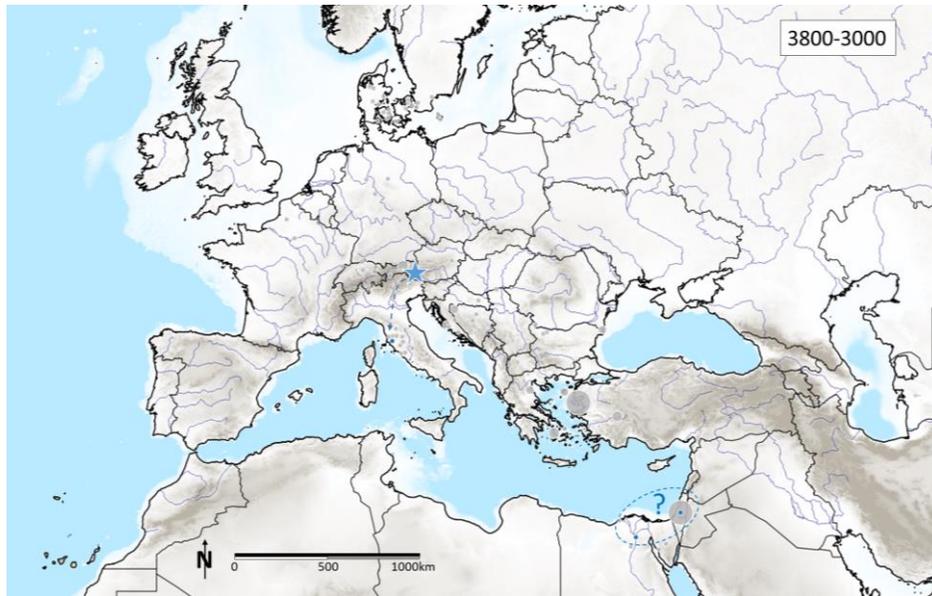
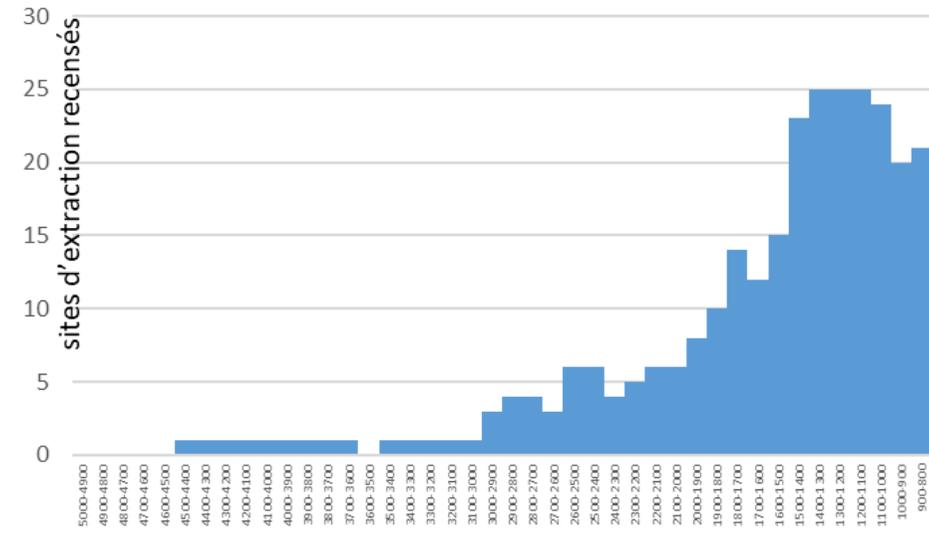
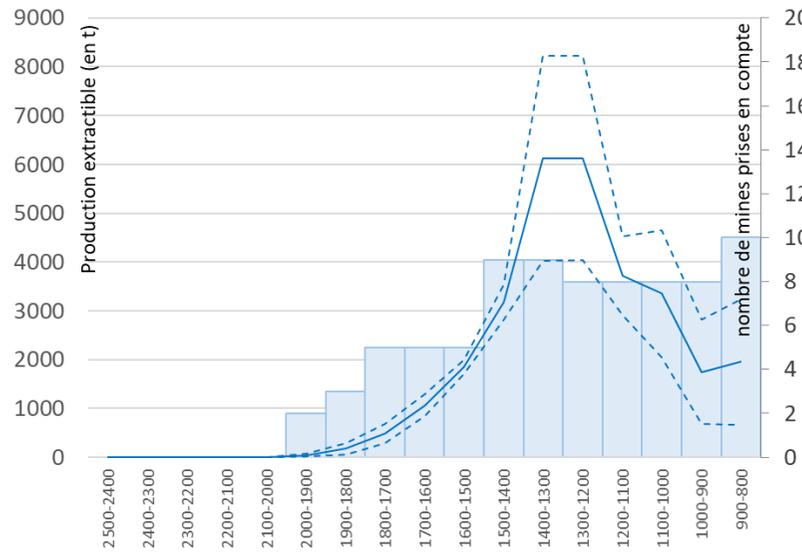
³⁵⁸ Aucune ou un trop faible nombre (moins de 3) de provenances régionales ont été identifiées.

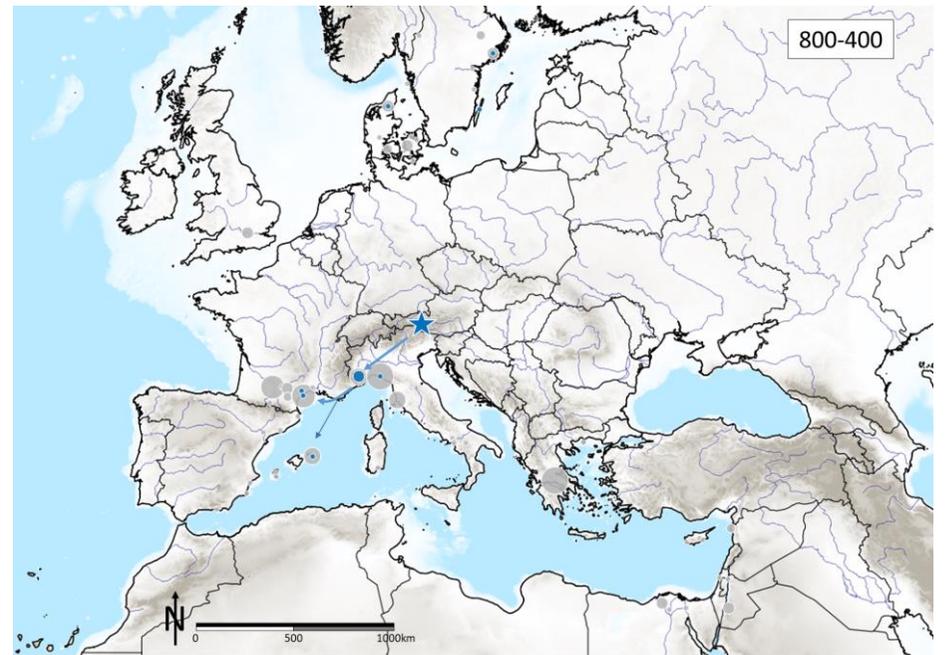
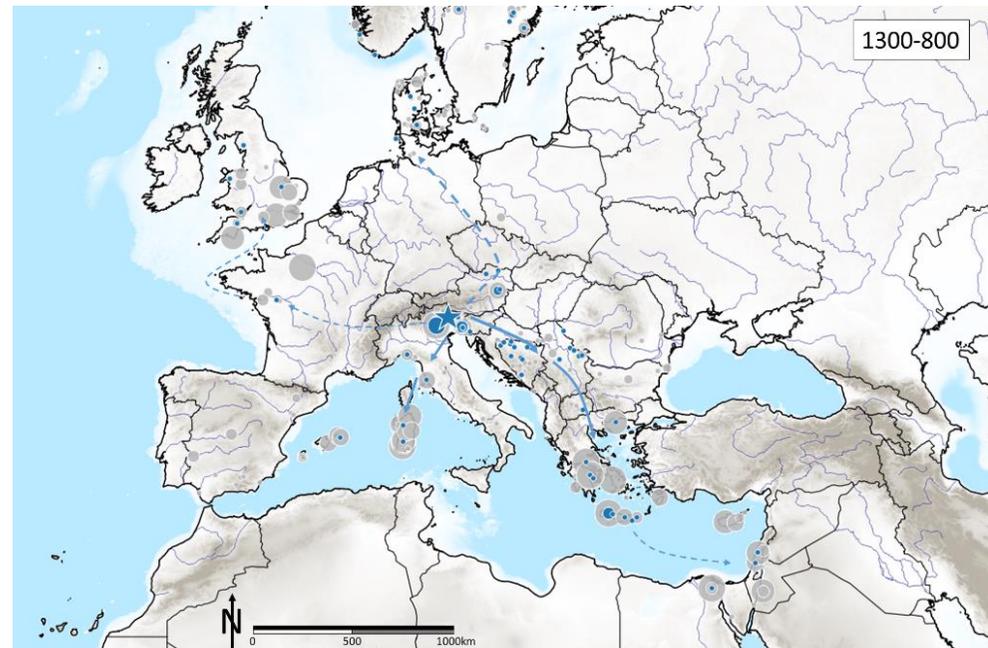
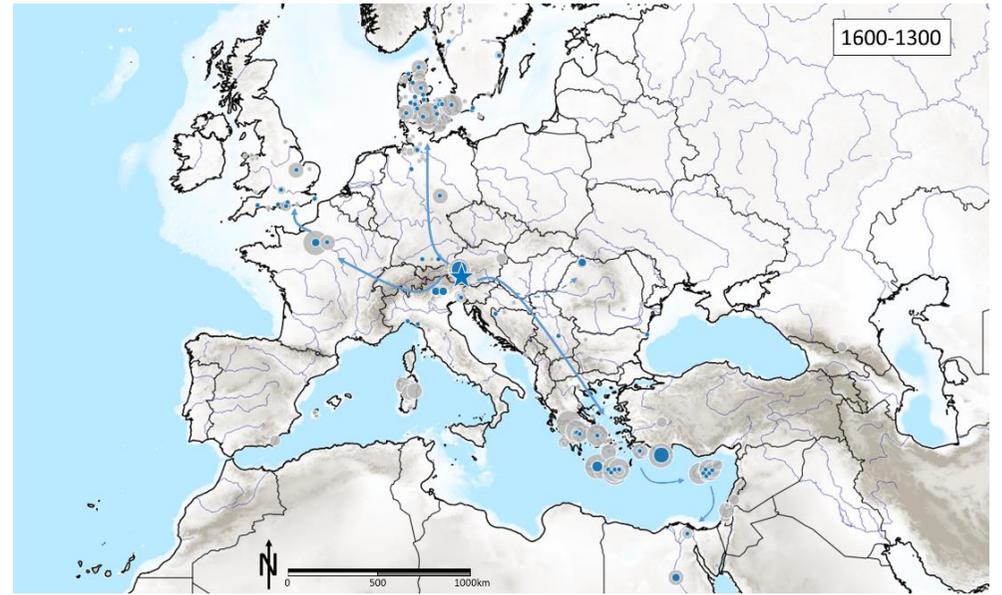
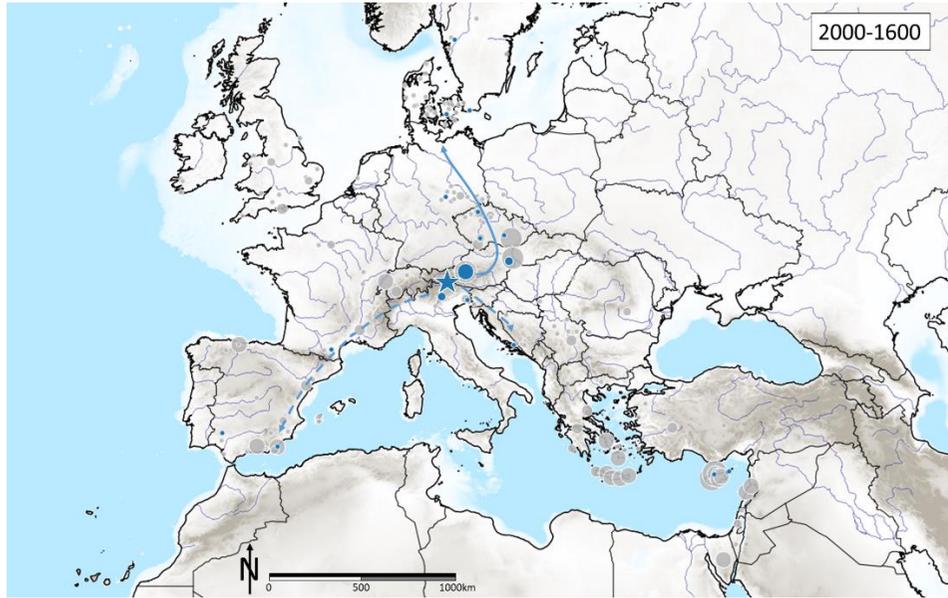
³⁵⁹ Le but de faire figurer cette information est de permettre de définir rapidement où se situent les artefacts pour lesquels nous disposons d'analyses isotopiques du plomb (cela est important car l'Europe est très inégalement couverte selon les périodes considérées).

Les flèches ont été tracées sans chercher à contourner les obstacles topographiques ou à profiter d'itinéraires fluviaux. Elles n'ont pas vocation à retracer des itinéraires précis associés à des routes commerciales. Leur seul but est d'indiquer de grandes directions d'exportation que nous nommerons « axes (de circulation) » par simplification de langage.

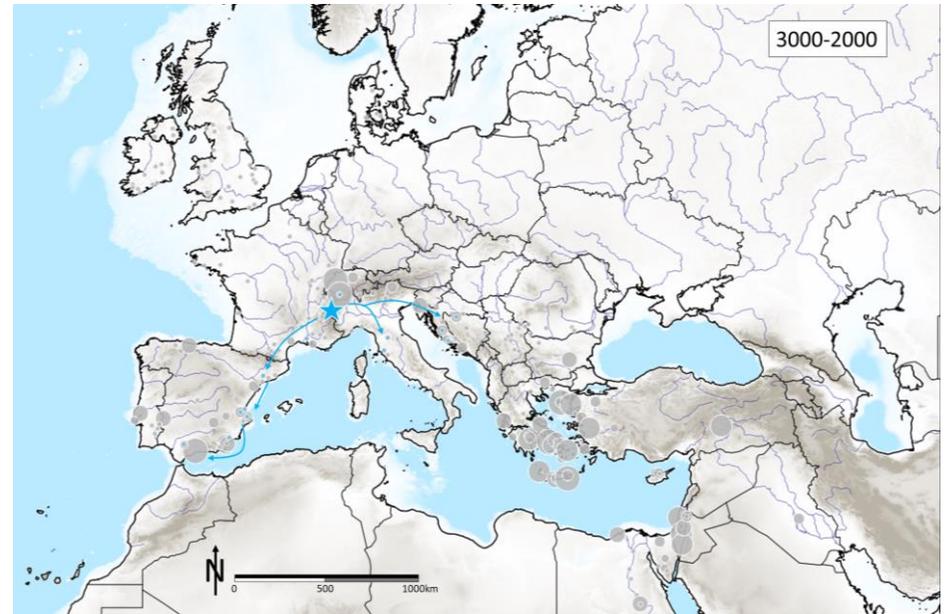
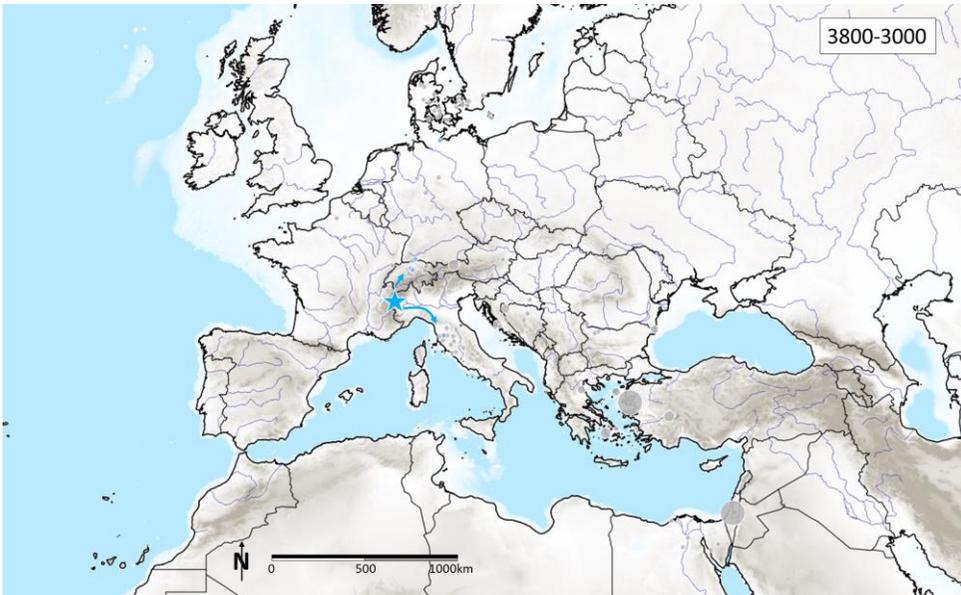
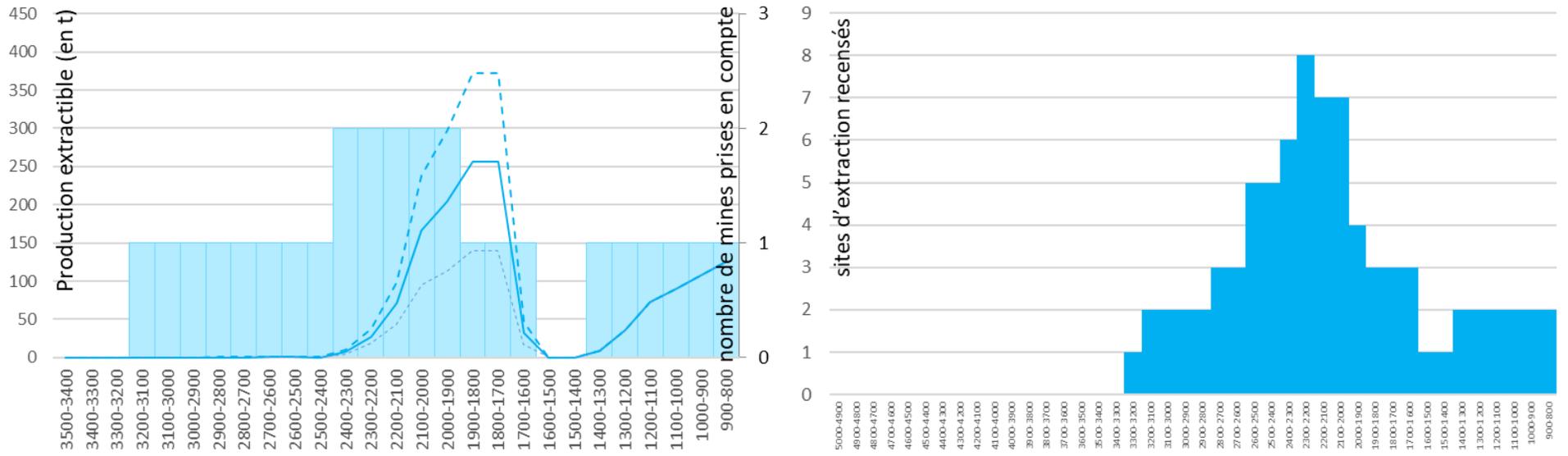
Ces cartes sont accompagnées du décompte, présenté sous forme d'histogrammes, des sites d'extraction (mines et ateliers de métallurgie) connus pour chaque métal et chaque région étudiée. Les estimations de production ont été ajoutées lorsque ces informations étaient disponibles pour certaines mines de la région étudiée.

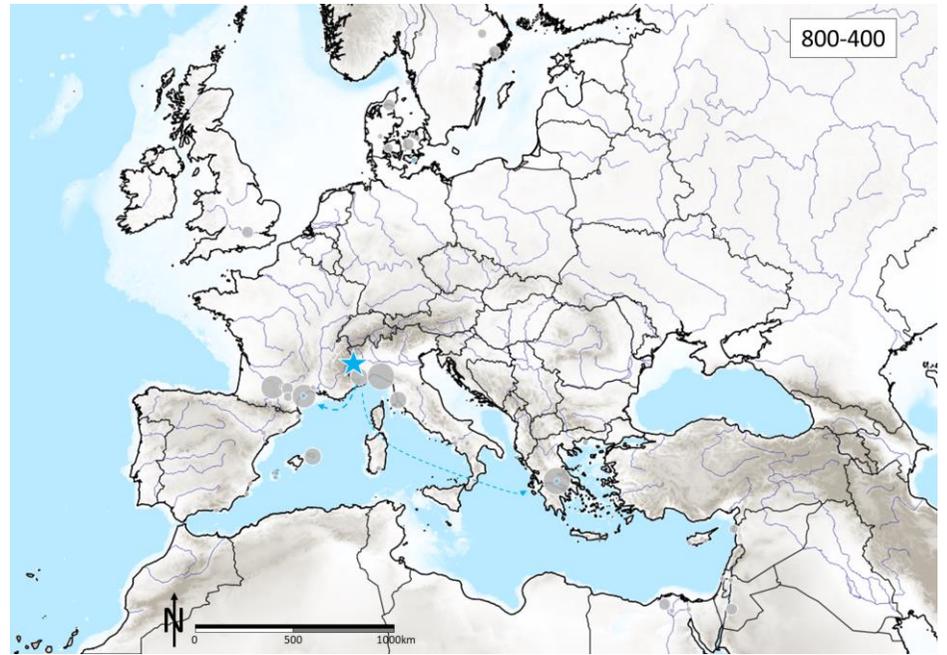
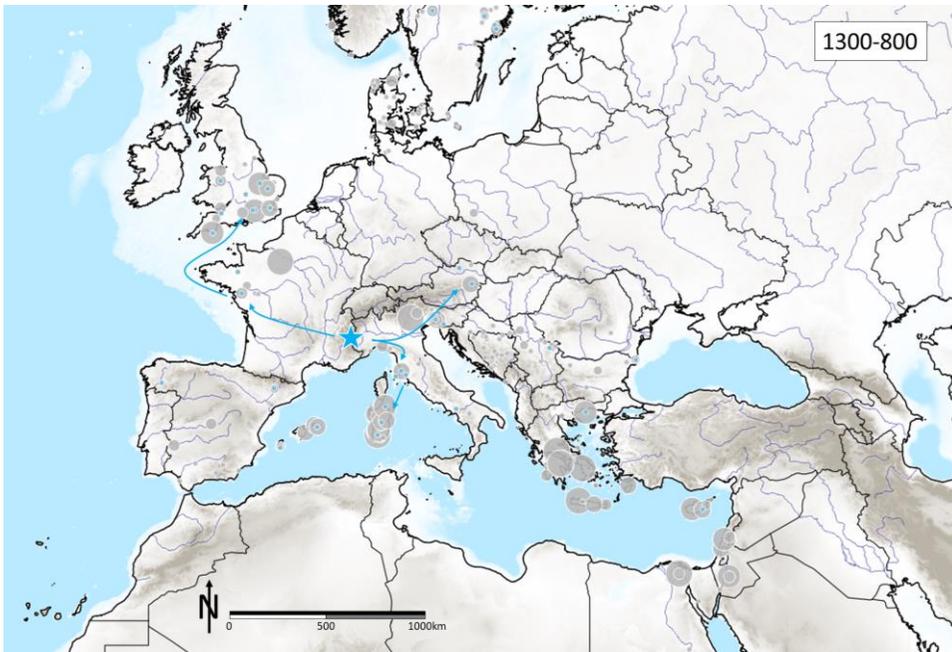
Alpes centrales et de l'est (cuivre)



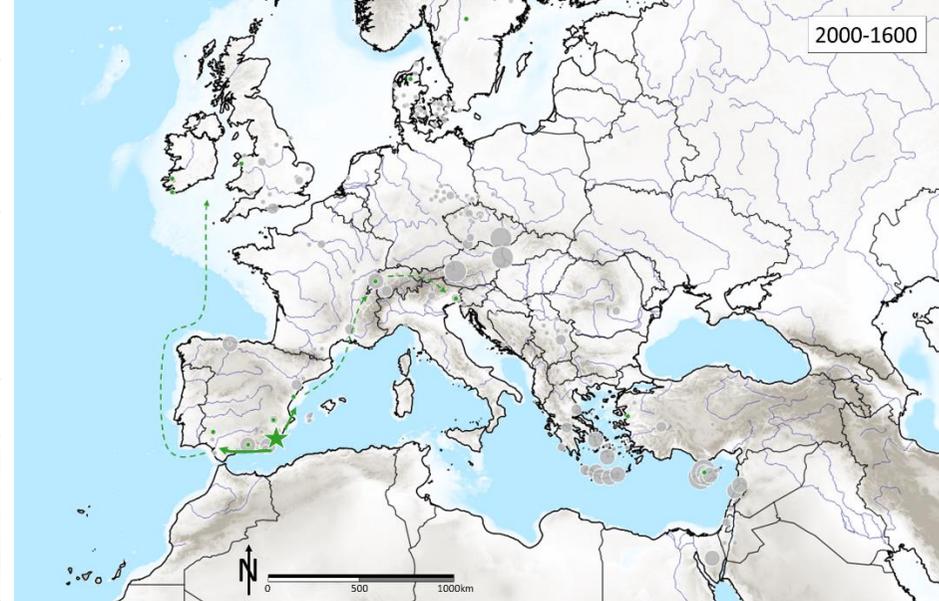
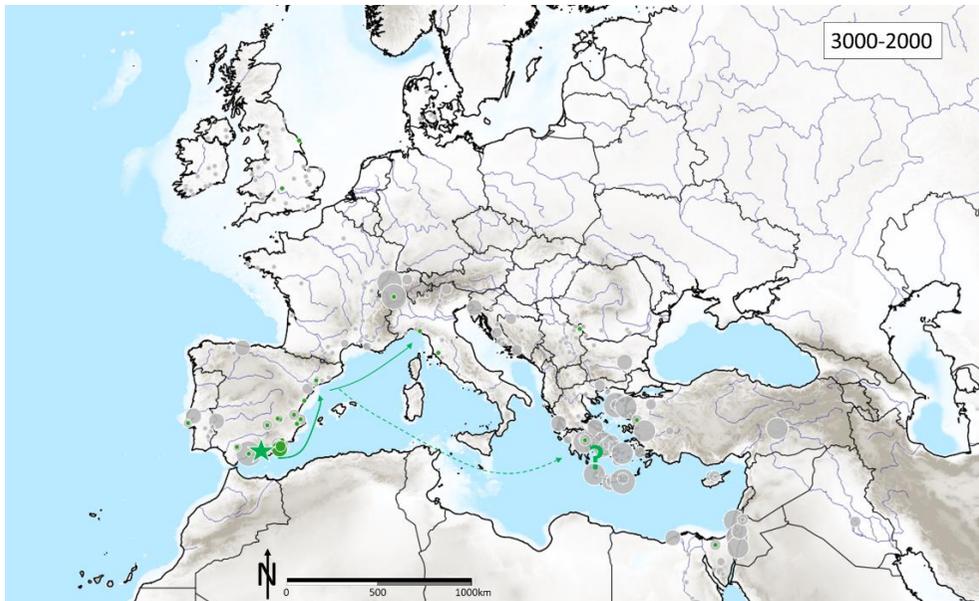
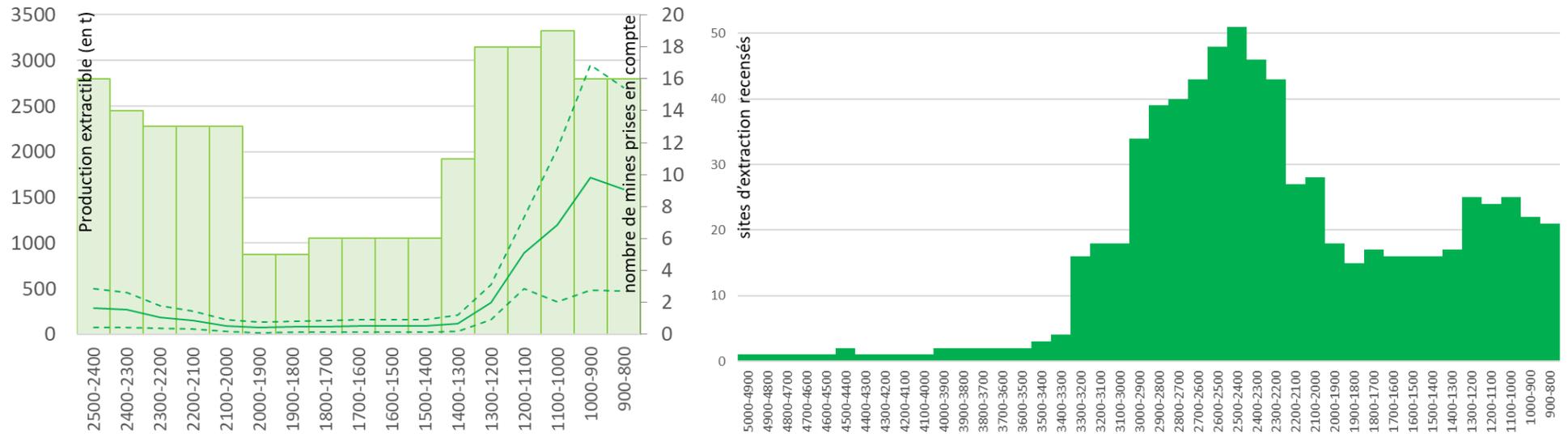


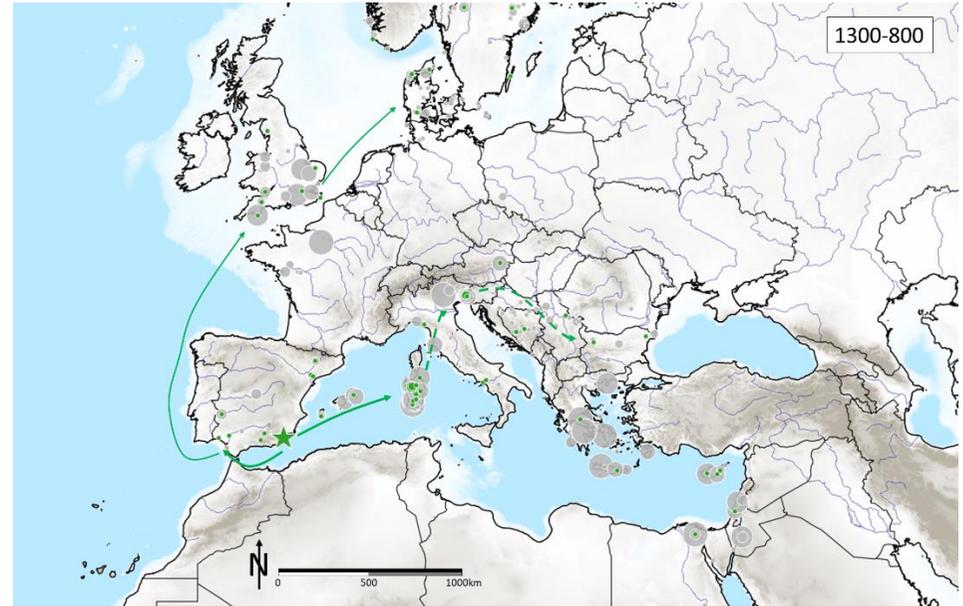
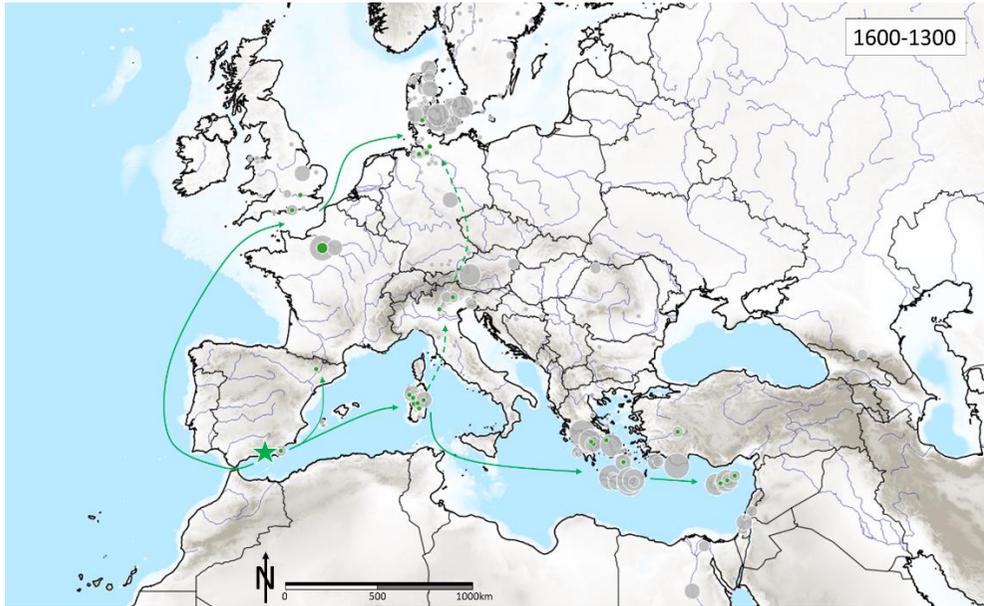
Alpes de l'ouest (cuivre)



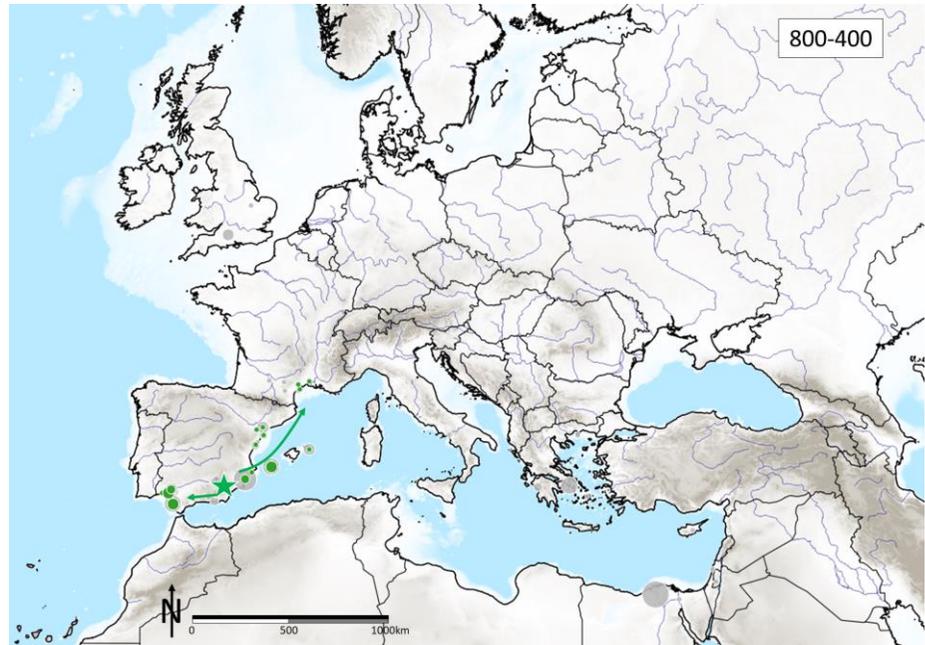
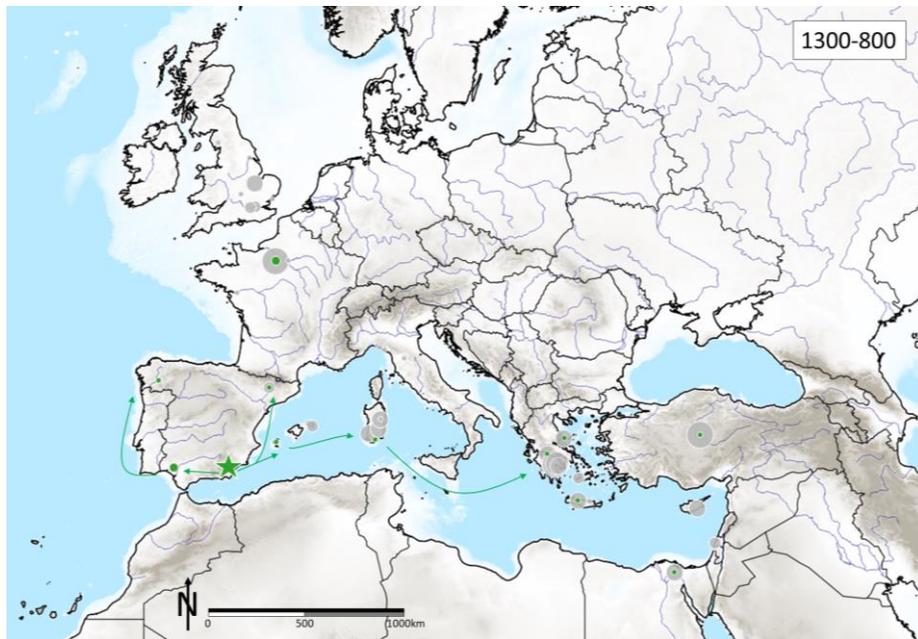
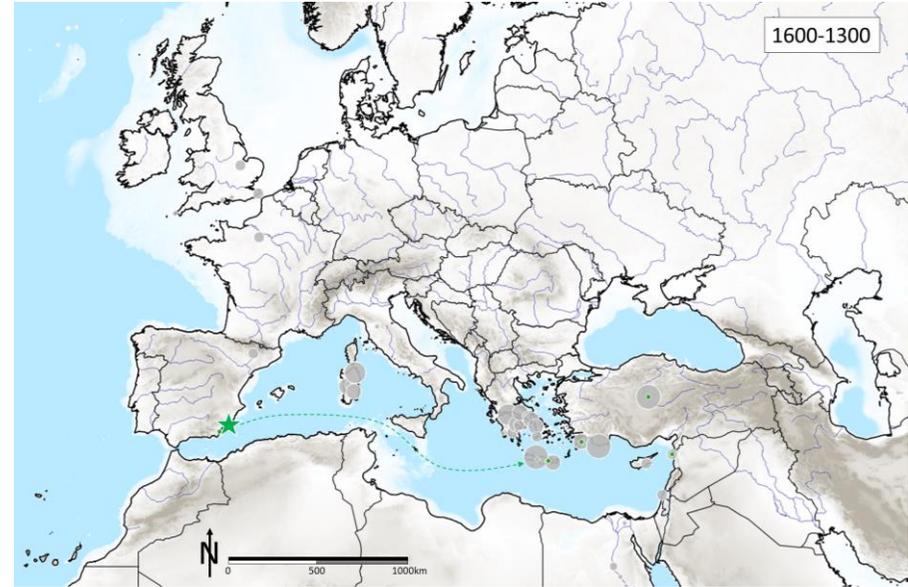
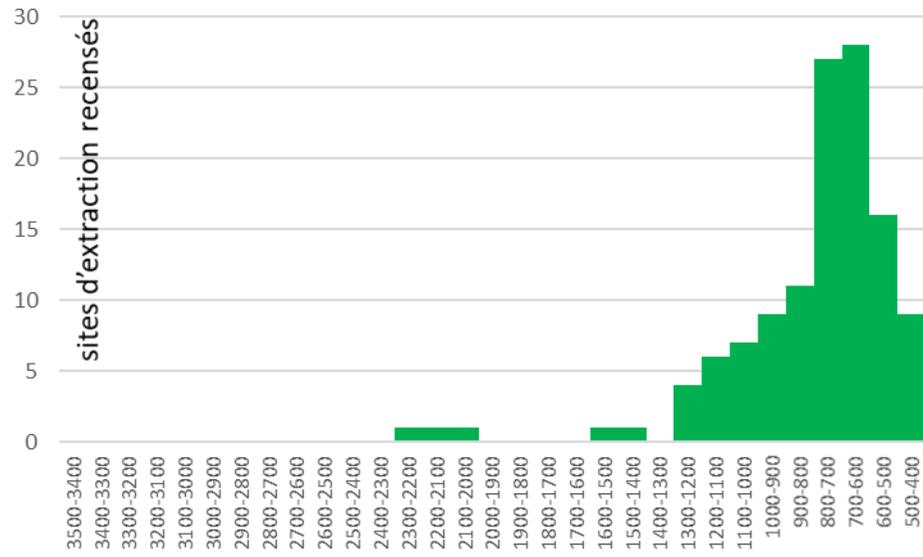


Péninsule Ibérique (cuivre)

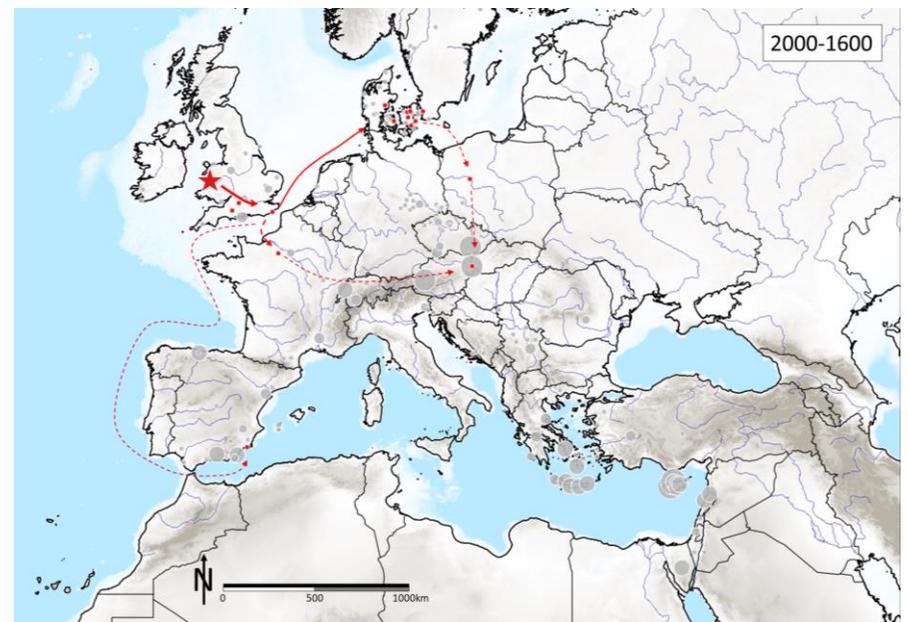
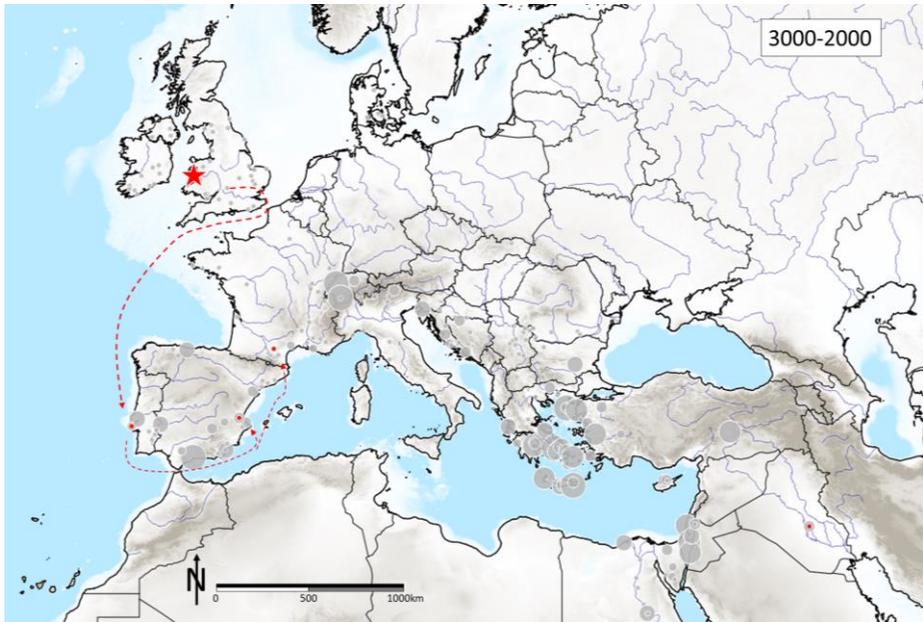
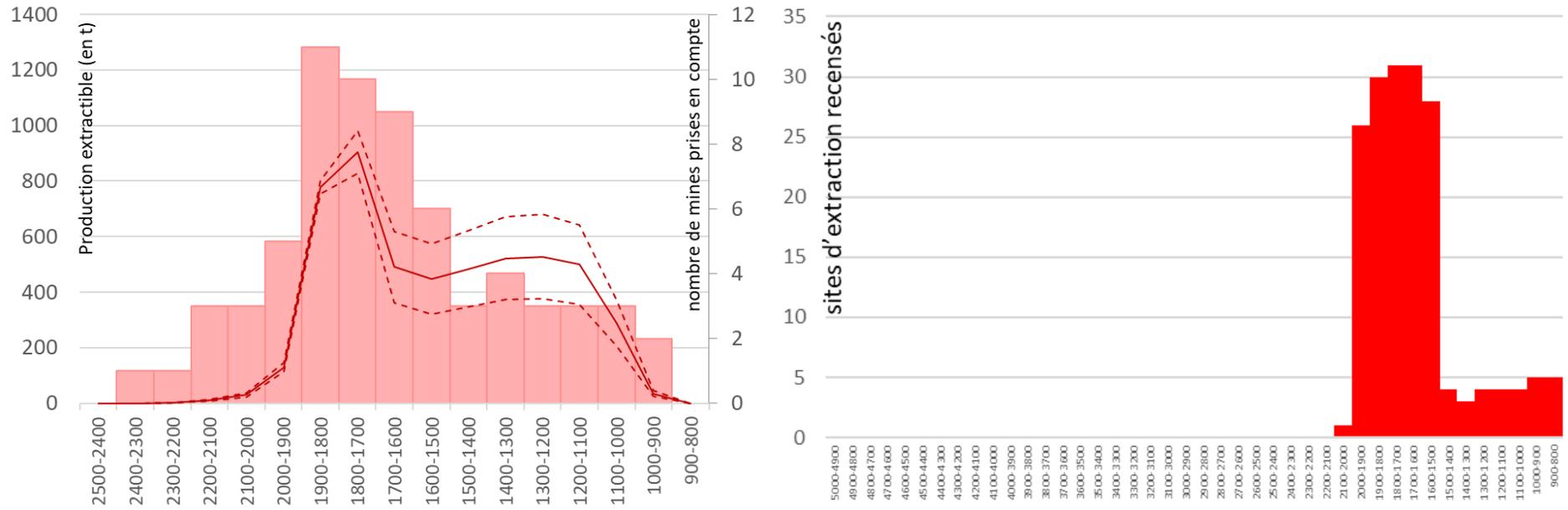


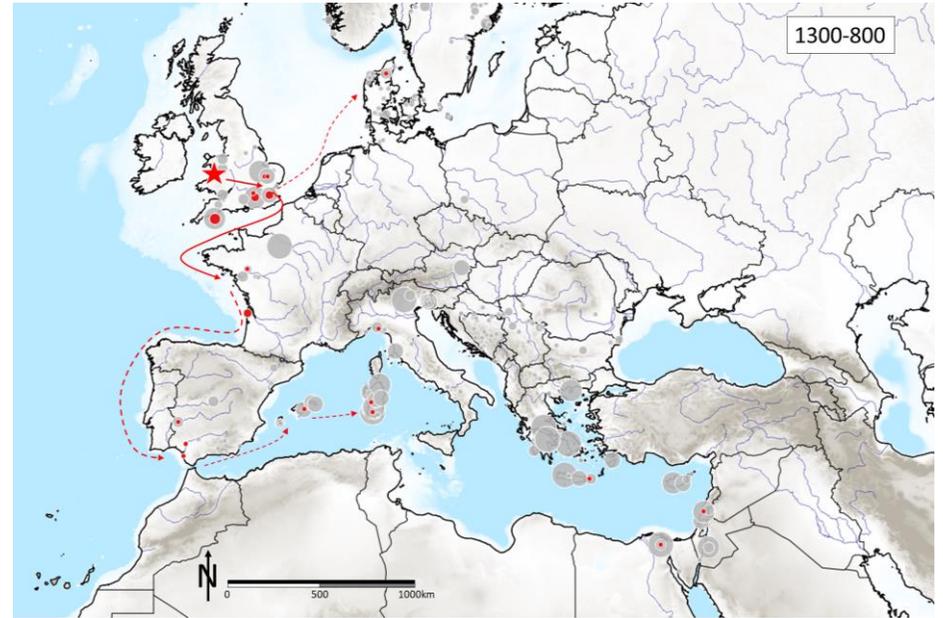
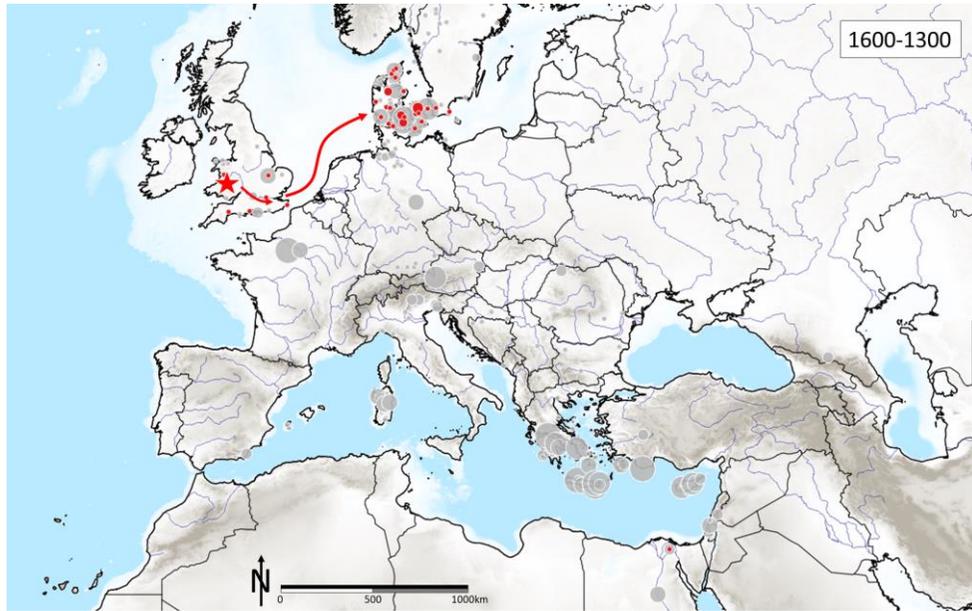


Péninsule Ibérique (plomb)

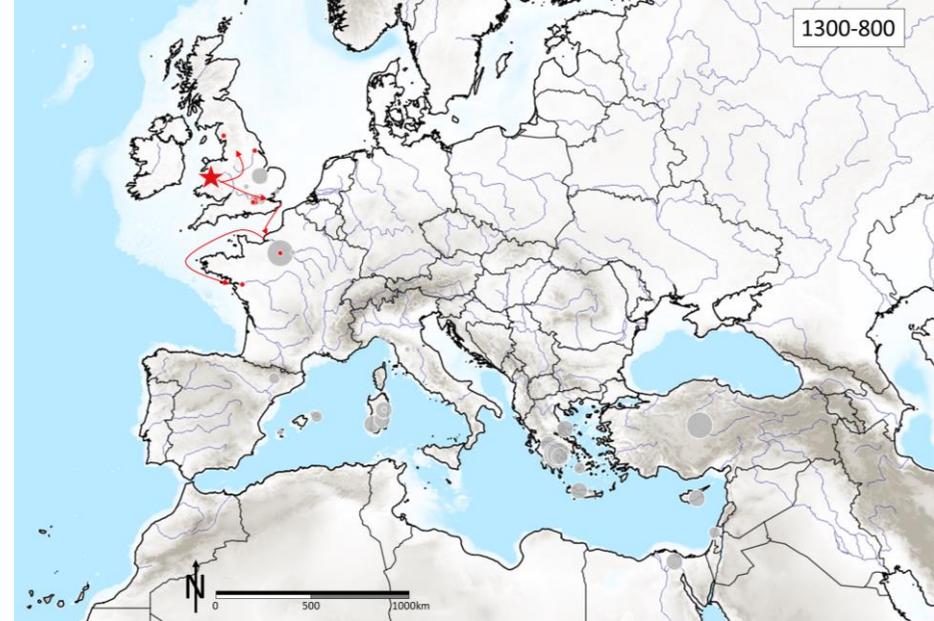
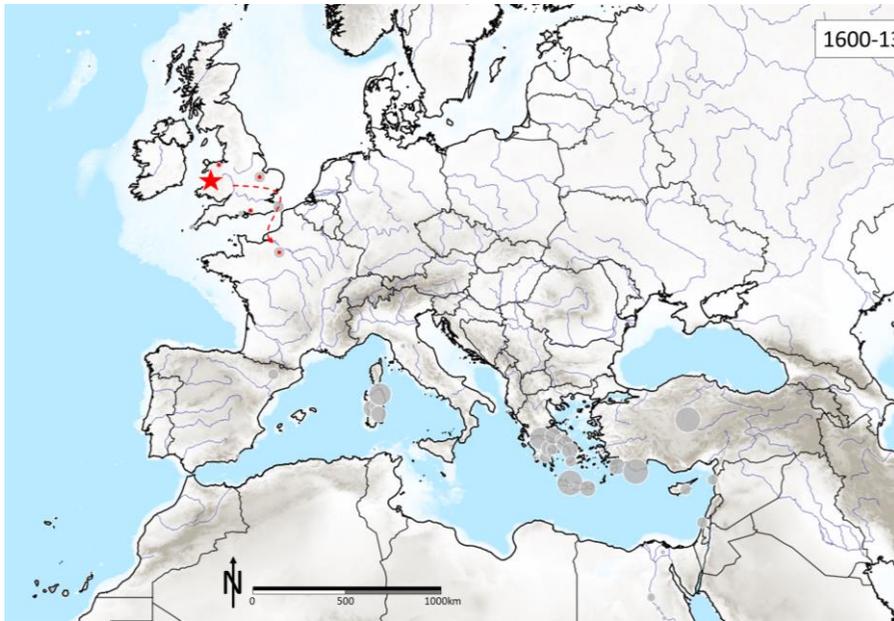
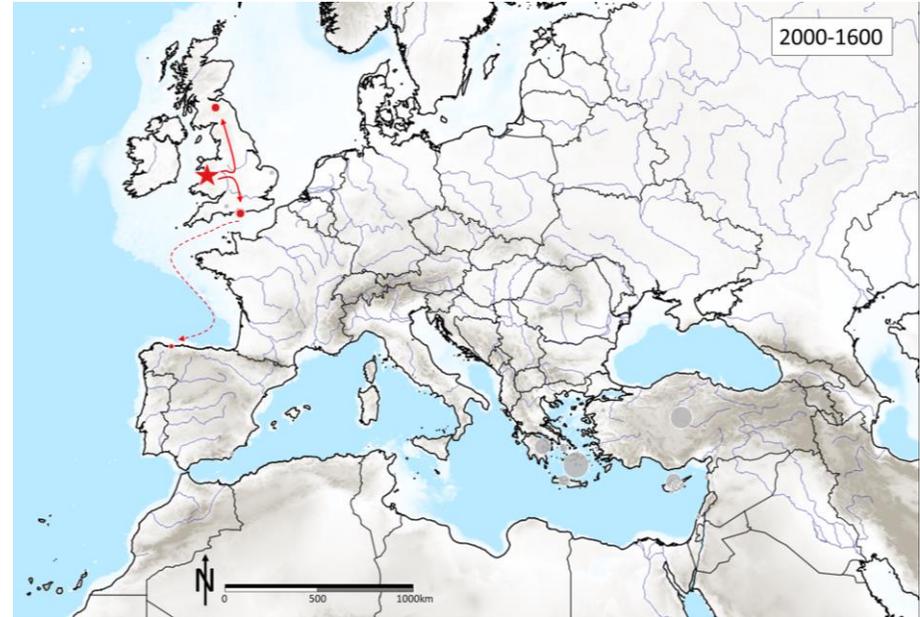
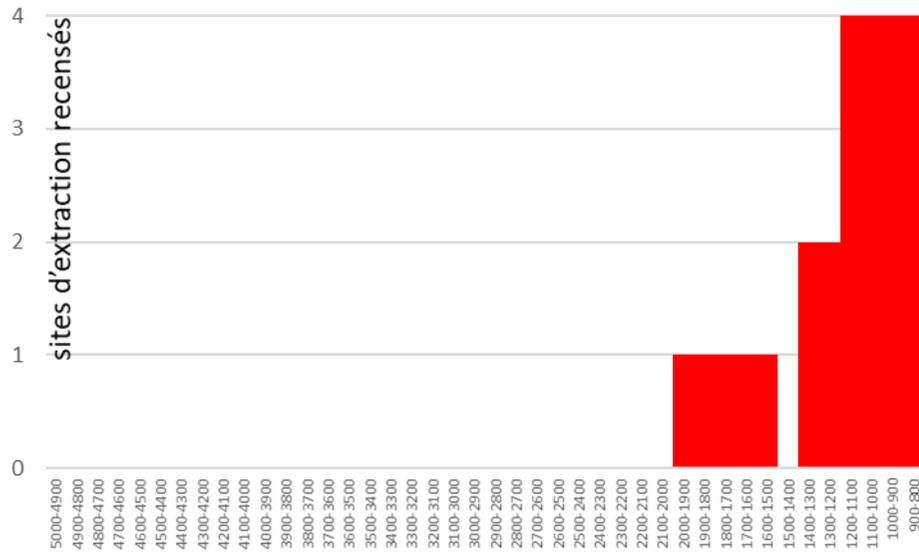


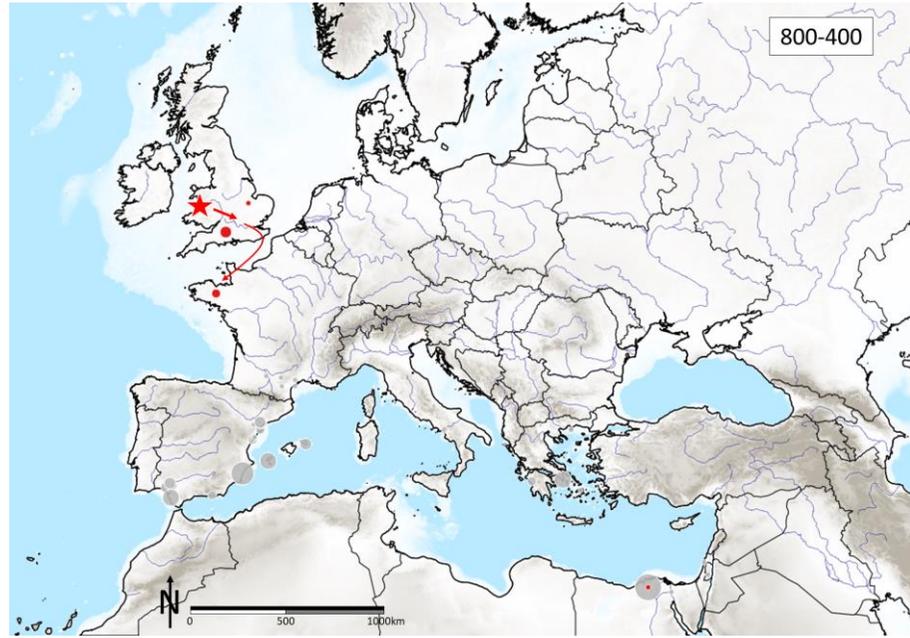
Pays de Galles (cuivre)



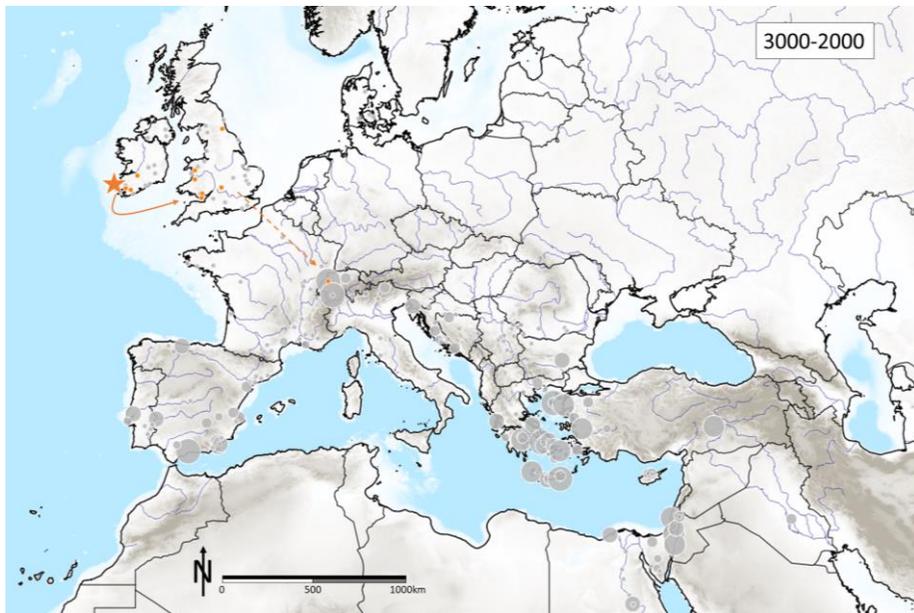
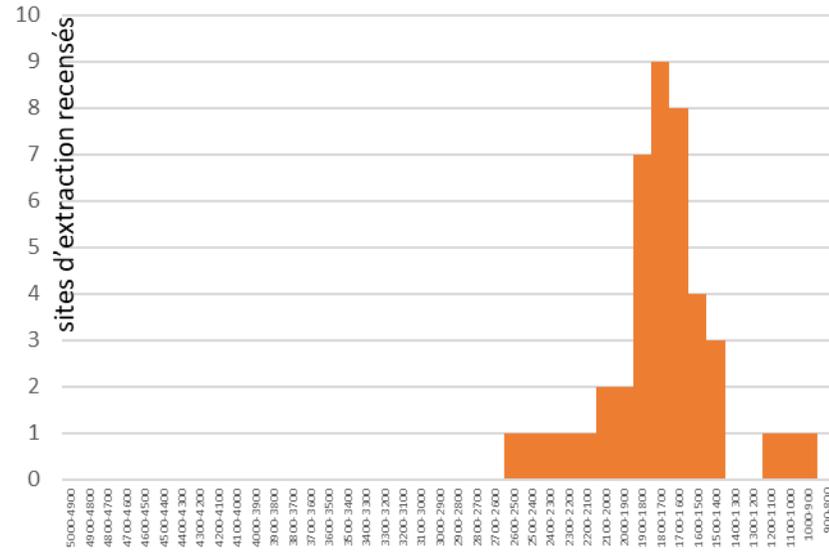
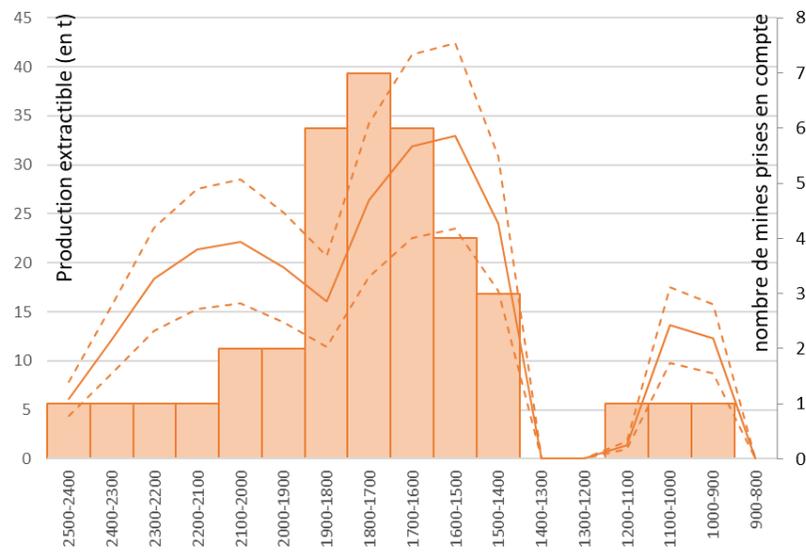


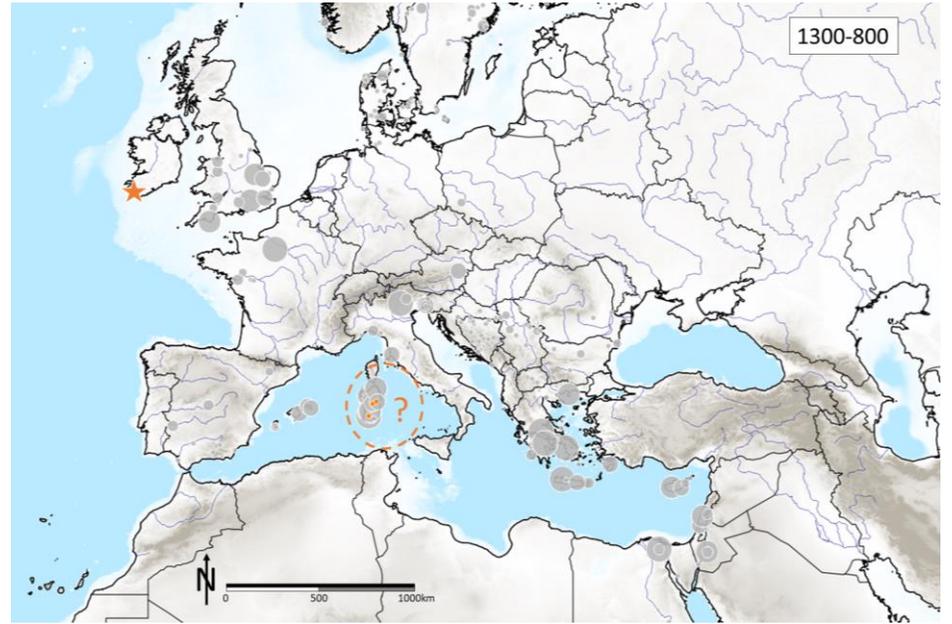
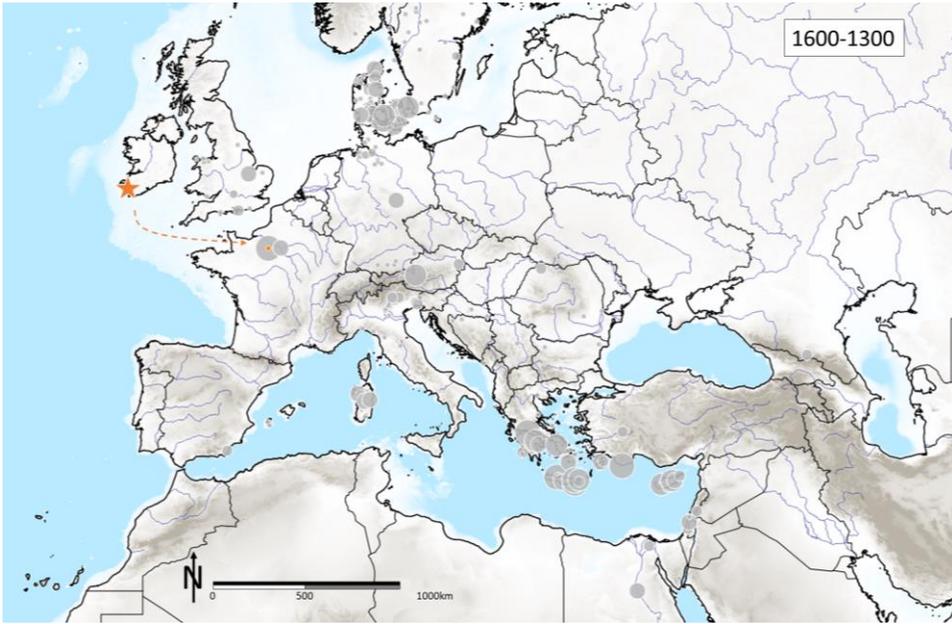
Pays de Galles (plomb)



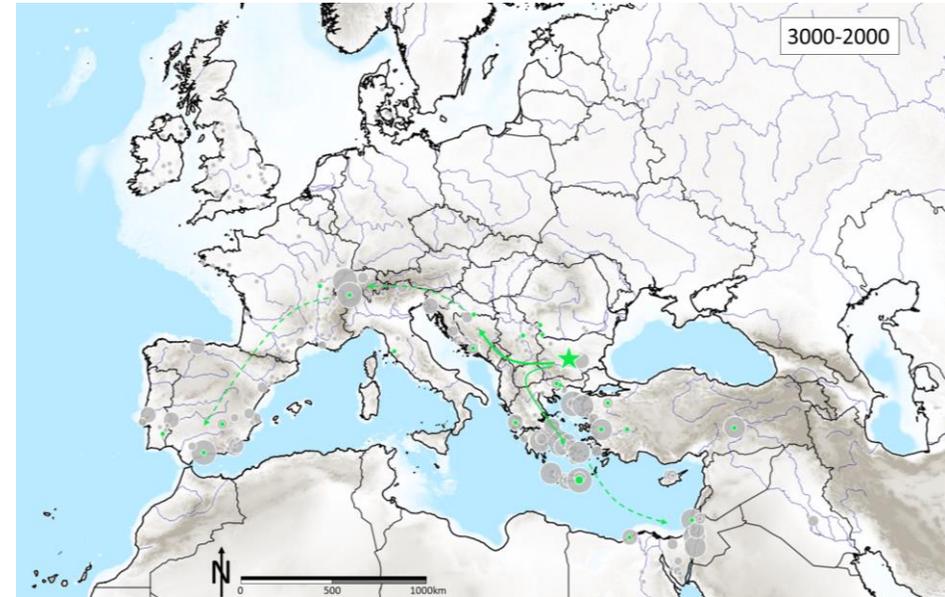
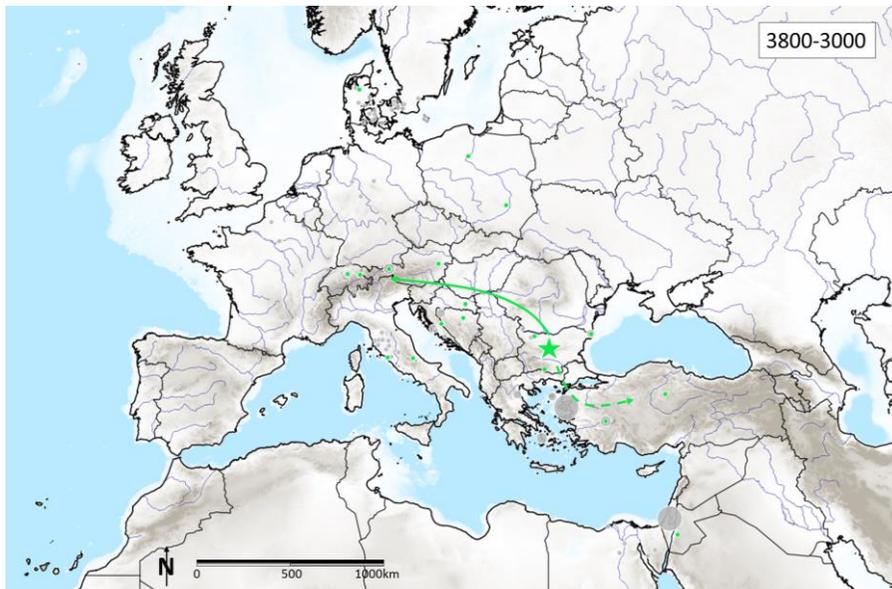
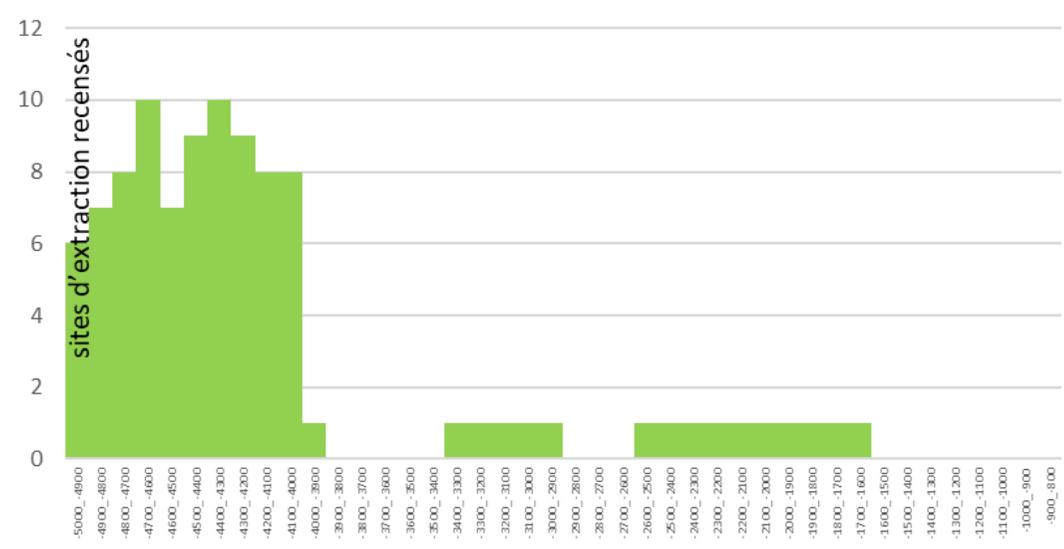
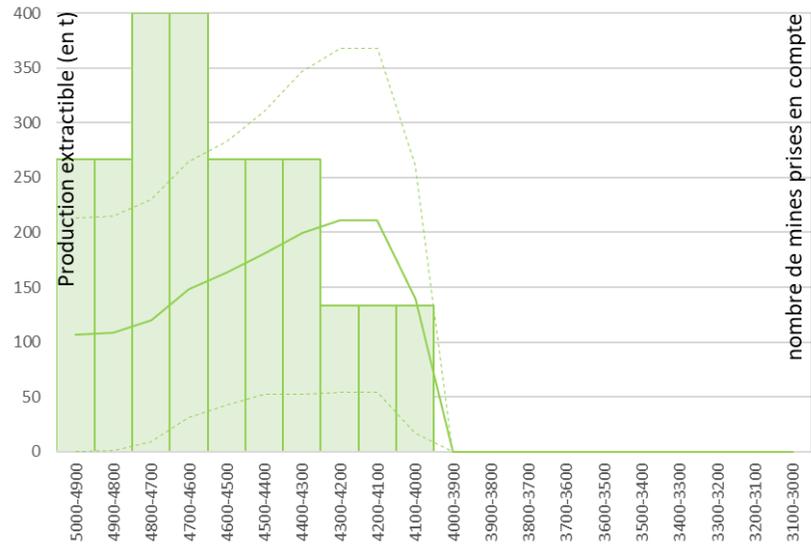


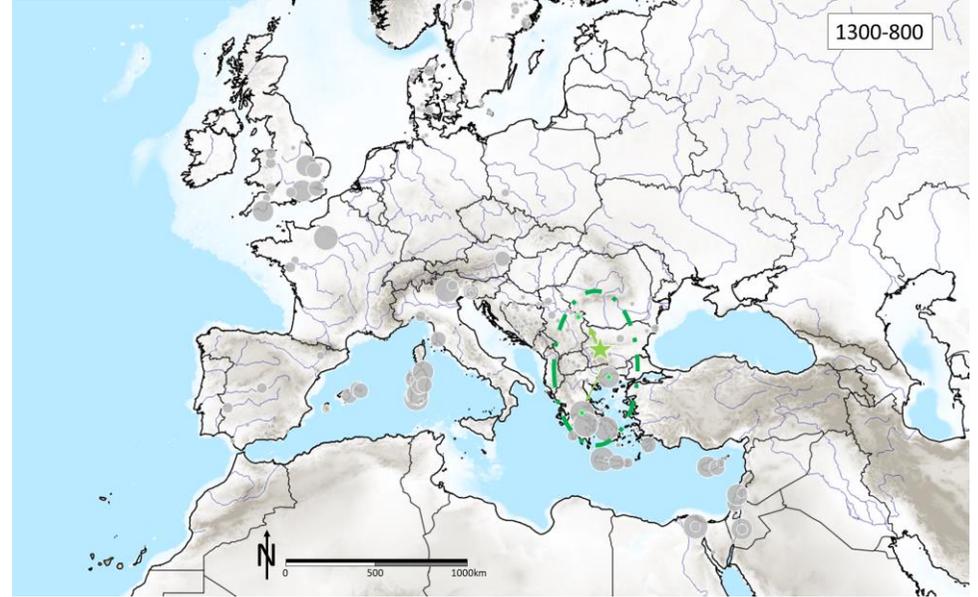
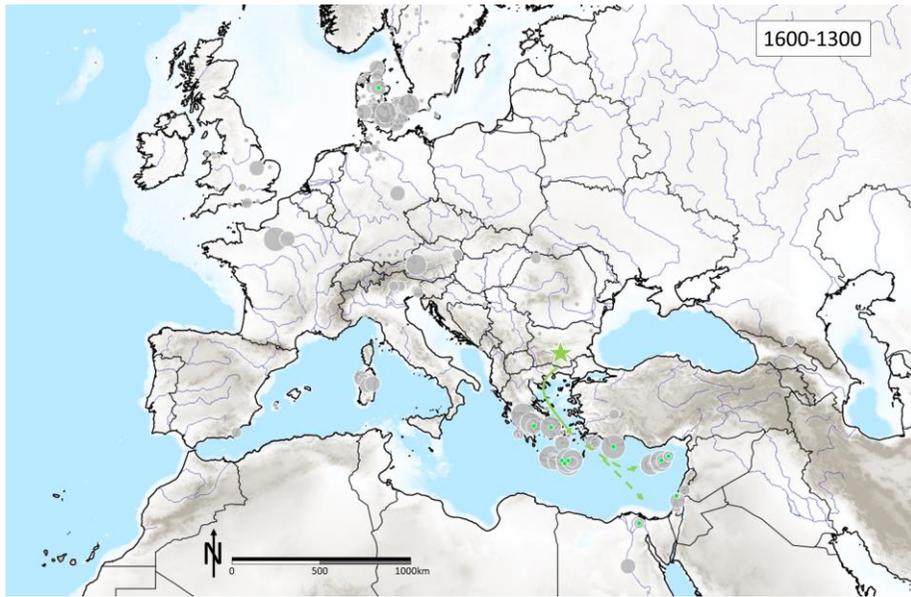
Irlande (cuivre)



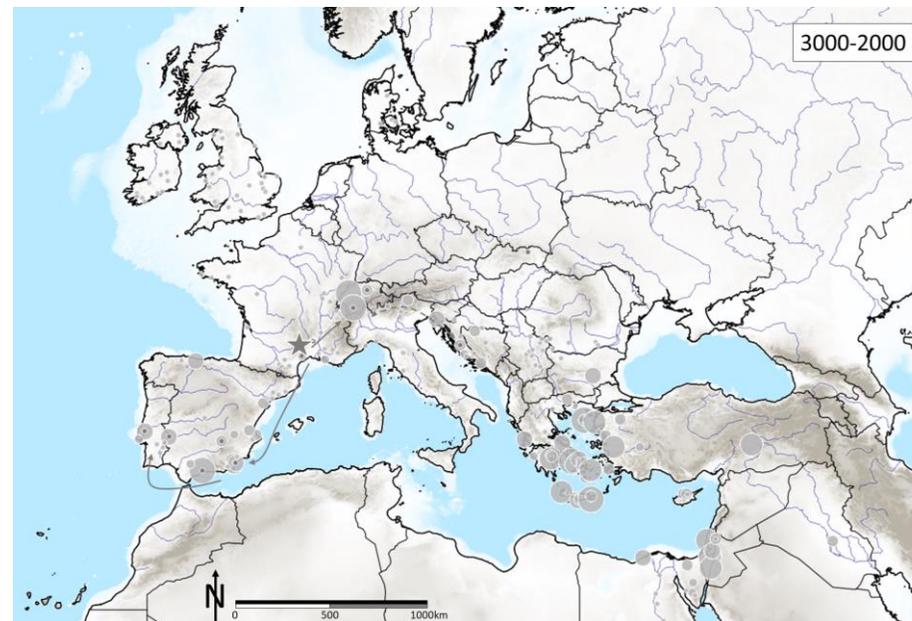
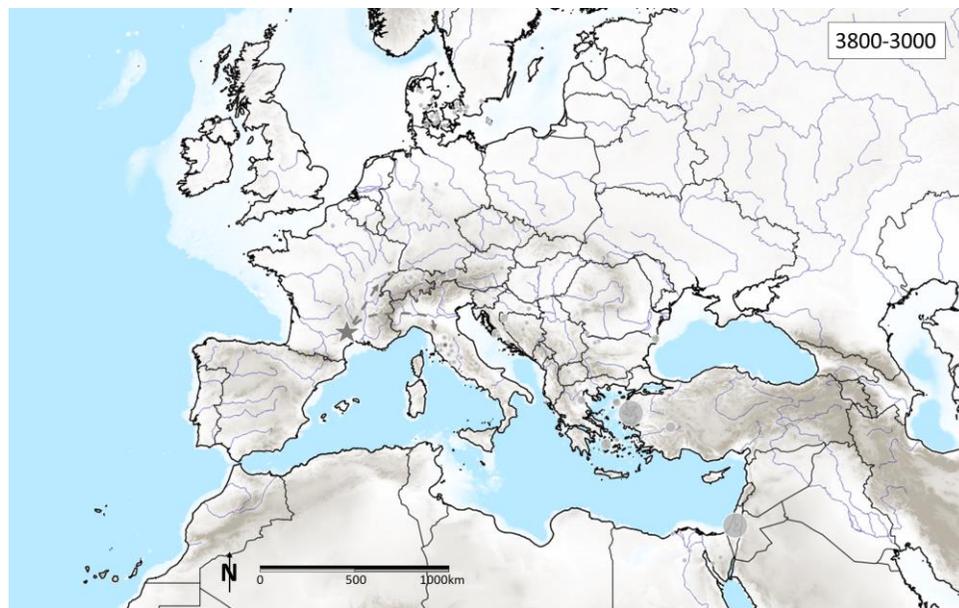
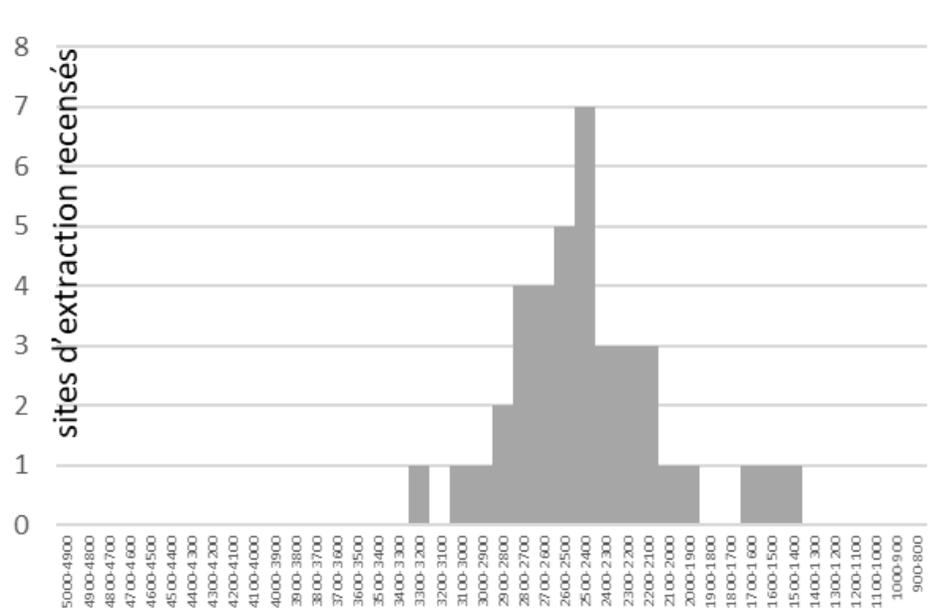
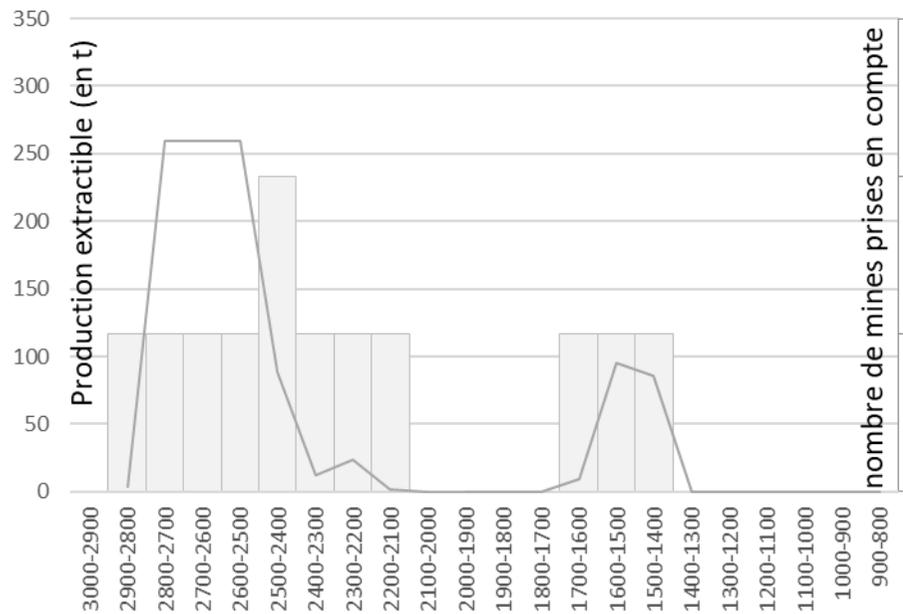


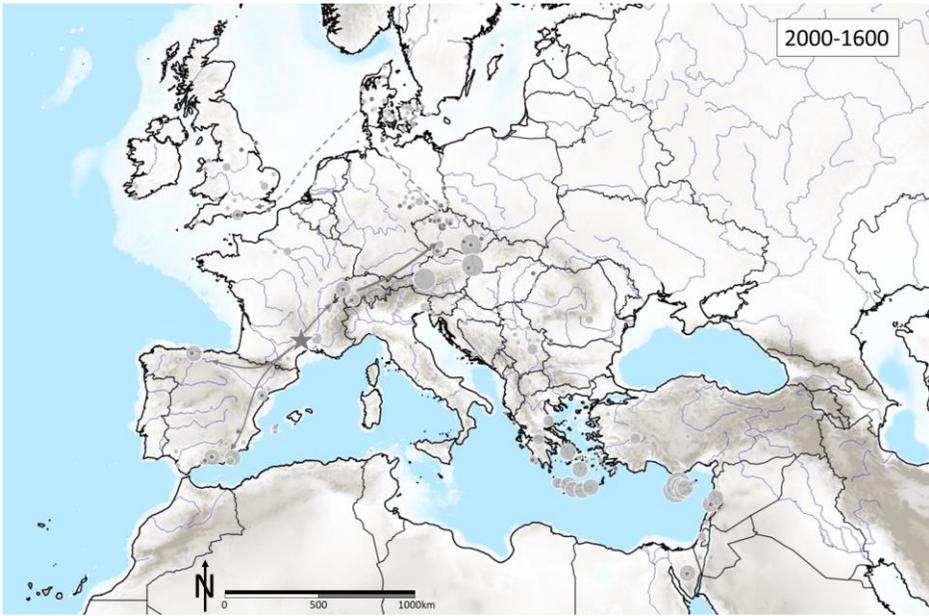
Balkans (cuivre)



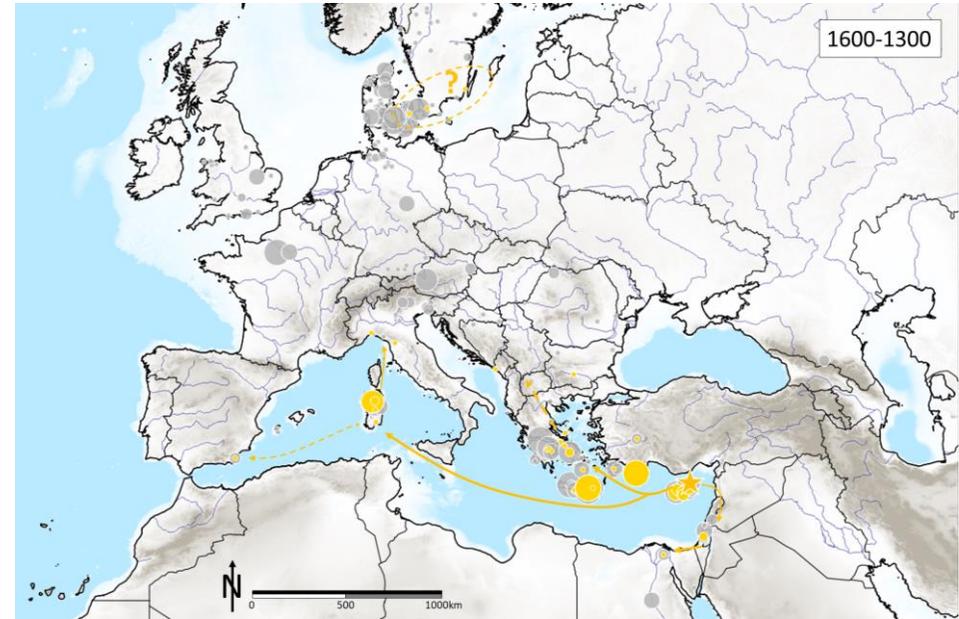
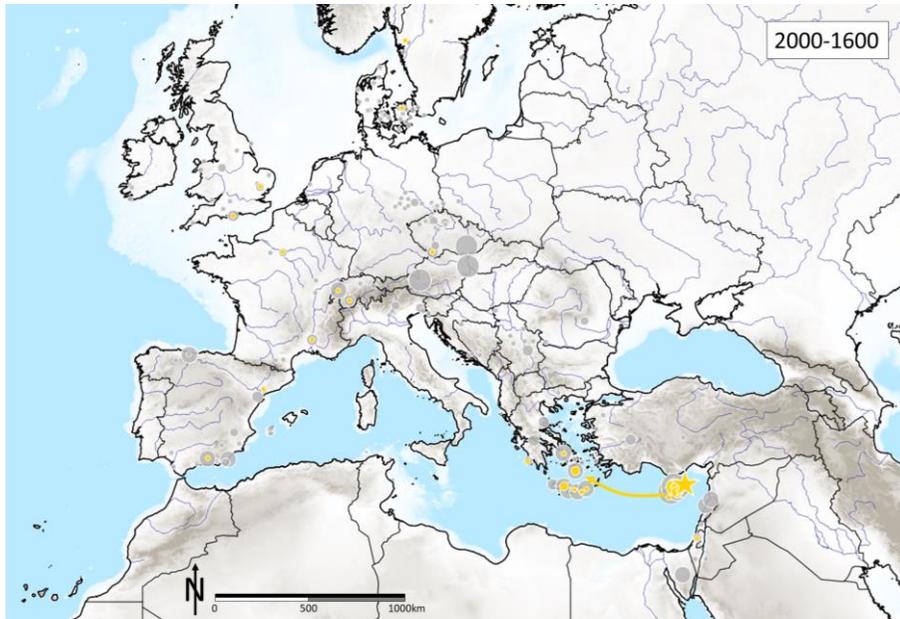
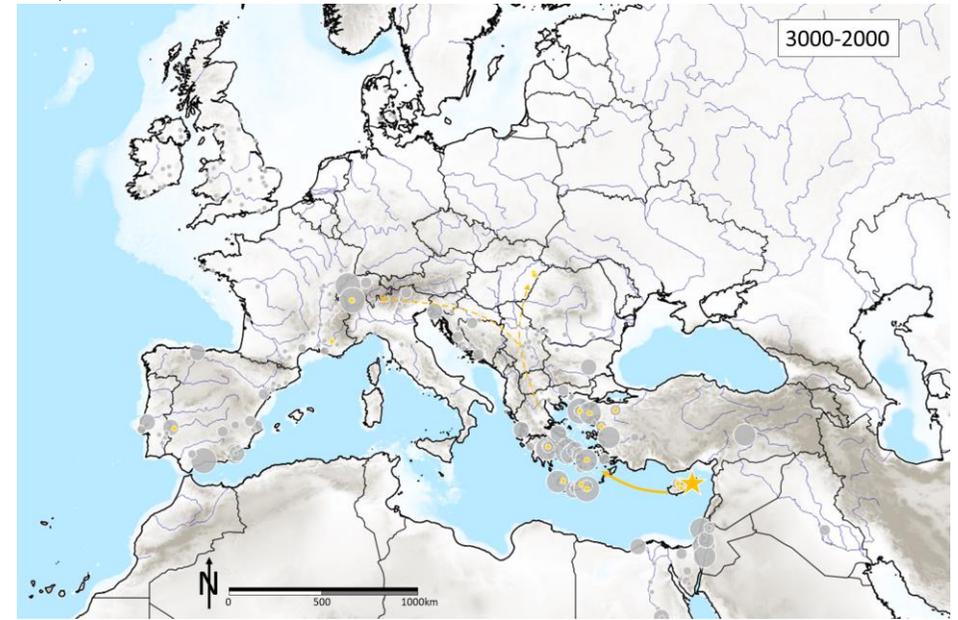
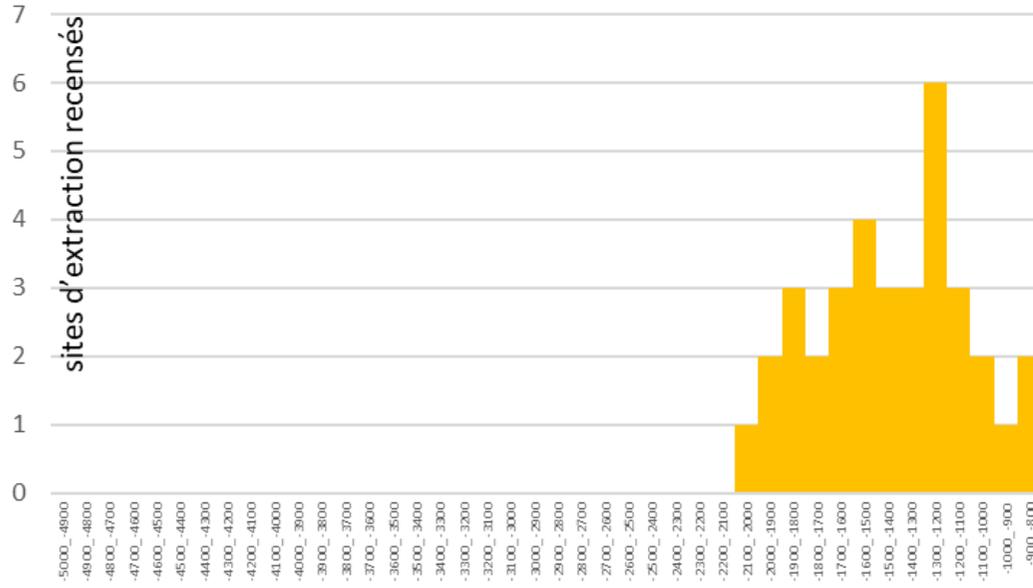


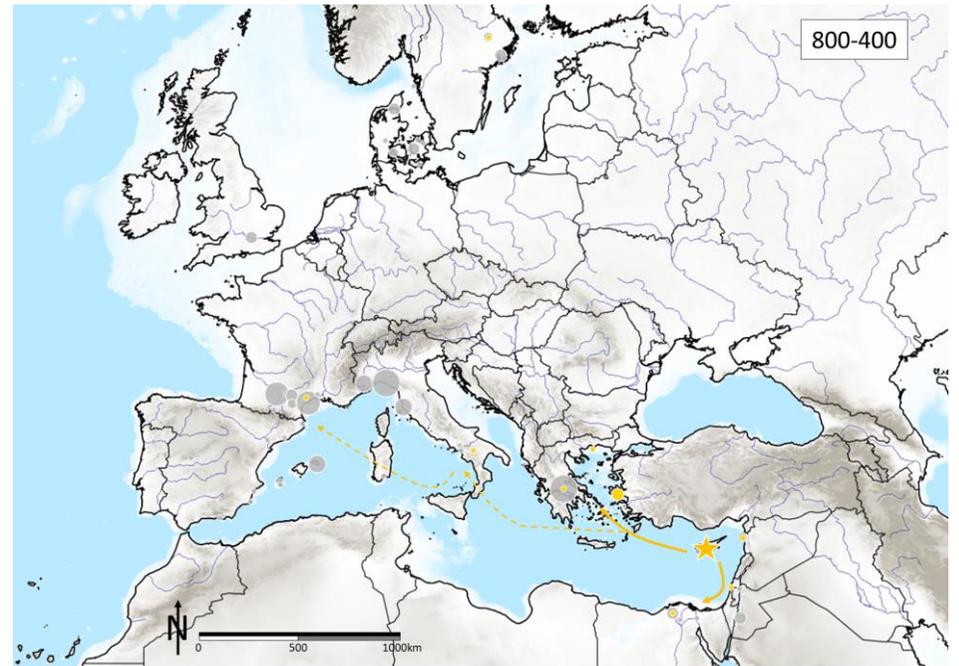
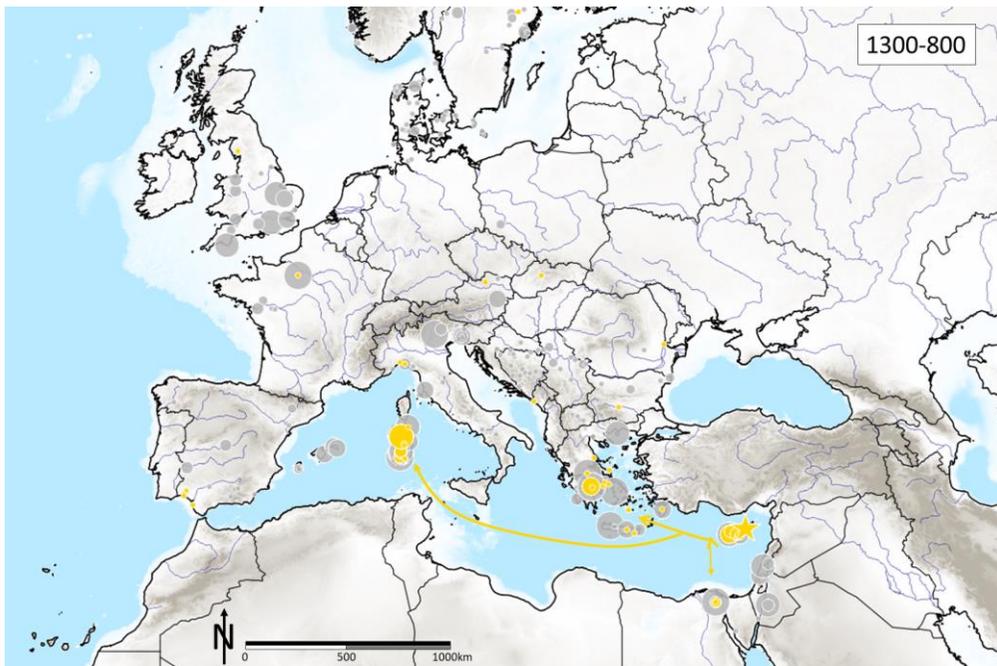
(sud) Massif central (cuivre)



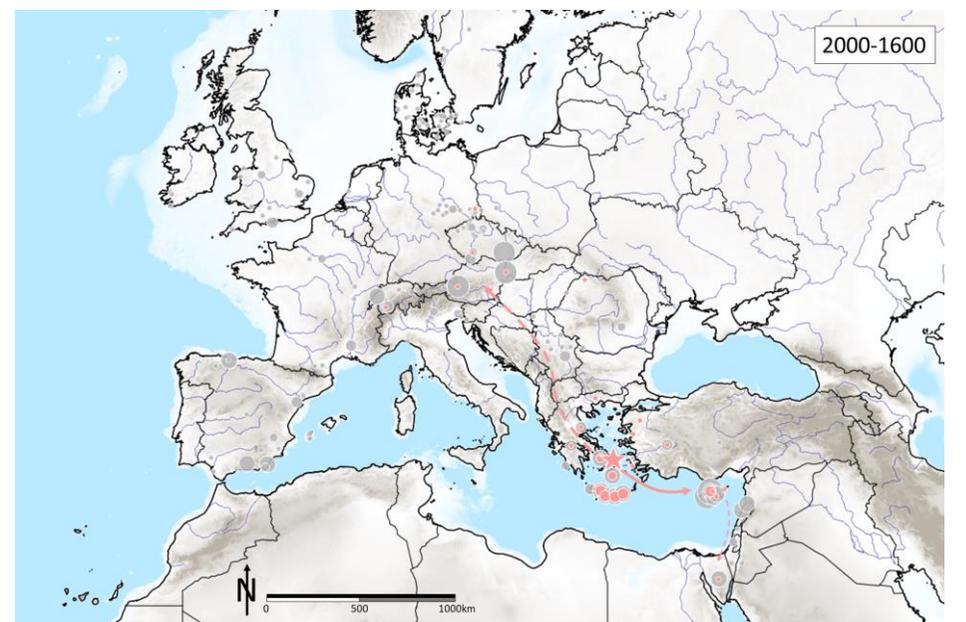
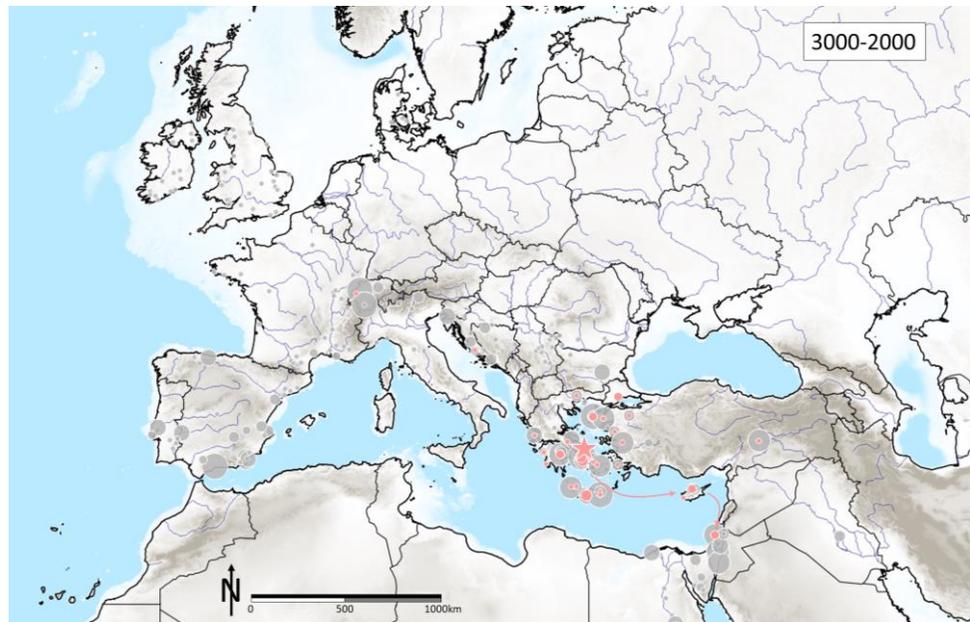
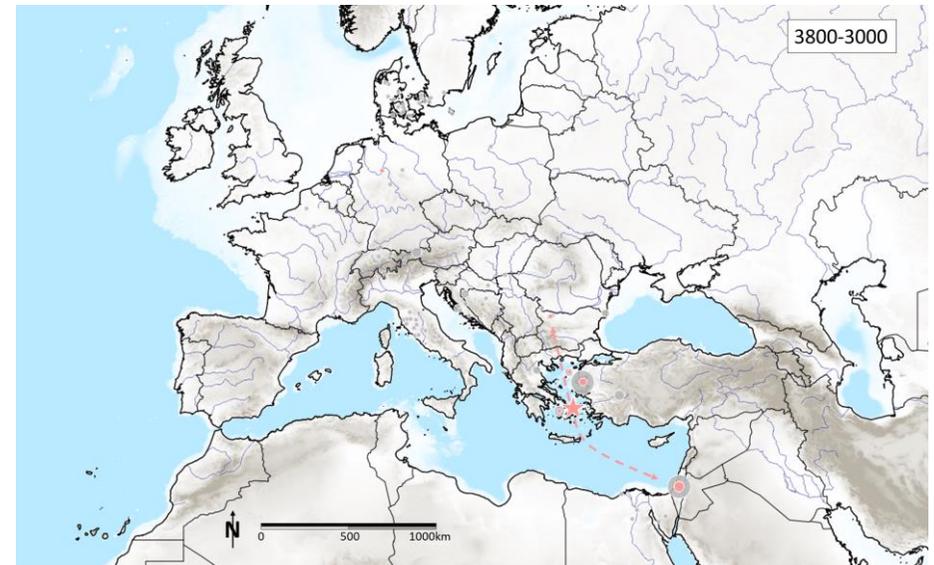
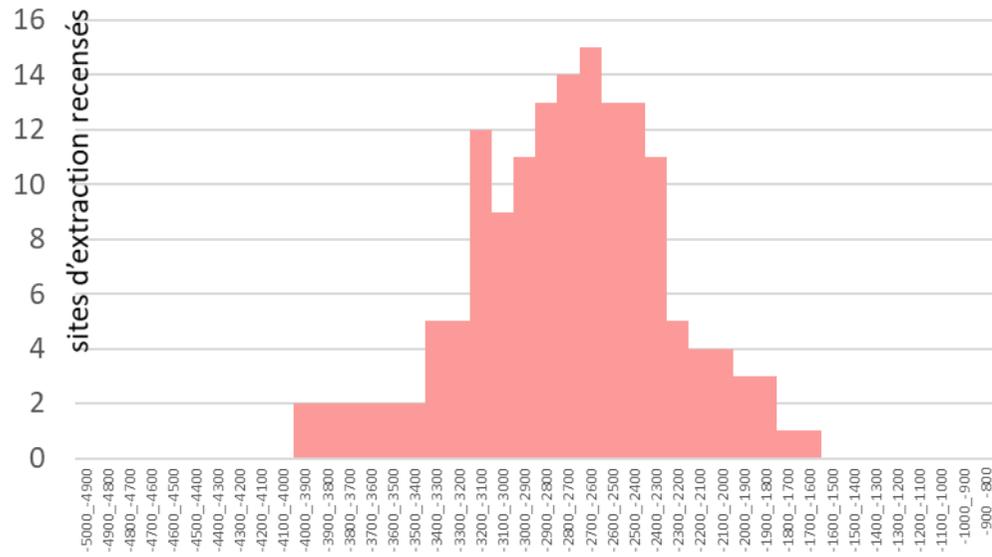


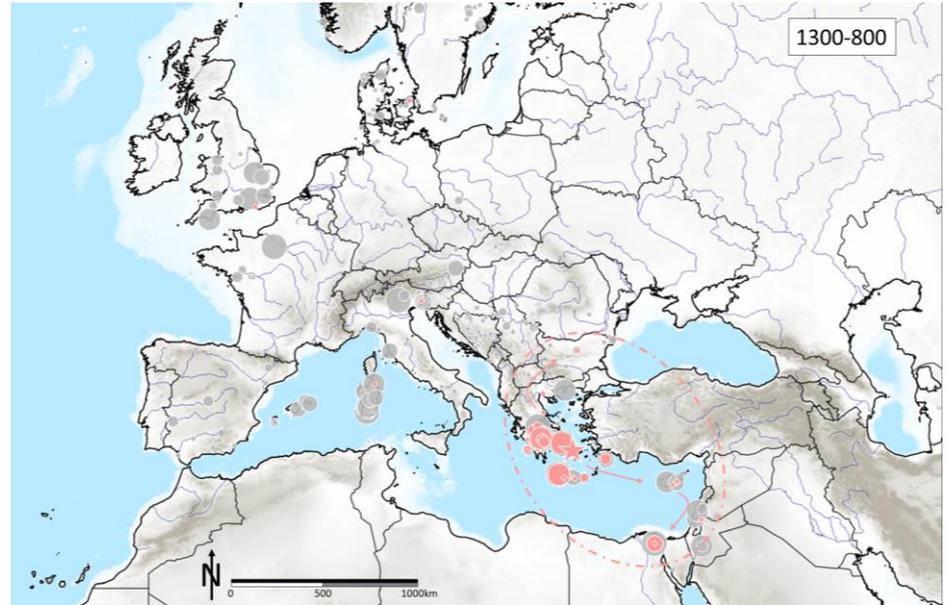
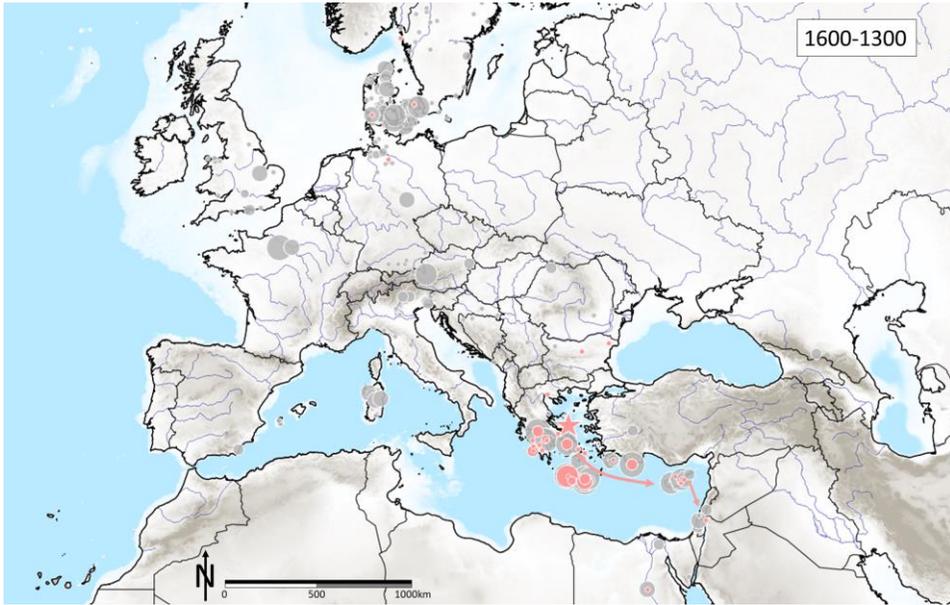
Chypre (cuivre)



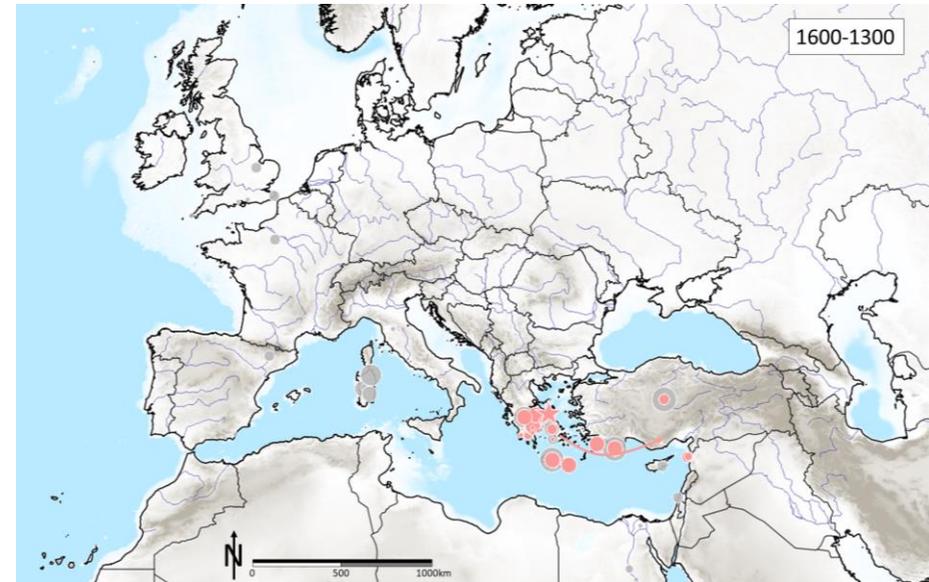
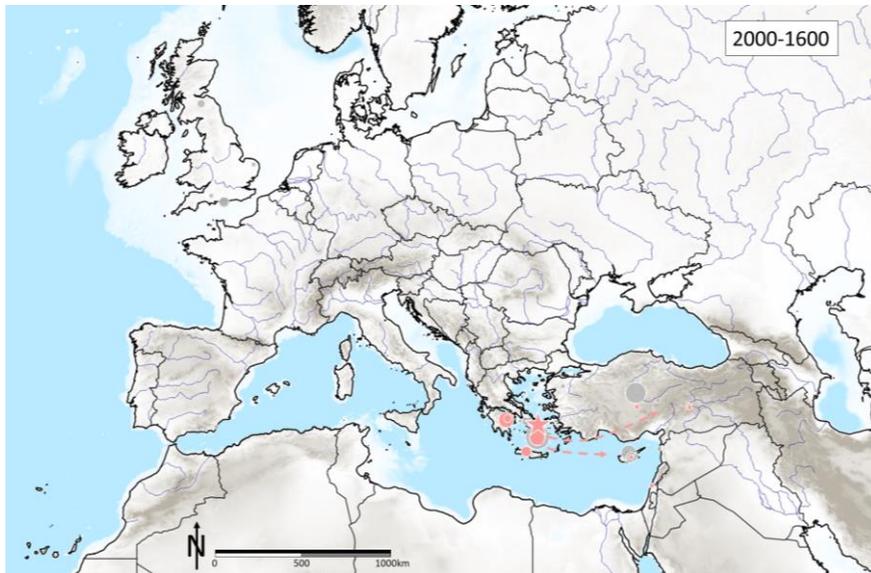
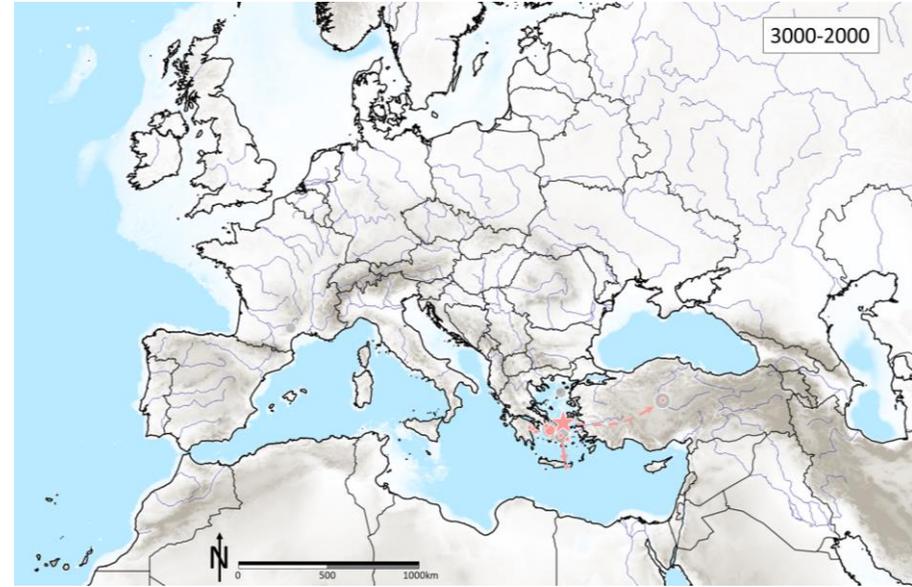
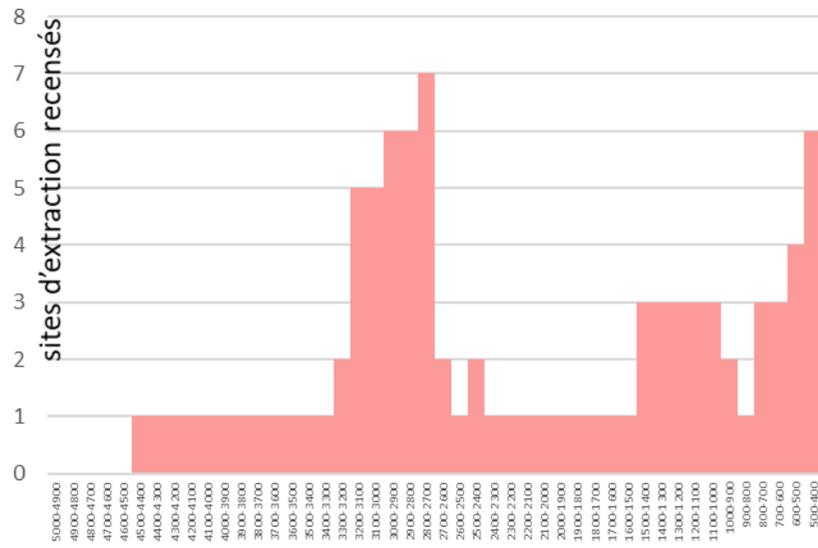


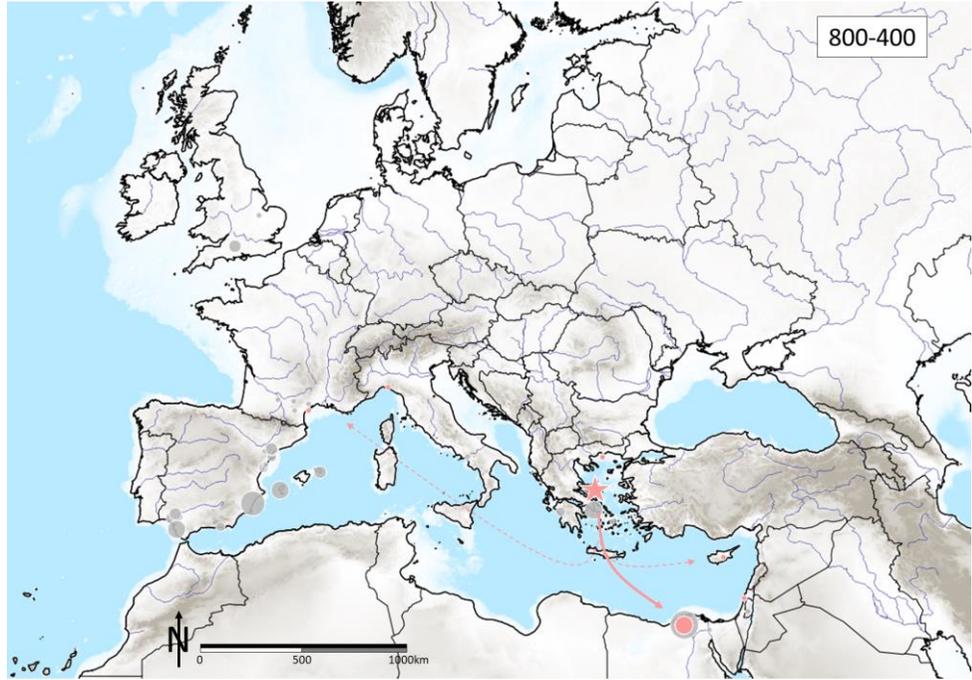
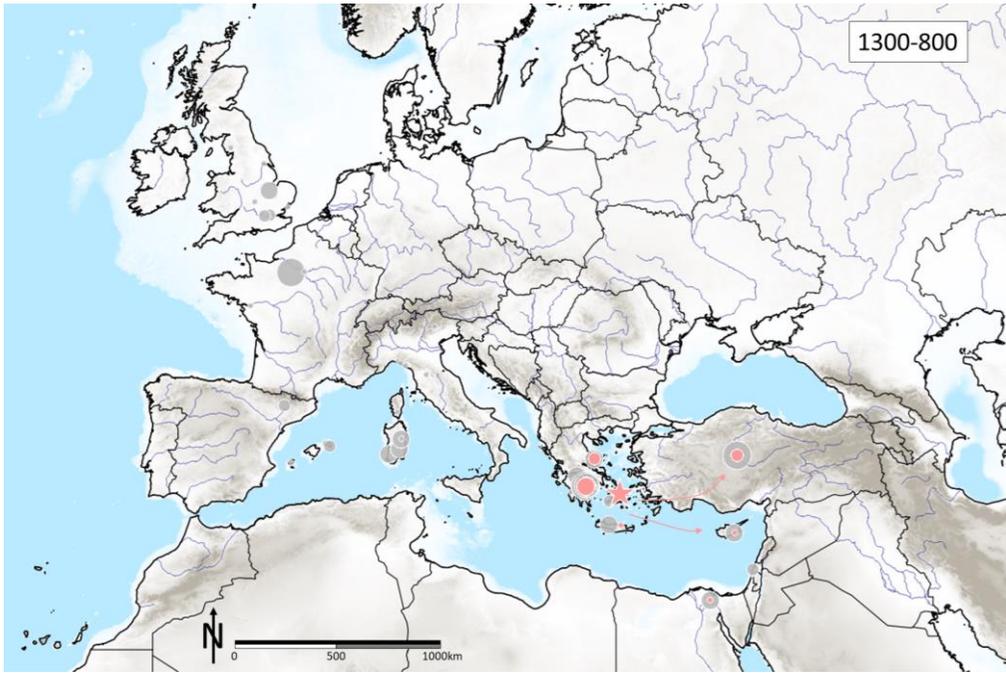
Égée (cuivre)



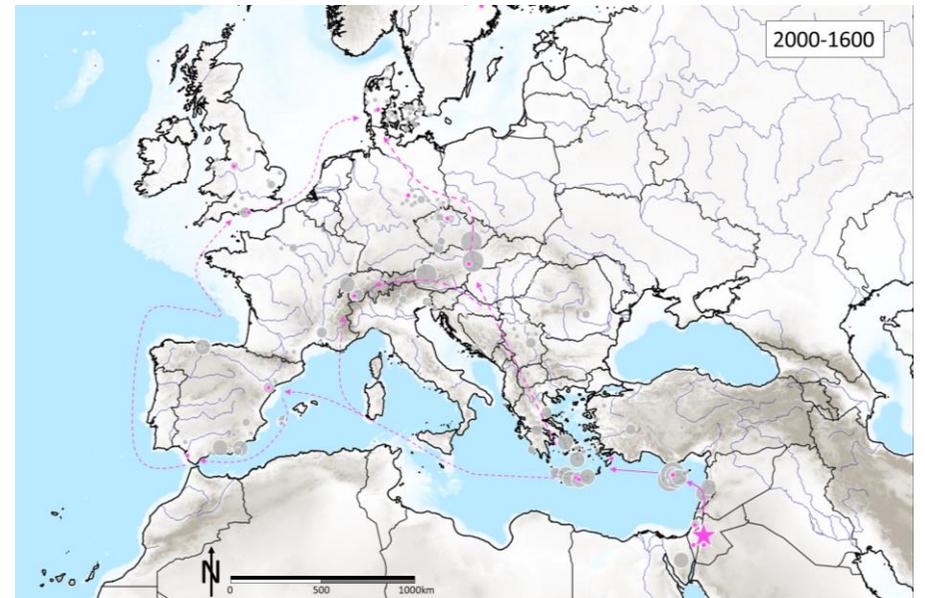
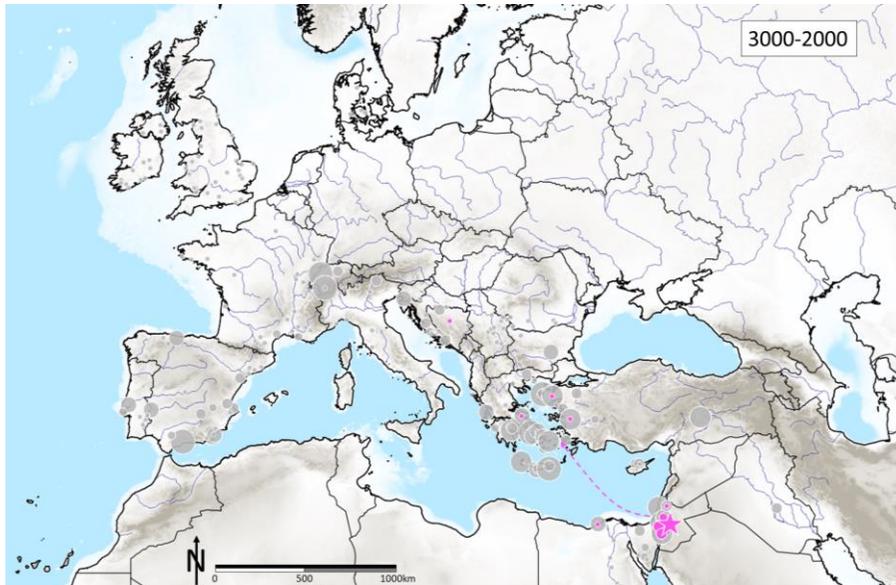
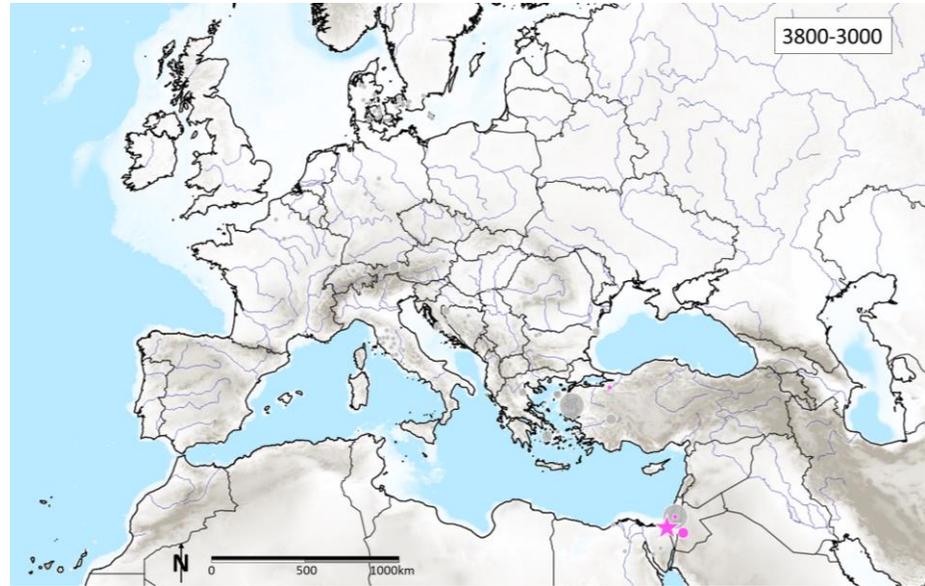
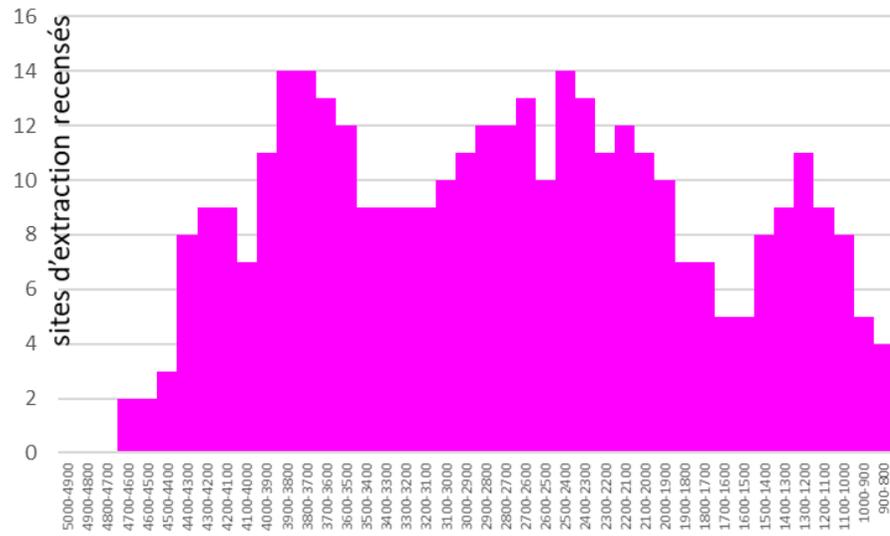


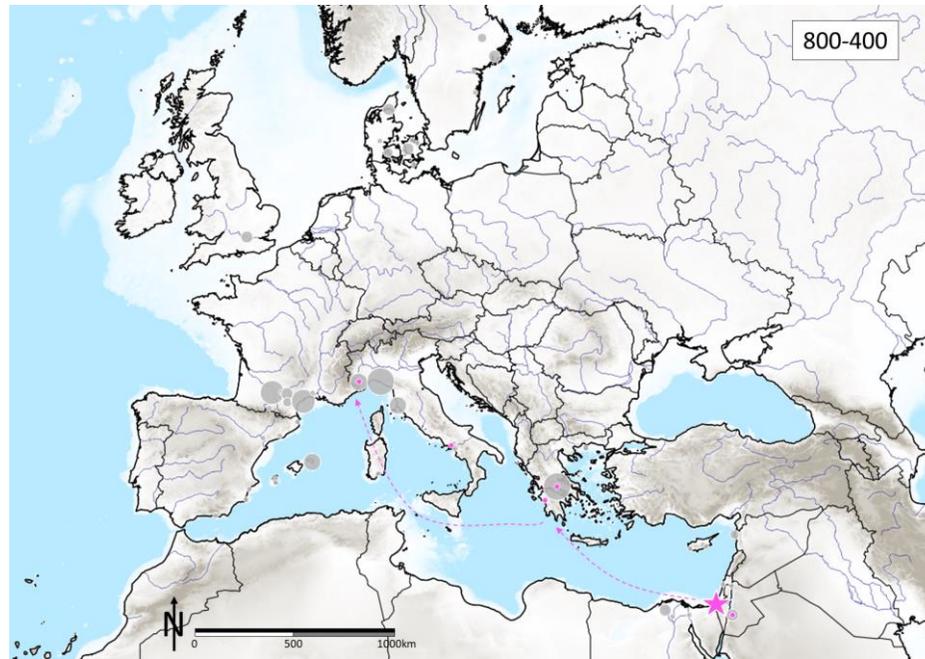
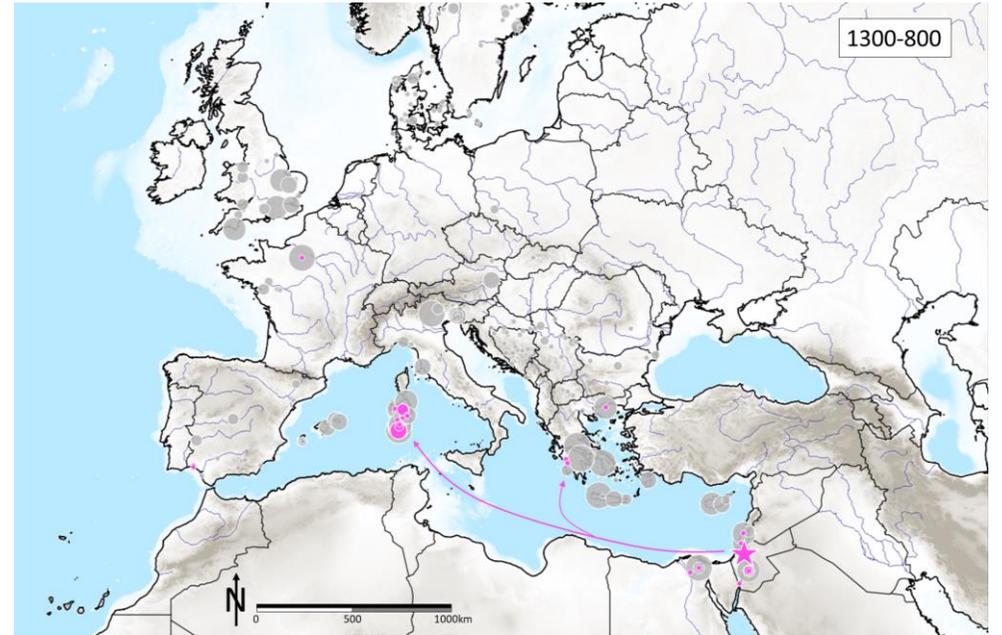
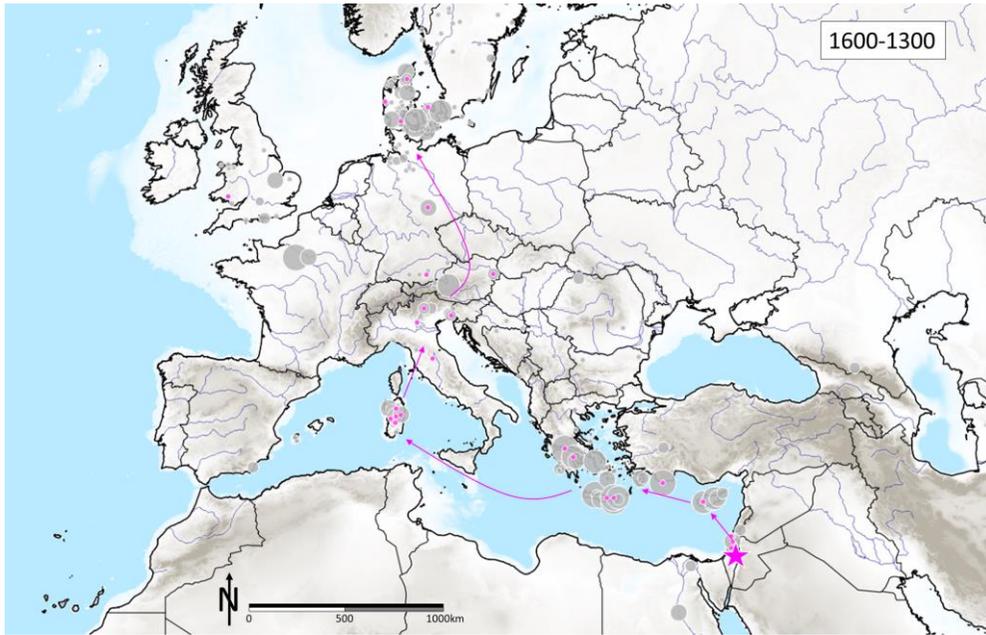
Égée (plomb)



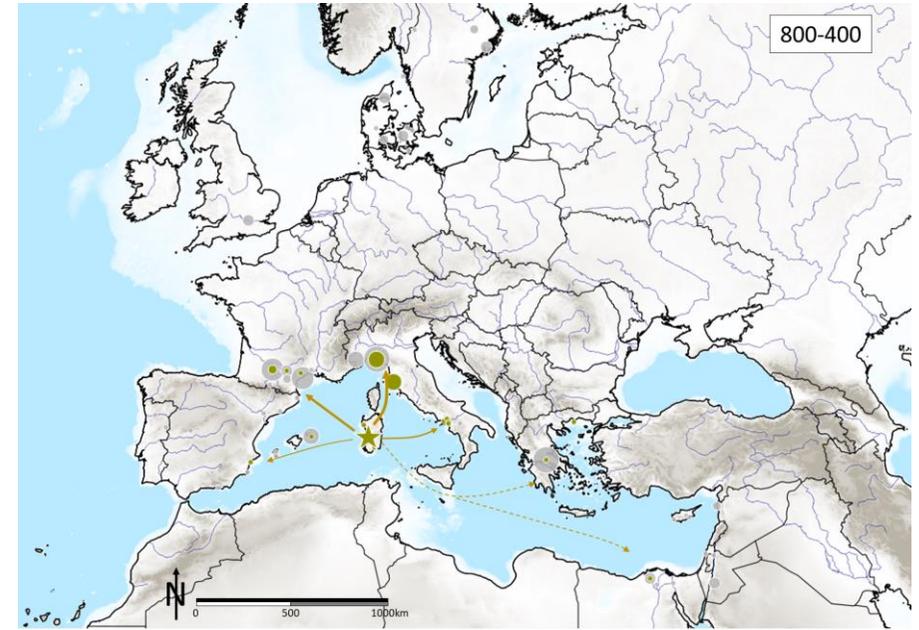
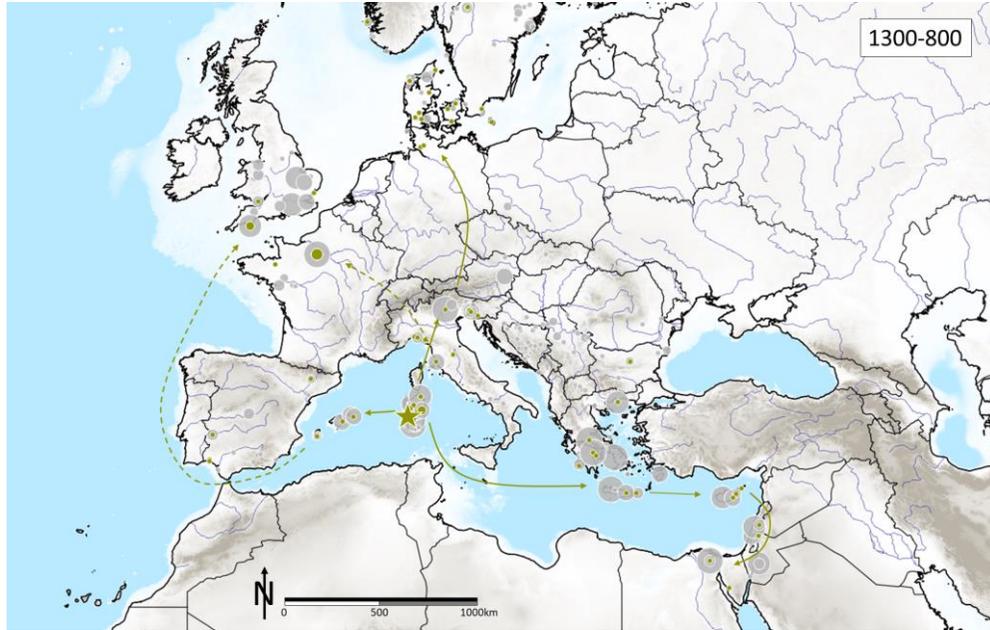
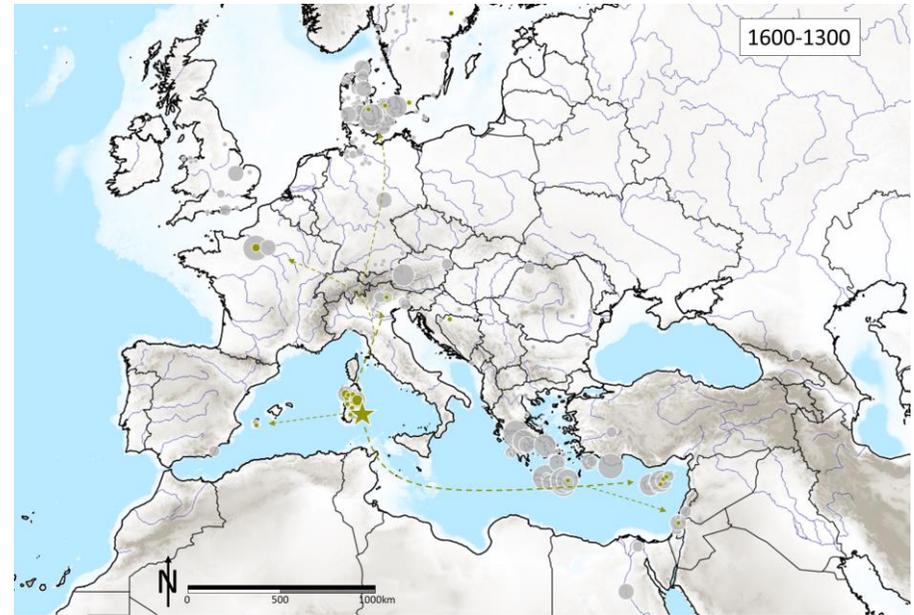
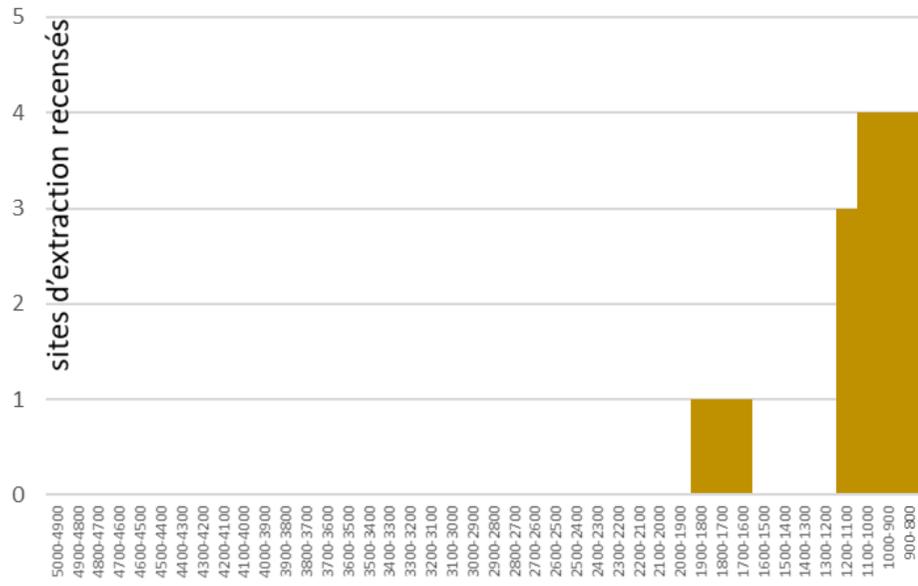


Levant (cuivre)

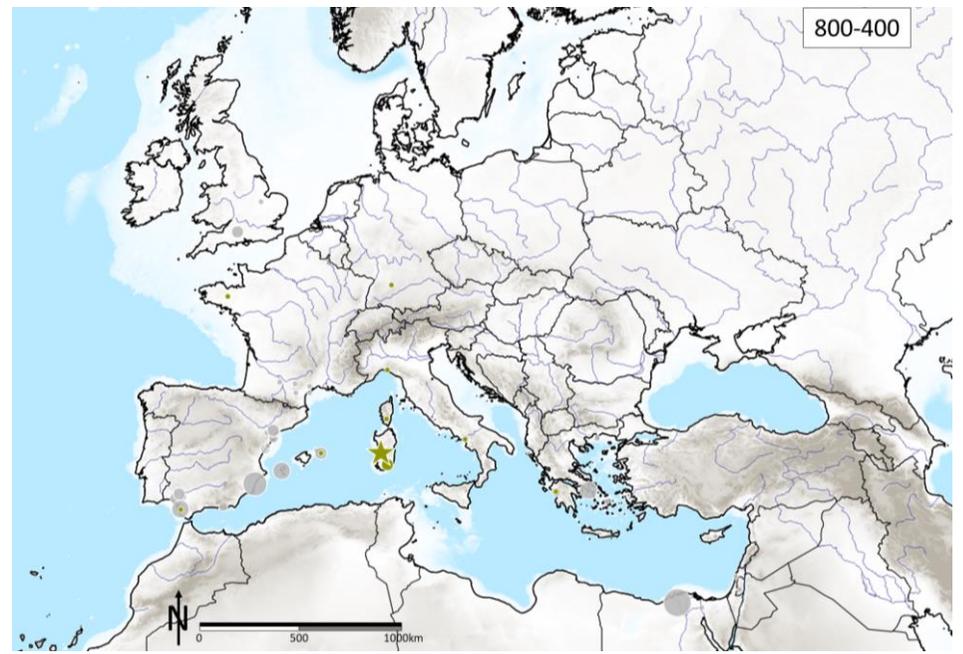
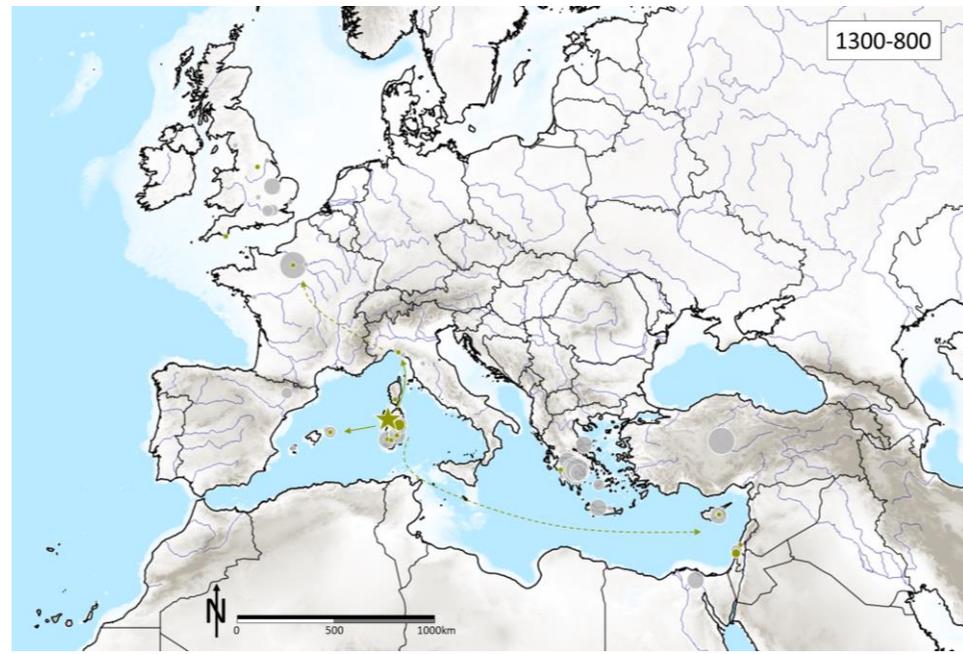
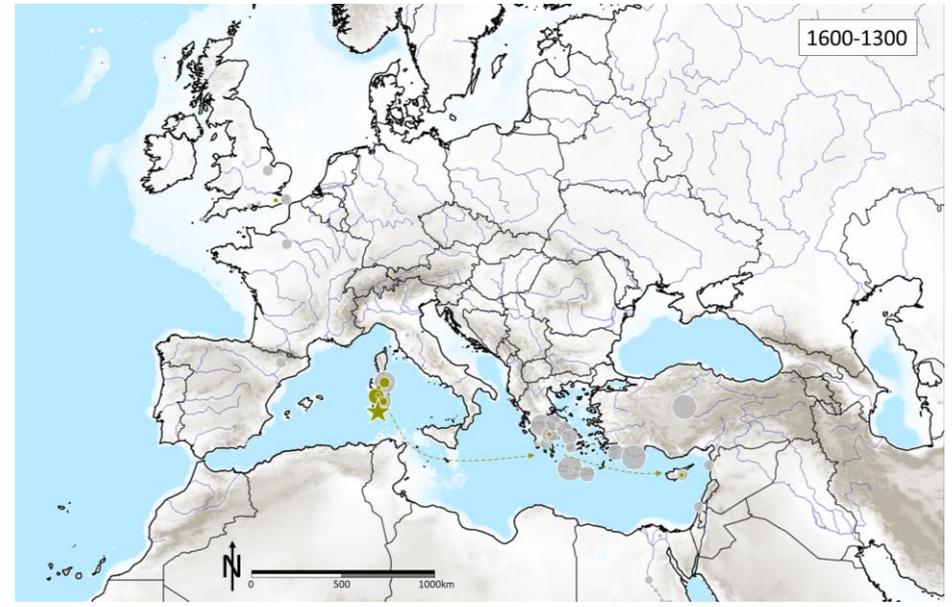
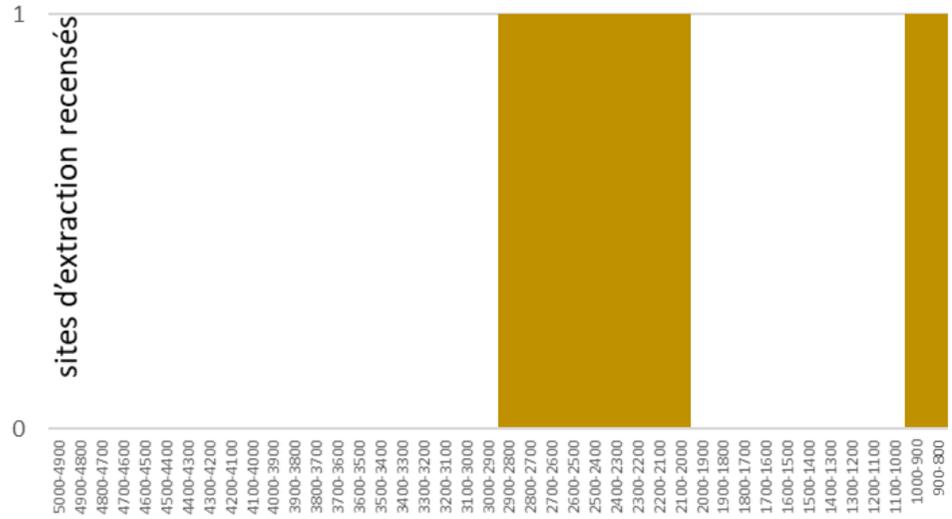




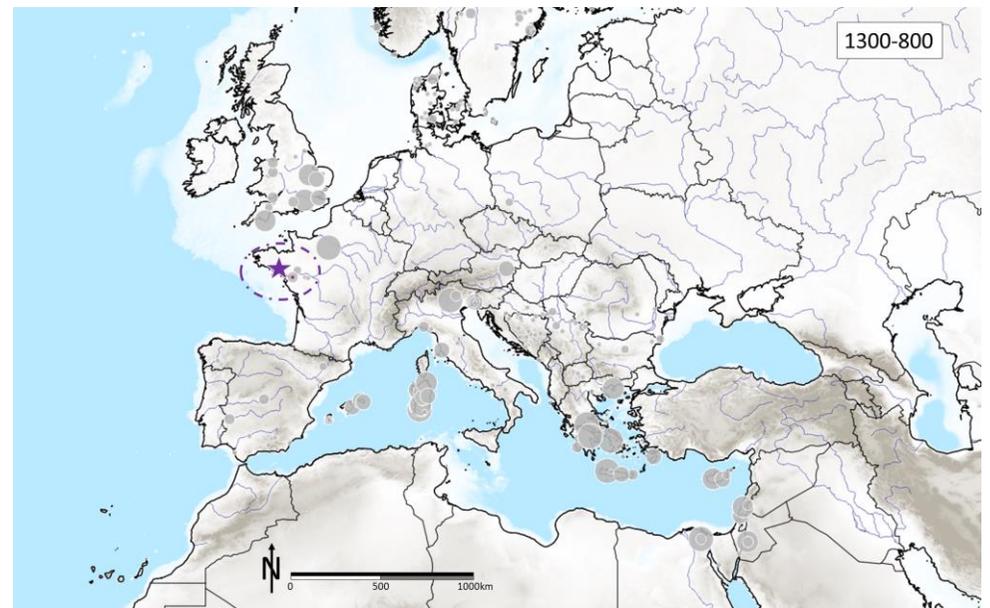
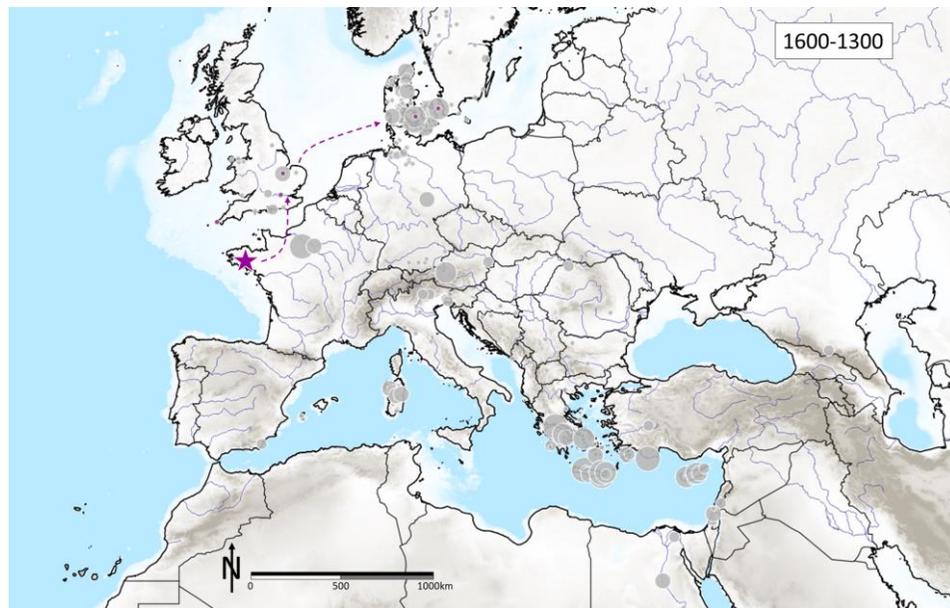
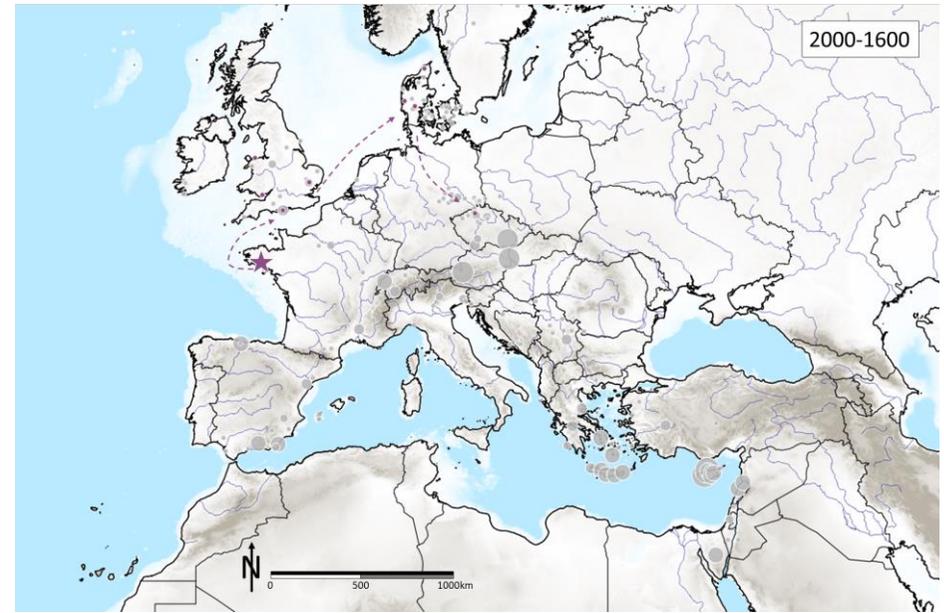
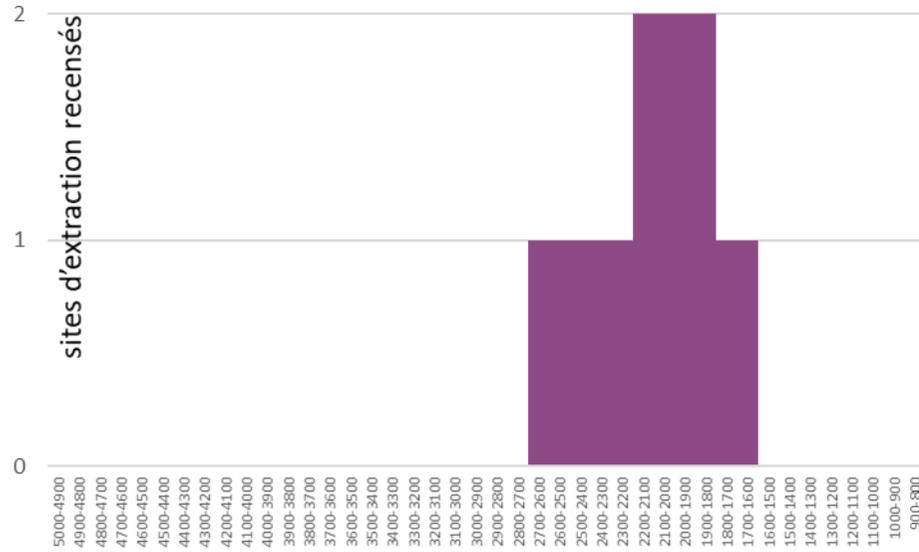
Sardaigne (cuivre)



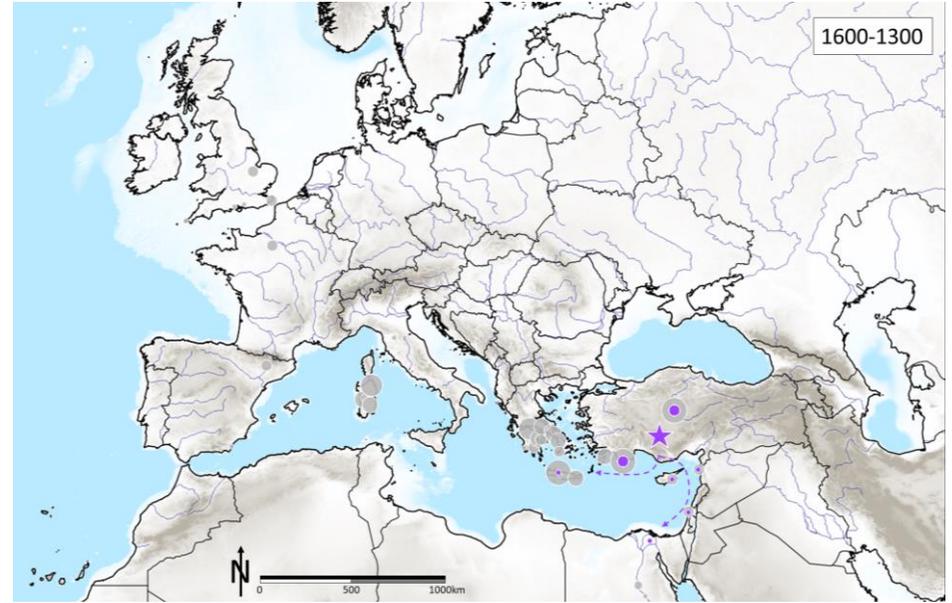
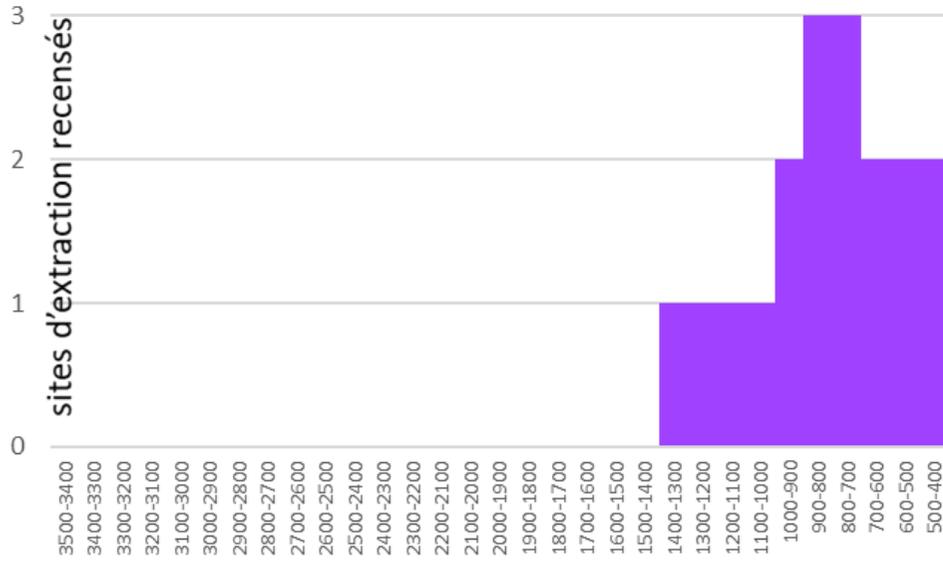
Sardaigne (plomb)

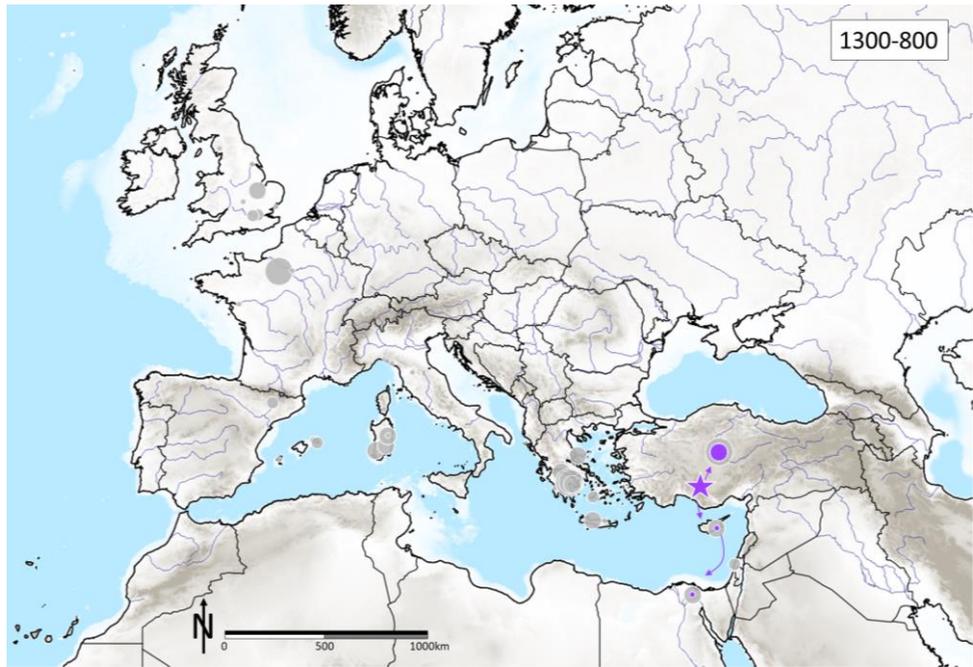


Massif armoricain (cuivre)



Monts Taurus (plomb)





V/1 Les grandes régions productrices de cuivre exportent-elles à longue distance ?

Les distances auxquelles les productions sont exportées peuvent être comparées au nombre de mines en exploitation et, plus encore, à la production de cuivre supposée extraite des mines dans les grandes régions.

Nous partons du postulat qu'une région minière produisant du cuivre en très grande quantité exporte une partie de ses productions. Cette hypothèse se confirme dans le cas des Alpes centrales et de l'est (Figure 237). Les productions de la période 2000-1600 av. J.-C. (coïncidant avec le début de l'activité minière) seraient exportées moins loin et dans moins de directions que les productions de la période suivante, soit entre 1600-1300 av. J.-C., période de plus forte production des mines alpines. Le déclin progressif supposé de l'activité minière après 1300 av. J.-C. se traduirait par des productions exportées en moins grande quantité vers le nord et le nord-ouest.

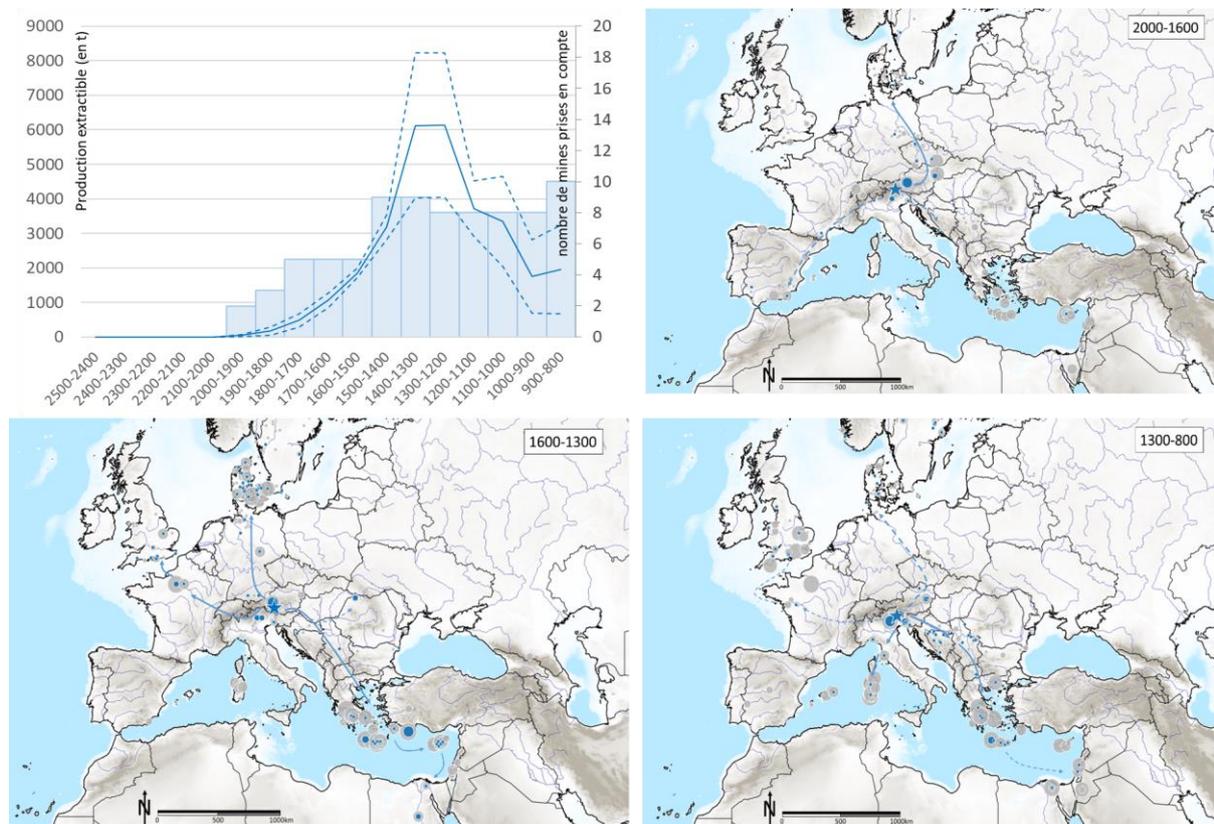


Figure 237 : Productions de cuivre supposées dans les Alpes centrales et de l'est et grands axes d'exportation identifiés entre 2000 et 800 av. J.-C.

Une corrélation entre production minière et distance d'échange s'observe également bien pour le Pays de Galles. Les mines galloises auraient principalement produit du cuivre entre 2000 et 1600 av. J.-C. (Figure 238). Or, c'est à cette période que des artefacts de provenance présumée galloise sont retrouvés le plus loin des îles Britanniques. Les axes d'exportation sont cependant moins bien définis que dans le cas des productions alpines, probablement en raison d'une plus grande hétérogénéité des signatures, mais aussi en raison de volumes de production moindres. Le pic de production entre 1600 et 1300 av. J.-C. serait contemporain d'importantes exportations vers la Scandinavie, mais la chute brutale de production après 1300 av. J.-C. n'aurait pas entraîné une diminution des distances d'exportation qui

semblent atteindre à nouveau des destinations lointaines. Cela pourrait s'expliquer par l'exploitation potentielle de mines encore inconnues dans le nord de l'Angleterre. En effet, les isotopes du plomb indiquent que le cuivre proviendrait alors d'une région voisine, l'Écosse, où la présence de pollutions de tourbières (et donc d'activités métallurgiques) a été identifiée (Mighall *et al.*, 2014). Les Cornouailles (pointe sud-ouest de l'île anglaise) pourraient également avoir exporté du cuivre à cette époque.

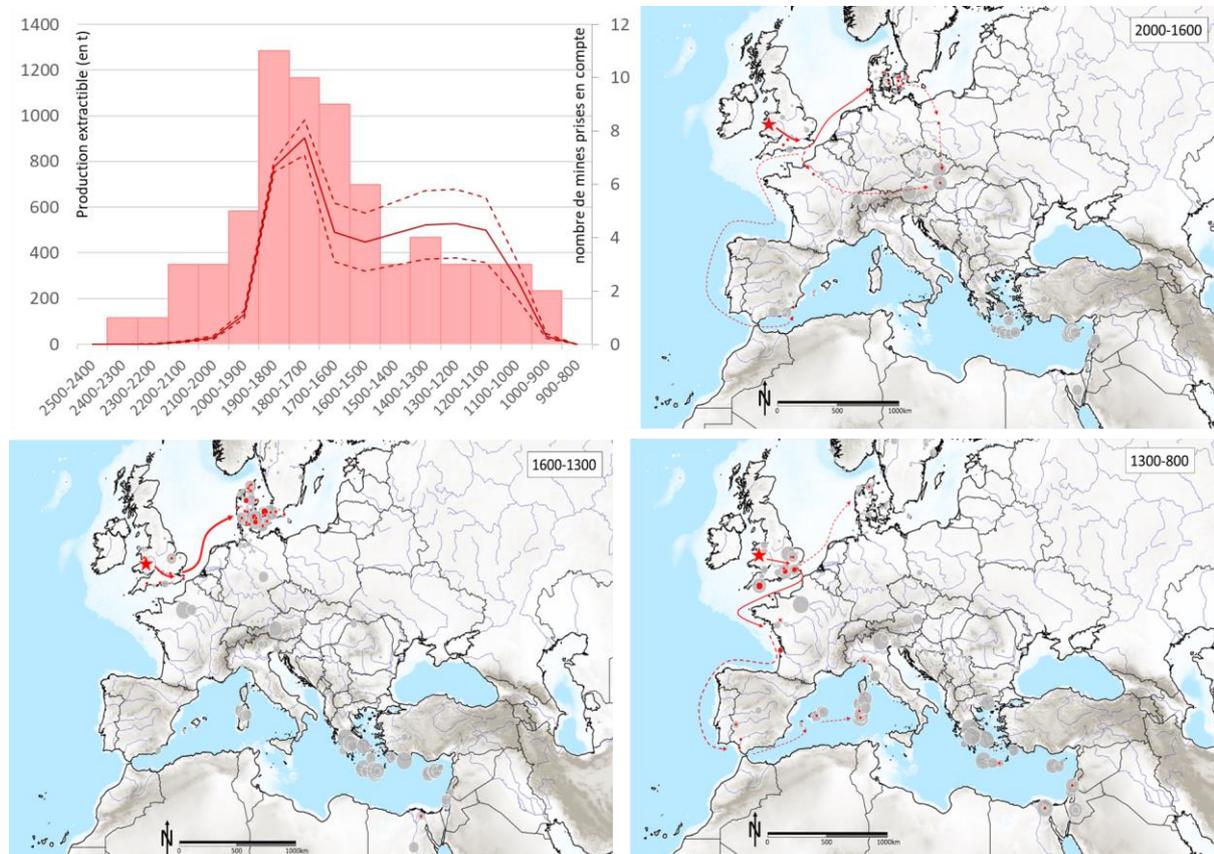


Figure 238 : Production de cuivre supposée du Pays de Galles et grands axes d'exportation identifiés entre 2000 et 800 av. J.-C.

En revanche, la dynamique des productions minières ibériques ne coïncide pas vraiment avec les axes d'exportation supposés (Figure 239). Nous devrions observer une augmentation des exportations après 1300 av. J.-C., mais cette augmentation se manifeste dès 1600 av. J.-C. L'hypothèse de mines non découvertes qui pourraient avoir produit du cuivre au cours de cette période est alors envisageable. Ces mines seraient principalement localisées dans les sous-classes SEPibe2 et Pibe3 soit respectivement dans la région de Sierra del Cabo de Gata/Sierra Almagrera/Cerro Minado et d'Aznalcollar/Rio Tinto. Ces régions sont connues pour avoir été exploitées à des périodes antérieures (dans le cas de Cerro Minado et d'Aznalcollar), et à des périodes postérieures (dans le cas du Rio Tinto).

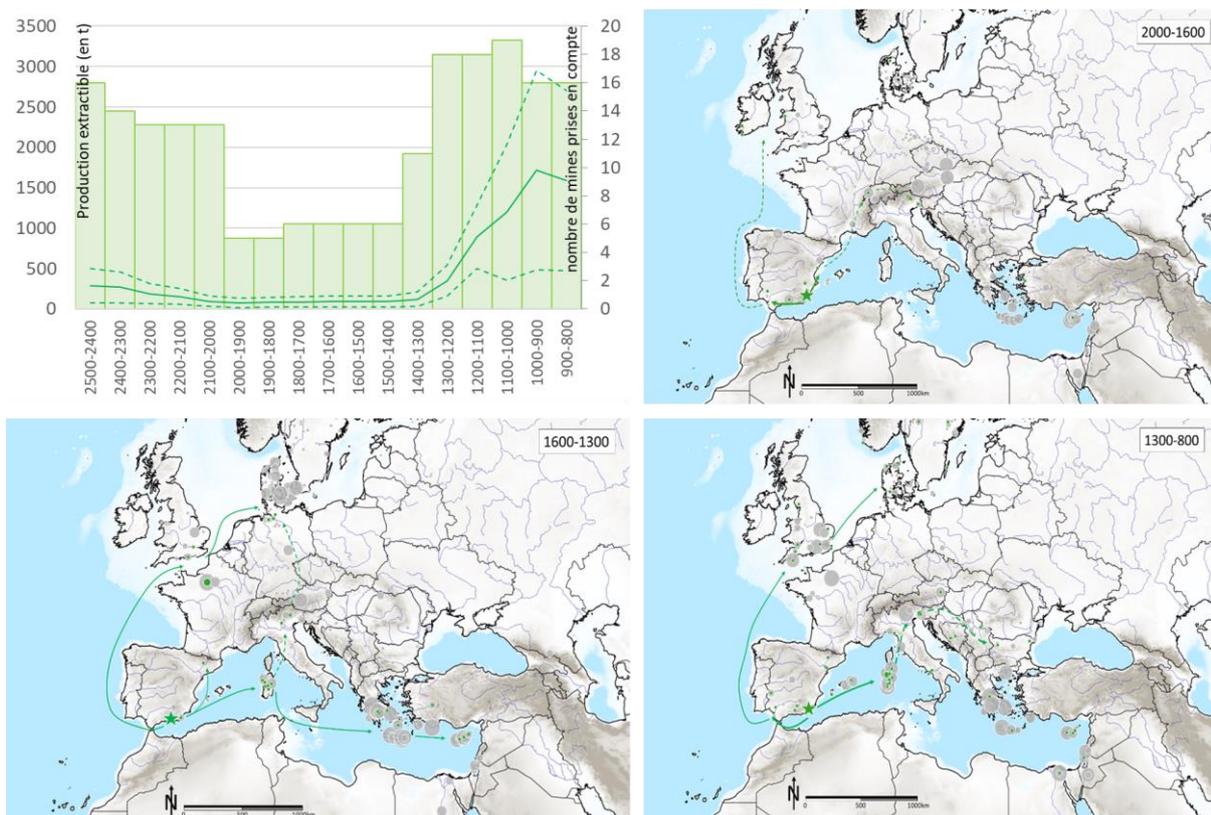


Figure 239 : Production de cuivre supposée en péninsule Ibérique³⁶⁰ et grands axes d'exportation identifiés entre 2000 et 800 av. J.-C.

Ainsi, dans deux des trois régions où les fouilles ont été très actives et où des productions ont pu être estimées, les isotopes du plomb laissent supposer l'existence de mines encore à découvrir.

Ces cas ne sont isolés. En Égée, par exemple, les isotopes du plomb indiquent clairement que des minerais de cuivre ont été extraits à des dates postérieures de 1000 ans à celles connues par les découvertes d'ateliers de métallurgie d'extraction.

Cela nous rappelle que les sites d'extraction qui nous sont parvenus ne constituent qu'un échantillon réduit de l'ensemble des sites qui ont réellement été en activité et explique pourquoi certaines régions exportatrices de cuivre indiquées dans nos cartes de résultats ne figurent pas dans l'inventaire des mines en exploitation.

³⁶⁰ Le sud et le sud-est de la péninsule ont été regroupés en raison du faible nombre d'artefacts présentant une correspondance avec ces minéralisations.

V/2 Axes d'exportations supposés pour la période 3800-3000 av. J.-C.

V/2.a Des provenances mal définies

Peu de signatures d'artefacts sont disponibles pour la période 3800-3000 av. J.-C.

Le nombre d'analyses d'artefacts en plomb est dérisoire, et nos résultats indiquent que le plomb consommé en Égée provient de sources locales.

Le nombre d'analyses d'artefacts en cuivre est plus conséquent et, même si seuls un peu moins de 20 % des artefacts présentent des correspondances claires avec des régions minières, nous pouvons tracer une carte synthétisant les résultats de la détermination de provenances.

Les artefacts pour lesquels aucune correspondance ne peut être définie (« x ») ou douteuses (« gris ») apparaissent en noir, les artefacts pour lesquels une provenance a été définie (« ok » ou *overlaps* de régions minières pouvant être résolus) sont en gris. Les axes tracés correspondent à la superposition des axes déterminés pour chaque grande région minière (le centre de chaque région est représenté par une étoile).

La carte synthétisant les exportations théoriques depuis les régions productrices de cuivre (Figure 240) indique que seules 6 des 20 zones de production considérées³⁶¹ présentent des correspondances de signatures isotopiques avec les artefacts.

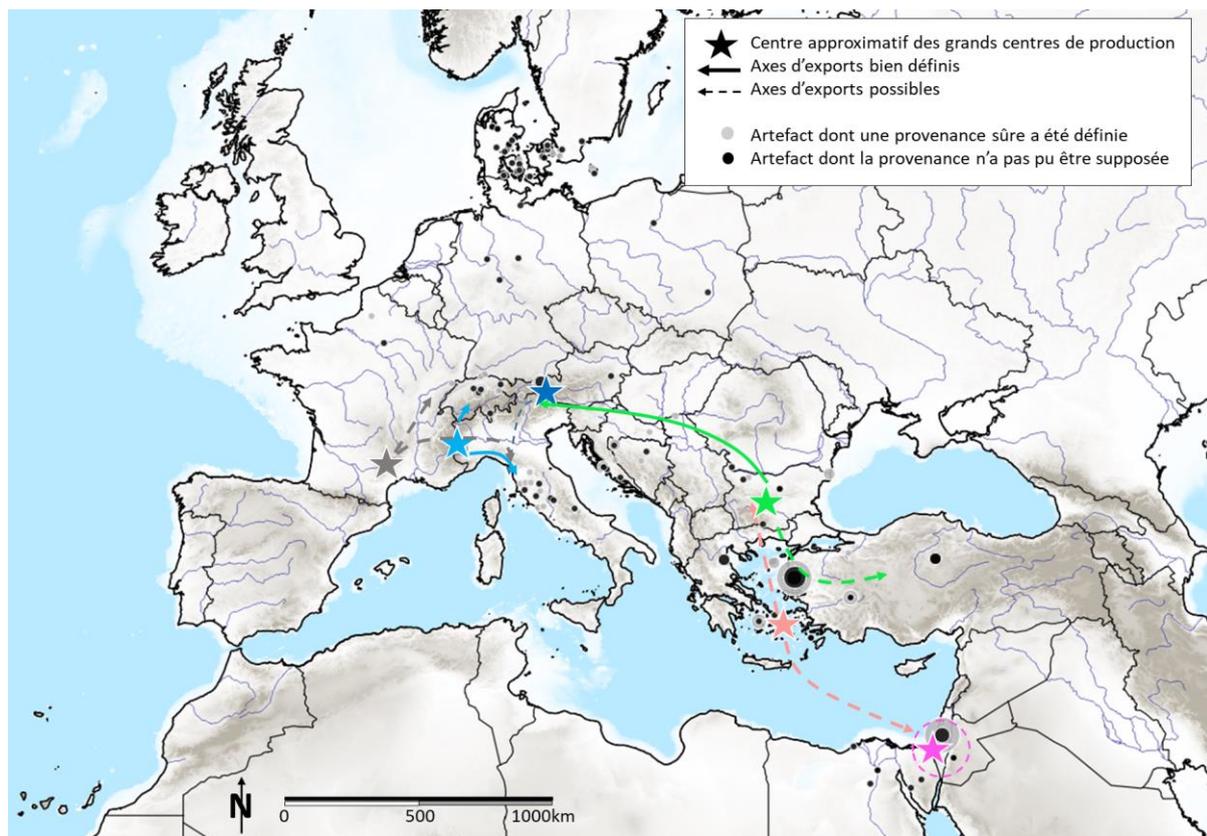


Figure 240 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) du IV^e millénaire av. J.-C.
Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.
Peu de données de signatures d'artefacts sont disponibles et peu présentent des associations claires avec des groupes de signatures de minerais.

³⁶¹ Massif central, péninsule Ibérique, Catalogne, île d'Elbe, Ligurie, Toscane, Alpes de l'Ouest, centrales et de l'est, Carpates, Monts Métallifères, Harz, Pologne, Égée, Çanakkale, Balkans, Levant, Anatolie, Arménie.

Comme à la période 5000-3800 av. J.-C., les productions intensives des Balkans étaient exportées sur de grandes distances. Il pourrait en être de même pour les productions égéennes qui pourraient atteindre les côtes du Levant et des Balkans, mais cette supposition repose sur peu de données (issues de la résolution d'*overlaps*), et la majorité des productions égéennes ne semble s'échanger qu'à l'échelle locale.

Les mines du Massif central exporteraient leurs productions au moins jusqu'aux Alpes. En revanche, les exploitations alpines et du Levant ne nourriraient qu'une demande locale. Ces faibles exports sont cohérents avec les cartes de répartition des mines et des ateliers de métallurgie extractive qui indiquent que les sites miniers sont très peu nombreux dans ces régions.

Des productions très localisées et de faibles envergures³⁶² expliqueraient le peu de correspondances pouvant être définies : des exploitations de faible dimension ou encore des ramassages de surface ont pu répondre à la demande en cuivre, laissant peu de traces dans les paysages.

V/2.b Des axes d'exports de dimensions inégales

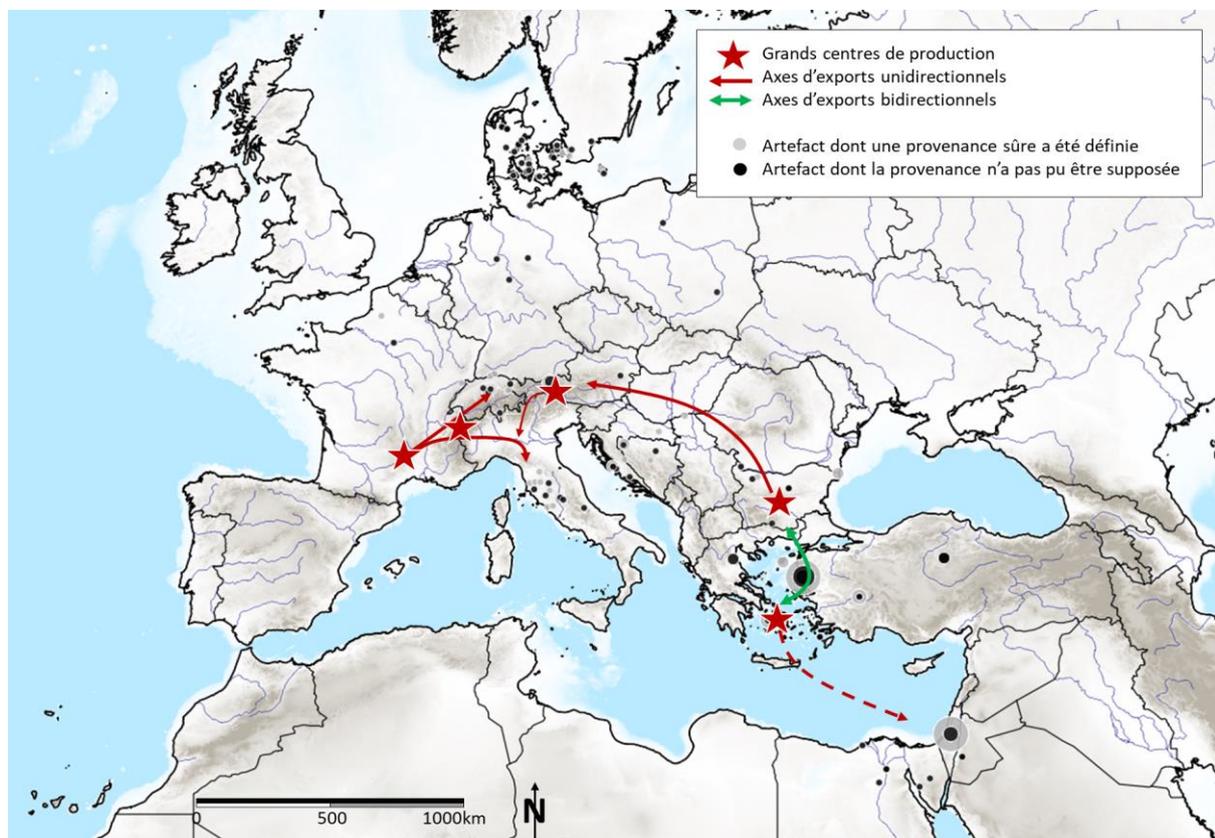


Figure 241 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour la période 3800-3000 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels (le cuivre est exporté depuis la zone de production vers (pointe de la flèche) la zone de consommation) sont représentés en rouge. Un axe bidirectionnel (du cuivre est à la fois exporté et importé) reliant l'Égée au sud des Balkans est représenté par une double flèche verte.

Les axes d'exportation proposés indiquent que les productions de cuivre des Balkans sont exportées majoritairement vers l'ouest, atteignant la chaîne alpine, la péninsule Italienne, et peut-être la

³⁶² En partie 1 nous avons observé que les mines étaient probablement majoritairement de faible dimension à cette période. Les résultats des analyses isotopiques corroborent cette hypothèse.

Scandinavie. Ces exportations sont particulièrement bien marquées le long d'un couloir d'exportation « Balkans-Alpes ». Cet axe semble unidirectionnel : le cuivre quitte les Balkans vers les Alpes, mais le cuivre alpin ne semble pas atteindre les Balkans. Un second « axe » d'exportation unilatéral partant du Massif central vers les Alpes est également très net. Un troisième axe relie peut-être les productions égéennes au Levant.

La majorité des mouvements observés en Europe de l'Ouest correspondent à de petits couloirs d'échange unidirectionnels allant d'ouest en est. Davantage de signatures d'artefacts retrouvés dans l'ouest de l'Europe seraient nécessaires afin de déterminer si des exports de mines alpines ont également lieu vers l'ouest (notamment vers la péninsule Ibérique) ou si les productions régionales nourrissent une demande locale (la péninsule Ibérique consommerait alors son propre cuivre).

Plus intéressant, bien que cela soit appuyé par très peu de correspondances, un couloir d'échange bilatéral de cuivre semble se mettre en place entre le sud des Balkans et l'Égée. Ces deux régions productrices de cuivre échangeraient donc probablement des produits (semi)finis en cuivre³⁶³.

V/2.c Des échanges de cuivre plus importants à l'est ?

Les objets en cuivre sont rares en Europe occidentale au V^e millénaire av. J.-C. et les échanges lointains concernaient alors principalement le jade (Klassen *et al.*, 2017 p.945 ; Kadrow, 2022 ; Figure 242). Il n'est donc que peu surprenant que le cuivre semble circuler sur de plus grandes distances en Europe de l'est où les échanges se seraient mis en place un millénaire plus tôt.

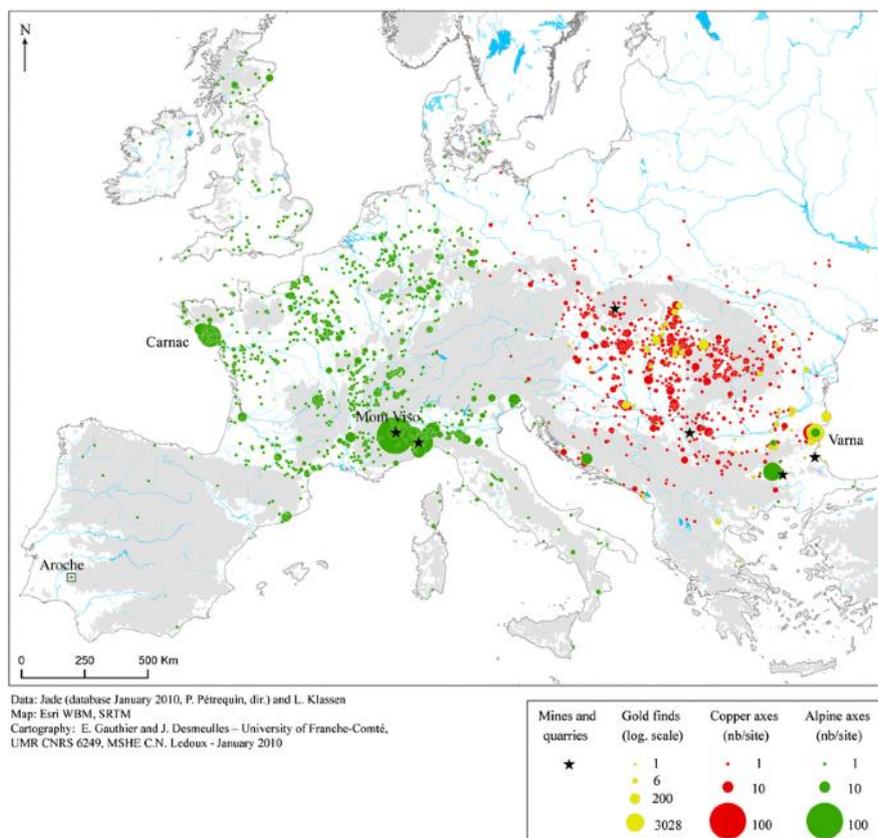


Figure 242 : Matériaux constituant les haches échangées sur de grandes distances au V^e millénaire av. J.-C..
 Source : Klassen *et al.*, 2017 p.945

³⁶³ Cette interprétation semble d'autant plus assurée que les signatures des gisements égéens et balkaniques sont très différentes.

Le nombre d'objets en cuivre découvert en Europe demeure faible au IV^e millénaire mais, en étudiant les typologies des outils en cuivre découverts dans le bassin des Carpates, le bassin Parisien et le Massif armoricain, Klassen *et al.* (2017), formulent l'hypothèse de la mise en place d'échanges est-ouest au début du IV^e millénaire av. J.-C. (Figure 243).



Figure 243 : Tracé des routes de circulation possibles pour les outils massifs en cuivre à la fin du Ve et au début du IV^e millénaire av. J.-C. La route la plus septentrionale est, selon les auteurs, la moins probable, contrairement à celle localisée au sud. Source : Klassen *et al.*, 2017.

Nous ne disposons pas de signatures d'artefacts découverts en Allemagne et ne pouvons donc pas définir si un axe d'export venant des Carpates ou du nord des Balkans pourrait emprunter une direction nord. Les analyses isotopiques réalisées dans les Alpes permettent cependant de retrouver le grand axe d'échange « Balkan-Alpes » proposé en fonction des résultats d'analyses typologique³⁶⁴.

Le tracé d'un axe d'échange méridional vers les Alpes est également compatible avec les analyses de composition élémentaire des cuivres dits de Mondsee (3800-2800 av. J.-C.), découverts dans les Alpes : ces derniers ne présentent pas de correspondances avec les assemblages chimiques locaux et sont supposés être originaires des Balkans (Frank et Pernicka, 2012)³⁶⁵.

³⁶⁴ Nous supposons cependant que le cuivre utilisé serait originaire de plus au sud que proposé par Klassen *et al.* (2017).

³⁶⁵ Cette étude constitue l'un des très bons exemples de l'importance de réaliser des analyses isotopiques et de compositions élémentaires sur les artefacts, une pratique qui était historiquement rare mais qui se généralise. En effet, les isotopes du plomb seuls ne permettent pas de définir clairement l'origine de ces cuivres (nous n'avons pas réussi à déterminer leur provenance). Cela explique certainement l'existence de débats importants concernant leur origine alpine ou non, basés uniquement sur les analyses isotopiques : tandis que Klassen et Stürup (2009) supposent une origine alpine, Frank et Pernicka (2012) la rejettent en se basant sur la composition élémentaire des artefacts.

V/3 3000-2000 av. J.-C., période Chalcolithique/Néolithique

V/3.a Du plomb échangé en Égée

Les artefacts en plomb analysés se distribuent uniquement sur le pourtour égéen. La recherche de leur provenance indique une production et une consommation locale du plomb mais également des exports de plomb égéen vers la Crète et le centre de l'Anatolie. Nous proposons donc que des échanges lient l'Anatolie, les îles des Cyclades et l'ouest de la Grèce continentale au EBA II local (soit dans la seconde moitié du III^e millénaire) comme déjà supposé par Şahoğlu (2005).

V/3.b De nombreux axes d'exportation de cuivre

Comme pour la période précédente (3800-3000 av. J.-C.), l'une des difficultés d'interprétation pour la période 3000-2000 av. J.-C. vient du fait qu'une correspondance claire ne peut être établie que 15 % des cas entre les artefacts et les signatures de minerais. De plus, peu d'artefacts ont malheureusement été analysés en dehors du pourtour méditerranéen.

Toutefois, si les productions des zones minières précédemment identifiées (Alpes, Massif central et Balkans) semblent exportées sur des distances comparables vers l'est, il est désormais possible de supposer qu'elles atteignent des régions beaucoup plus distantes vers l'ouest, car nous traçons leurs signatures dans des artefacts découverts en péninsule Ibérique. Les grands couloirs d'échanges mis en place avant 3000 av. J.-C. semblent perdurer et pourraient même s'être développés en distance.

Un nombre très conséquent de zones minières serait en exploitation de façon contemporaine ; ces résultats confortent l'étude de la répartition des mines précédemment menée (cf partie 1 IV/2.c et IV/2.d).

Des exportations de cuivre semblent désormais avoir lieu depuis le sud de l'Irlande vers la Grande-Bretagne. Les exports gallois pourraient atteindre la façade atlantique, mais cette hypothèse demanderait d'être confirmée par des analyses d'artefacts découverts en France. Ils pourraient franchir le Massif central et les Alpes sans qu'il soit possible de supposer s'ils les atteignent par l'ouest de la Méditerranée et/ou en passant par le quart nord-ouest de la France. Une fois encore, des analyses d'artefacts découverts en France pourraient permettre de favoriser l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Une autre région dont les productions ont cette fois pu être tracées est la péninsule Ibérique, dont le cuivre semble s'être exporté le long des côtes pour atteindre les côtes françaises et italiennes. La possibilité que du cuivre ibérique atteigne le monde égéen est appuyée par peu d'artefacts, mais serait envisageable pour quelques-uns d'entre eux.

Enfin, du cuivre chypriote et du Levant pourrait parvenir jusqu'aux côtes égéennes, et le cuivre chypriote atteindrait les Alpes et les Carpates.

Peu d'analyses ont été réalisées en dehors du pourtour méditerranéen et les grands axes d'exports que nous proposons se concentrent dans cette région. Il est cependant certain que des connexions doivent se faire en Europe du Nord et du Nord-Ouest.

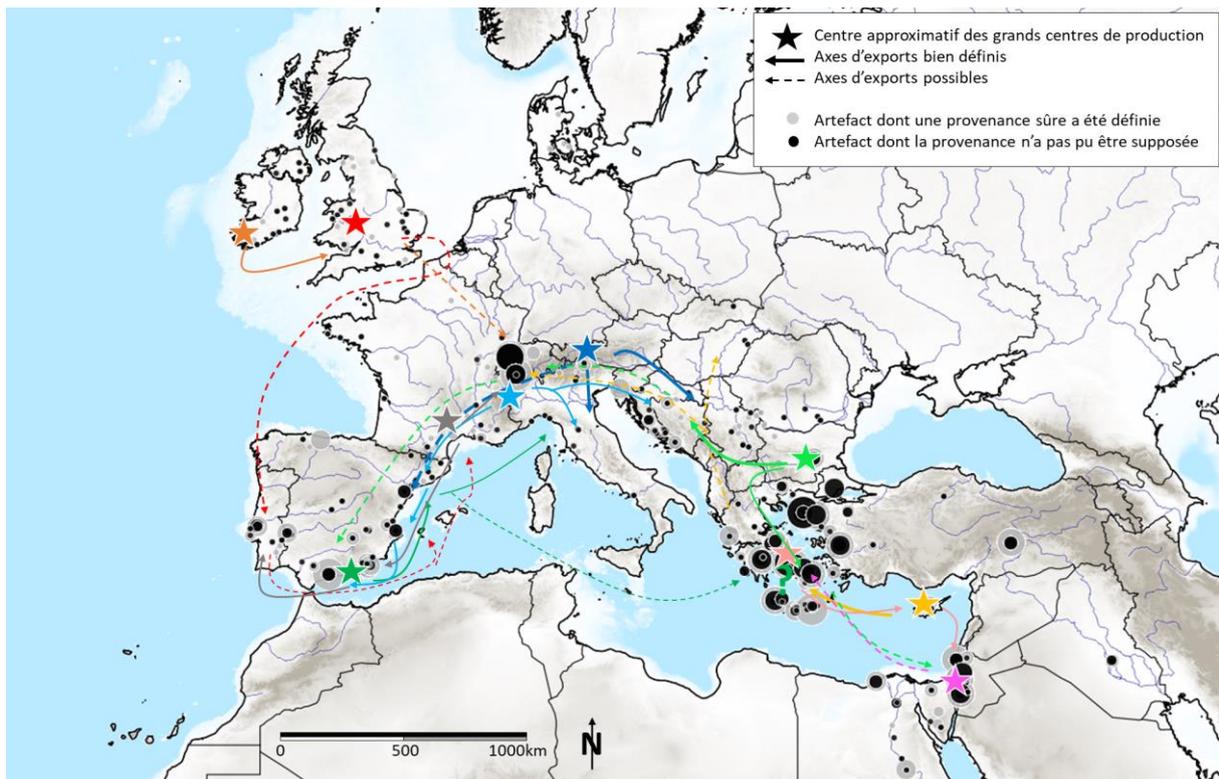


Figure 244 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) du III^e millénaire av. J.-C.
Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.

V/3.c Des carrefours d'échanges qui se mettent en place ?

Deux types d'axes d'échange se distinguent plus clairement que pour la période précédente (Figure 245) :

- Des axes unidirectionnels : les productions de cuivre ont été exportées et aucun cuivre n'a été importé de sources distantes vers la zone de production ;
- Des axes bidirectionnels : les régions productrices ont également importé des productions cuivreuses d'autres régions.

Le nombre d'axes bidirectionnels d'échange de cuivre est beaucoup plus important que pour la période précédente (3800 à 3000 av. J.-C.). L'axe « Balkans-Egée » précédemment défini est à nouveau identifiable, mais il pourrait ne plus être qu'unidirectionnel (orienté vers l'Égée), tant les productions égéennes semblent désormais peu exportées vers le nord. Il est complété par :

- Un axe « Egée-Chypre » qui pourrait également être appelé « Balkans-Egée-Chypre/Levant » tant la continuité avec l'axe précédemment évoqué semble marquée ;
- Un troisième axe « Alpes de l'ouest-Massif central-péninsule Ibérique ».

Ces trois grands axes témoignent de l'importance des échanges entre ces régions et de leur très forte interconnexion : le commerce du cuivre est déjà interconnecté à l'échelle européenne.

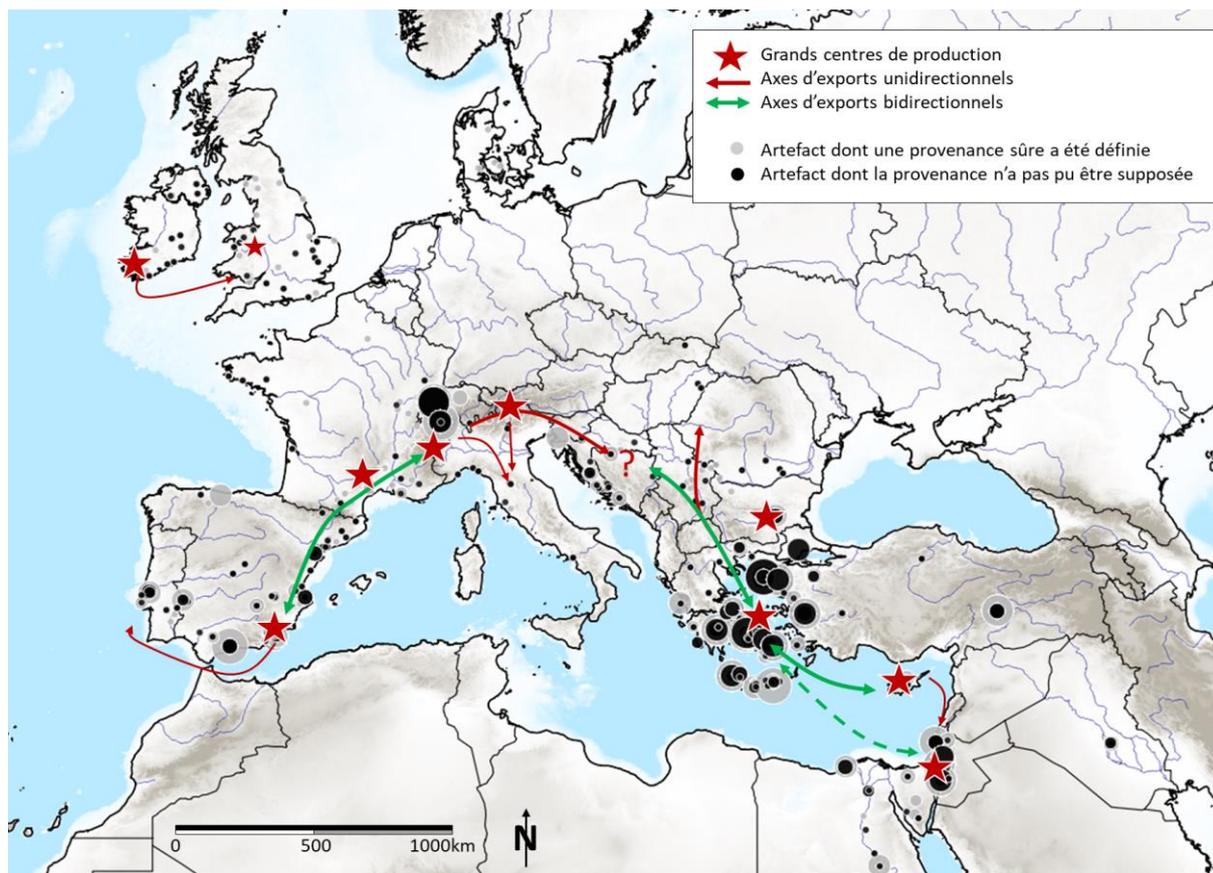


Figure 245 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour le III^e millénaire av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge. Les axes bidirectionnels sont représentés par des doubles flèches vertes.

Les Alpes pourraient constituer une barrière entre ces régions très interconnectées³⁶⁶ : assez peu de cuivre des Balkans se trace au-delà des Alpes et cette frontière semble encore plus nette concernant les exports de cuivre chypriote. Plus précisément, des productions semblent quitter les Alpes pour atteindre les deux grands couloirs d'échanges « Balkans-Egée » et « Alpes de l'ouest-Massif central-péninsule Ibérique » : les exports des Balkans et de Chypre pourraient cesser au contact des Alpes car les populations voisines des Alpes s'approvisionneraient en cuivre local³⁶⁷. Enfin, un article paru alors que cette thèse était en rédaction indique (par isotopie du plomb) une possible origine alpine d'artefacts scandinaves (Brozio *et al.*, 2023). Il se pourrait donc que les Alpes profitent également d'une connexion avec la Scandinavie³⁶⁸.

L'existence d'une autre frontière d'échange est envisageable dans le nord des Balkans (en Croatie/Bosnie) où les exports des Alpes centrales et de l'axe « Balkans-Egée » ne semblent apparemment plus se poursuivre (cette supposition est cependant appuyée par peu d'analyses d'artefacts dans cette région).

³⁶⁶ Selon Schauer *et al.* (2021), l'Europe circumalpine se distinguerait culturellement du reste de l'Europe de par son adoption d'une « coutume du poignard ».

³⁶⁷ Les productions de cuivre balkaniques et chypriotes pourraient également être mélangées au cuivre produit dans les Alpes, nous faisant perdre la trace d'une partie de ces productions.

³⁶⁸ L'étude de creusets de métallurgie d'élaboration découverts au Danemark menée par Gebauer *et al.* (2021) montre des convergences typologiques entre ces deux régions.

Le fait qu'une partie des productions ibériques pourrait atteindre les côtes égéennes permet de supposer la présence d'un grand axe méditerranéen est difficile à confirmer en raison du très faible nombre d'artefacts dont les signatures indiqueraient des échanges entre l'ouest et l'est de la Méditerranée. Bien que des échanges côtiers semblent clairement se produire le long des côtes du nord de la Méditerranée, la question d'une navigation en pleine mer ne peut être tranchée avec nos seules données. Néanmoins, Aubert (1992) indique qu'il existe des contacts entre la péninsule Ibérique et la Sardaigne dès le III^e millénaire av. J.-C. Des analyses d'artefacts sardes pourraient permettre de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse d'une navigation en haute mer plutôt qu'une navigation par cabotage moins risquée. La Sardaigne pourrait en effet constituer une escale pour la traversée d'ouest en est de la Méditerranée.

Enfin, bien que des productions du Pays de Galles d'une part, et de l'axe « Alpes de l'ouest-Massif central-péninsule Ibérique » d'autre part, prennent la direction des côtes françaises, il est difficile de définir si du cuivre circule suivant un axe « Atlantique ». Si les provenances « karstiques » (cf partie 2 IV/2.b) s'avèrent asturiennes (nord-ouest de la péninsule Ibérique) alors l'absence de connexion nette entre les productions britanniques et ibériques pourrait s'expliquer par la présence de cette grande zone de production. Quoi qu'il en soit, la taille très impressionnante des mines asturiennes et les tonnages supposés qui en ont probablement été extraits indiquent que cette zone minière a nécessairement produit des surplus. Elle pourrait, à l'instar des mines alpines, profiter d'une position de carrefour d'échange le long de la cote atlantique. Le traçage des productions de ces mines indiquerait l'existence d'un axe « SE péninsule Ibérique-Asturies-îles Britanniques », soit un axe côtier atlantique (Figure 236).

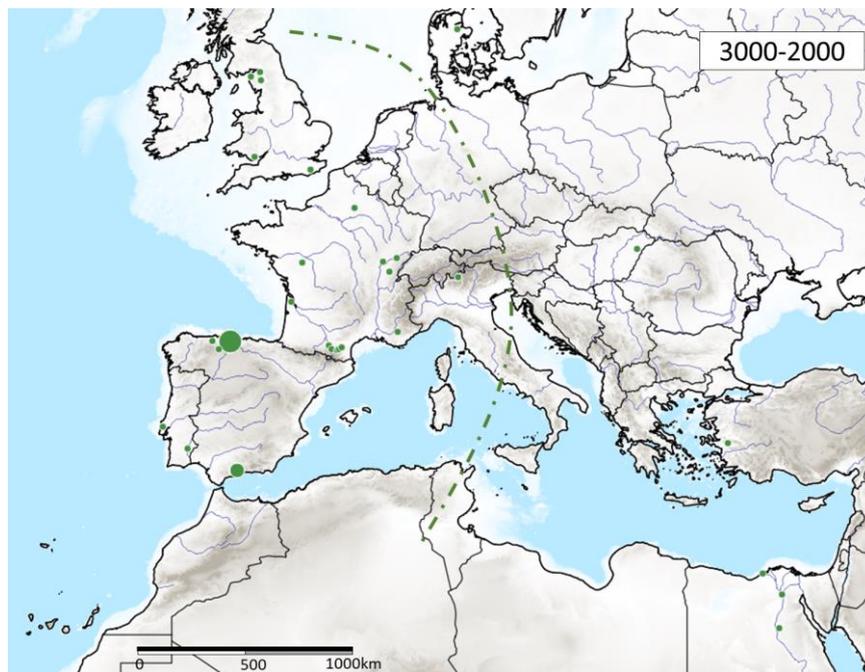


Figure 236 Figure 236(renvoi) : Localisation des artefacts pour lesquels une provenance karstique, probablement asturienne, est supposée pour le III^e millénaire av. J.-C

La présence de ces grands couloirs d'échanges transeuropéens confirme les hypothèses émises par Bostyn et Vaquer (2018) qui proposent que c'est à partir de la période de l'émergence du phénomène campaniforme soit vers 2500 av. J.-C. que se mettent en place les grands réseaux de diffusion du métal. L'analyse des rapports isotopiques du plomb d'artefacts cuivreux confirme cette mise en réseau importante que l'analyse typologique d'artefacts avait proposée.

Une demande accrue en métal, possiblement liée à des changements culturels en Europe de l'Ouest, a certainement engendré l'ouverture et l'exploitation de nombreuses mines et la création de réseaux d'exportation à longue distance. De grandes régions de contact devaient certainement profiter de leur position stratégique au cœur :

- D'un potentiel axe atlantique (cas des Asturies dont les productions minières estimées représentent presque la moitié des productions des mines dont un tonnage peut être estimé) ;
- D'un couloir d'échange reliant l'Europe de l'Est à l'Europe de l'Ouest (cas des Alpes dont la production a brusquement augmenté à la toute fin du III^e millénaire).

V/4 2000-1600 av. J.-C. Bronze ancien

Les échanges du début de l'âge du Bronze sont plus faciles à retracer, car les artefacts en cuivre analysés se répartissent sur une plus grande surface, mais aussi, car le pourcentage d'artefacts pour lesquels une provenance peut être supposée est bien meilleur (40 % contre 15 % précédemment).

Les régions minières pour lesquelles des exports ont été identifiés sont sensiblement identiques à celles du III^e millénaire (Figure 246), ce qui est cohérent avec la carte de répartition des mines connues qui ne varie que très peu pour le cuivre entre le III^e millénaire av. J.-C. et le début de l'âge du Bronze. Les principales différences observées concernent les tonnages plus importants extraits des mines et l'augmentation brutale du nombre d'exploitations, notamment dans les Alpes et les îles Britanniques.

Les productions bretonnes de cuivre sont identifiées par la présence de nombreux ateliers d'extraction mais le devenir du cuivre breton est complexe à définir : seuls 5 artefacts présenteraient clairement une provenance bretonne (4 découverts au Danemark et un en République tchèque) et 4 artefacts découverts en Angleterre pourraient avoir cette origine. La difficulté de tracer le cuivre breton est liée à l'hétérogénéité des signatures isotopiques des minerais analysés et certainement également au fait que les analyses n'ont pas directement porté sur des minerais de cuivre (elles concernent des minerais de plomb). Tracer le devenir du cuivre breton demanderait donc de réaliser de nouvelles analyses de minerais.

En revanche, certaines zones minières dont les exports étaient précédemment faibles semblent désormais exporter leurs productions sur des distances très importantes.

Il s'agit notamment des productions du Levant (issues d'Abu Matar et de Timna, alors que précédemment seules des productions du district de Timna avaient été identifiées), mais aussi des productions égéennes qui atteignent les Alpes. Cette interprétation va en partie à l'encontre de celle proposée par Georgakopoulou (2005) qui suppose, par l'interprétation des signatures isotopiques du plomb, que les Cyclades n'ont été intensément exploitées pour le cuivre, le plomb et l'argent que lors du Bronze ancien local (soit au III^e millénaire). Selon elle, les productions des Cyclades seraient ensuite remplacées par des productions du Laurion et de Chypre. Or, si nous ne percevons plus de productions de Çanakkale au début du II^e millénaire av. J.-C., nos interprétations des isotopes du plomb révèlent une prépondérance de provenances cycladiques et du Laurion pour cette période ainsi que pour la précédente.

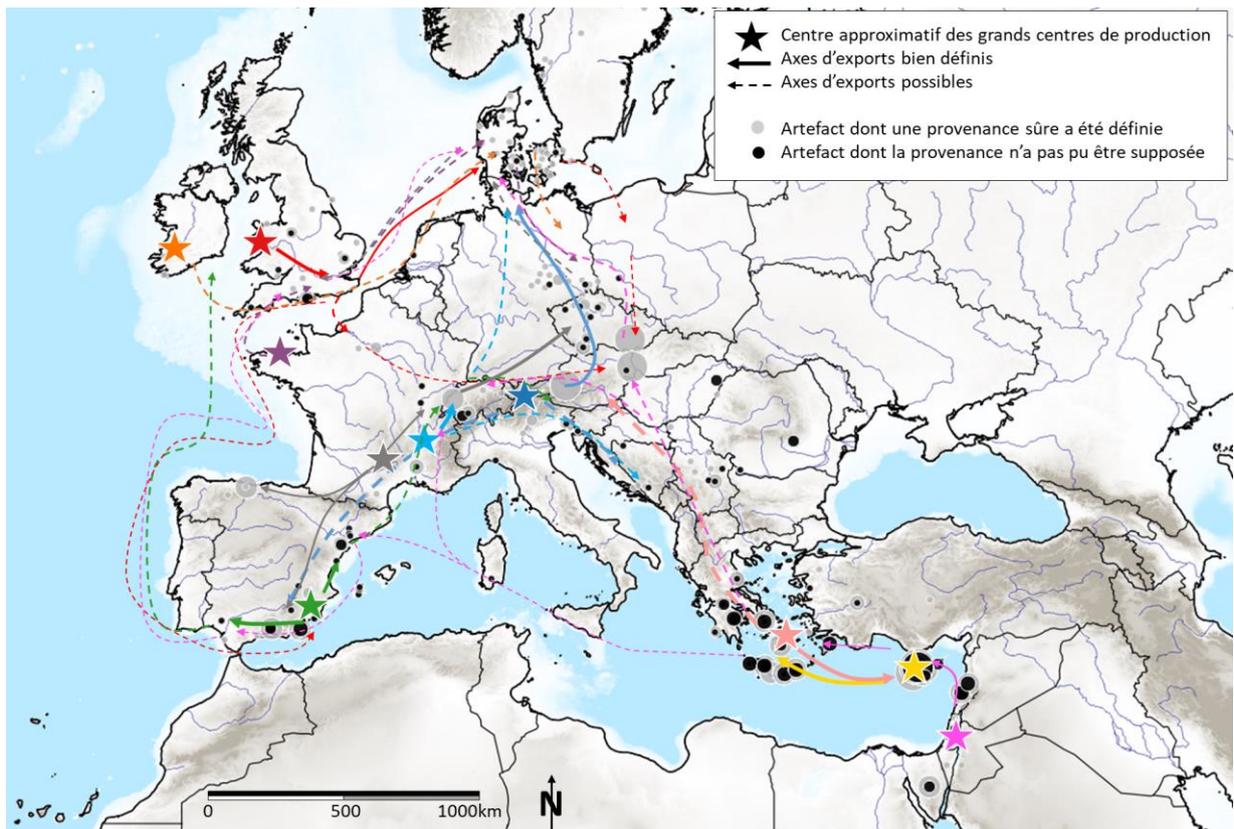


Figure 246 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 2000-1600 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.

V/4.a Des distances d'export généralement plus importantes ?

Les axes observés sont très proches de ceux mis en place au III^e millénaire av. J.-C. mais ils nous semblent beaucoup plus étendus. Cette impression due au fait que des analyses d'artefacts ont été réalisées dans de plus nombreuses régions, en particulier dans les Carpates, mais plus encore en Scandinavie. Nous ne pouvons donc pas affirmer que les productions alpines ou britanniques parcourent de plus grandes distances du fait qu'elles atteignent la Scandinavie, car nous ne pouvons pas affirmer que ce n'était pas déjà le cas au III^e millénaire av. J.-C.

Il en va de même concernant les productions du Massif central qui seraient être exportées jusqu'aux monts Métallifères. Cet export peut paraître curieux. Il ne peut pas être lié à une éventuelle similarité des signatures isotopiques entre les deux régions aux signatures très différentes (les artefacts découverts dans les monts Métallifères ne sont clairement pas de source locale). La composition des artefacts des monts Métallifères indique qu'ils proviennent de la fonte de cuivres gris (Niederschlag *et al.*, 2003) ce qui est compatible avec une origine du Massif central. Un autre indice en faveur d'une provenance du Massif central réside dans les typologies d'artefacts : des billes biconiques massives possèdent des typologies semblables dans le Massif central et en Bohême (voir notamment la synthèse de Cattin *et al.*, 2009).

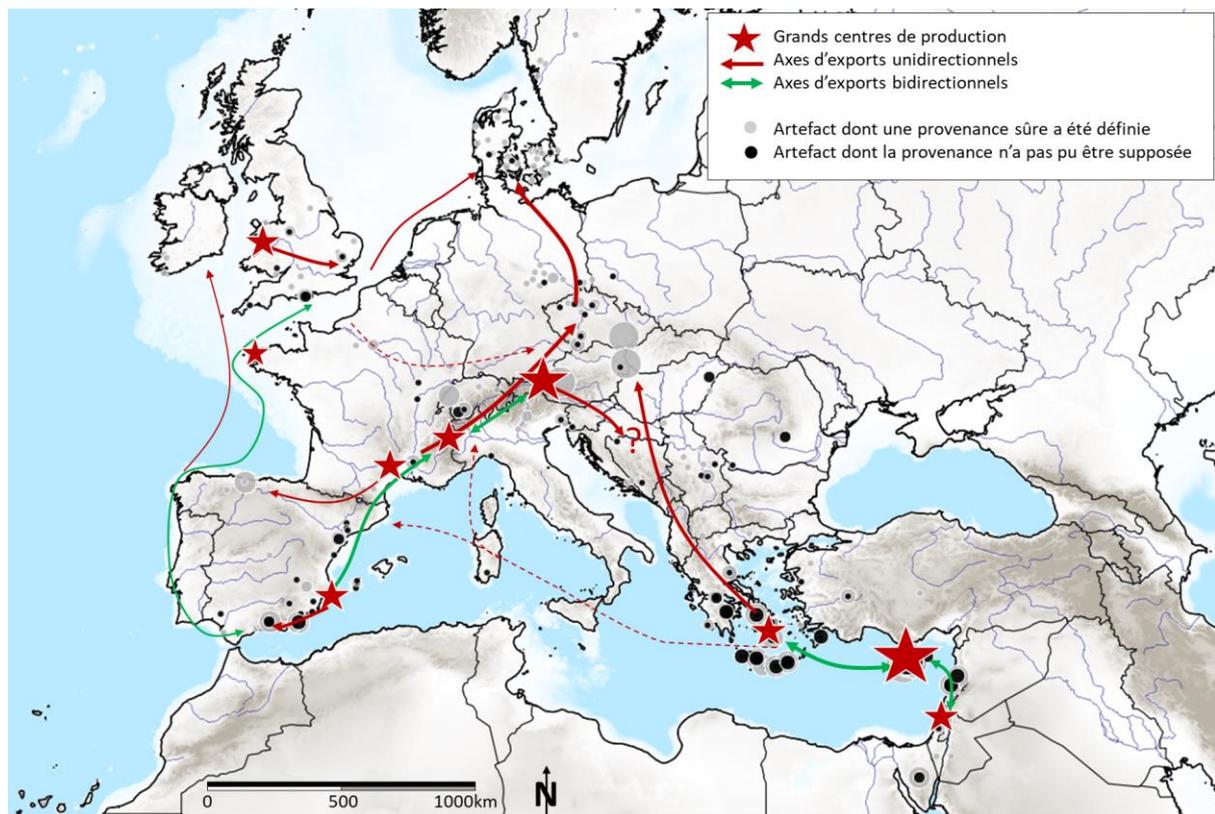
V/4.b Des axes d'échange du cuivre hérités du III^e millénaire av. J.-C.

S'il n'est pas aisé de définir si les distances parcourues par les productions cuprifères sont plus importantes au début de l'âge du Bronze, il est en revanche certain que les circuits qu'elles empruntent sont majoritairement hérités du III^e millénaire av. J.-C. (Figure 247).

L'axe bidirectionnel « Alpes de l'ouest-Massif central-péninsule Ibérique » précédemment identifié présente la caractéristique d'atteindre clairement les Alpes de l'est et pourrait être renommé « Alpes-péninsule Ibérique ».

L'axe « Balkans-Egée-Chypre/Levant » se retrouve sous la forme d'un axe « Egée-Chypre/Levant ». Les productions issues de cet axe atteignent toujours les Balkans (et même les Carpates), mais cette fois selon un axe unidirectionnel. Cet axe ne semble pas se connecter à l'axe issu des Alpes de l'est, dont les exportations semblent encore cesser quelque part dans le nord des Balkans (actuelle Bosnie).

Le plomb produit dans le monde égéen³⁶⁹ pourrait emprunter les mêmes grands couloirs d'export que le cuivre. Le fait que le plomb égéen se trace jusqu'en Anatolie centrale indiquerait que le cuivre pourrait également y être exporté. L'axe « Egée-Chypre/Levant » pourrait donc devenir un axe « Égée/Anatolie-Chypre/Levant ».



³⁶⁹ Ce dernier est très majoritairement issu des mines du Laurion bien que quelques artefacts pourraient provenir de plomb issu des Cyclades.

Le grand axe de haute mer en Méditerranée est à nouveau difficile à confirmer, car il repose uniquement sur la correspondance de rares artefacts ibériques avec les signatures des gisements du Levant.

Un axe atlantique pourrait, perdurer, mais seule une analyse approfondie d'artefacts découverts au Portugal ou encore en France permettrait de mettre (ou non) en lumière un tel axe. Le fait d'avoir identifié de rares artefacts en cuivre gallois en péninsule Ibérique et des artefacts en cuivre ibérique dans les îles Britanniques permet de supposer que cet axe était bidirectionnel. Cette hypothèse est appuyée par les provenances supposées des artefacts en plomb : les productions du Pays de Galles ont été exportées dans l'ensemble de l'Angleterre et pourraient atteindre les Asturies.

L'Atlantique pourrait éventuellement constituer une porte d'entrée vers la Manche puis la mer du Nord où des exportations vers la Scandinavie semblent clairement se produire, formant un grand axe « Manche-Scandinavie » par lequel pourraient également transiter de rares productions du Massif armoricain. La Manche ou encore l'estuaire de la Seine pourrait également être un point d'entrée vers le bassin parisien et le sud de l'Allemagne actuelle. Cette hypothèse est compatible avec l'existence d'une culture commune de part et d'autre de la Manche au Bronze ancien et moyen (Marcigny et Talon, 2009). Dans ce cas encore, trop peu de données isotopiques permettent de supposer l'existence de cet axe au III^e millénaire av. J.-C. Cependant, Cottiaux *et al.* (2014) indiquent que des perles en tôle de cuivre néolithique du IV^e et du début du III^e millénaire de même typologie ont été mises au jour dans le bassin de la Seine, en Scandinavie méridionale, en Pologne, en Allemagne du Nord et aux Pays-Bas, indiquant des contacts importants entre ces régions.

Un autre couloir d'échange, de faible envergure, pourrait propager du cuivre du Massif central vers les Pyrénées et les Asturies.

Enfin, un dernier axe unidirectionnel témoigne du transport d'importantes quantités de productions alpines vers la Scandinavie. La répartition des artefacts analysés indique que cet axe traverse une partie de l'Europe centrale. Or, cette zone (Tchéquie/sud de l'Allemagne) a été étudiée par Kuijpers et Popa (2021) qui y mettent en évidence une standardisation du poids des bracelets, des lingots et des épées³⁷⁰. Les auteurs interprètent cette standardisation comme le témoin de l'apparition d'un système de poids. Ceci serait un bon indice de l'accroissement des échanges commerciaux, mais aussi potentiellement d'un contrôle accru des élites sur les échanges, au moins dans ce secteur.

V/4.c Apport des données de composition élémentaires

Les grandes bases de données et les grands groupes de composition élémentaires qui en découlent permettent de confirmer l'existence de certains axes que nous proposons via l'isotopie du plomb.

Si peu d'analyses isotopiques d'artefacts permettent de confirmer l'existence d'un axe atlantique, les analyses en composition élémentaires permettent d'en dessiner les contours. En effet, des regroupements statistiques de composition d'artefacts entrepris par Bray *et al.* (2015) suggèrent un transport de ce métal par la côte atlantique depuis l'Espagne vers la France et la Grande-Bretagne (Figure 248).

³⁷⁰ Cette analyse se base sur la comparaison de plus de 5000 artefacts.

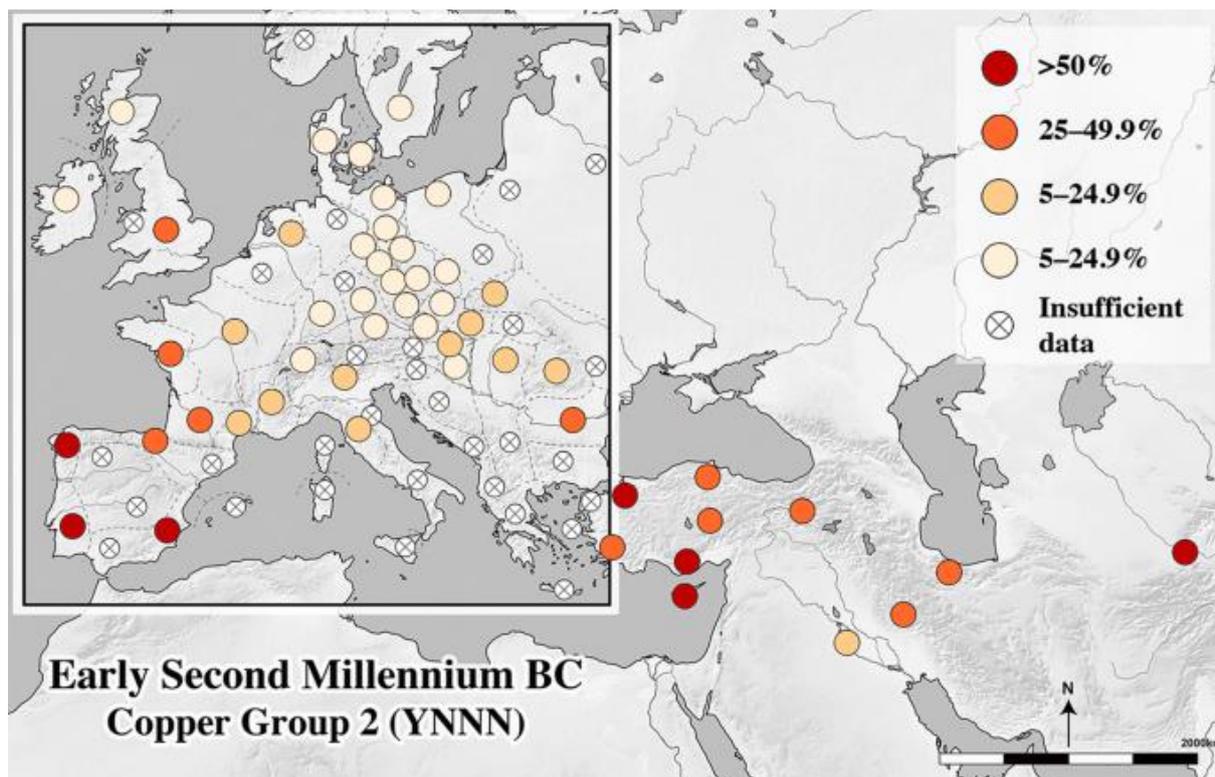


Figure 248 : Distribution spatiale du cuivre dit de groupe 2 ($As > 0.1\%$, $Sb, Ni, et Ag < 0.1\%$) au début du II^e millénaire av. J.-C. Source : Bray *et al.* (2015).

Si ces hypothèses sont exactes, le second cluster identifié par Bray *et al.* (2015) (centré sur Chypre) confirmerait l'existence de l'axe « Égée/Anatolie-Chypre/Levant » et montrerait que cet axe atteint la frontière actuelle entre la Bulgarie et la Roumanie (nous ne disposons pas de signatures isotopiques d'artefacts dans ce secteur).

Enfin, les artefacts d'Europe centrale (Figure 249) se distinguent chimiquement des artefacts d'Europe de l'Ouest par la présence d'argent dans des teneurs $> 0,1\%$. Nous proposons que les teneurs en argent puissent confirmer des provenances alpines (résultant de l'interprétation des analyses isotopiques), car des cuivres gris (soit des minéraux riches en argent) sont exploités à cette période dans les Alpes (cf partie 1 IV/2.e).

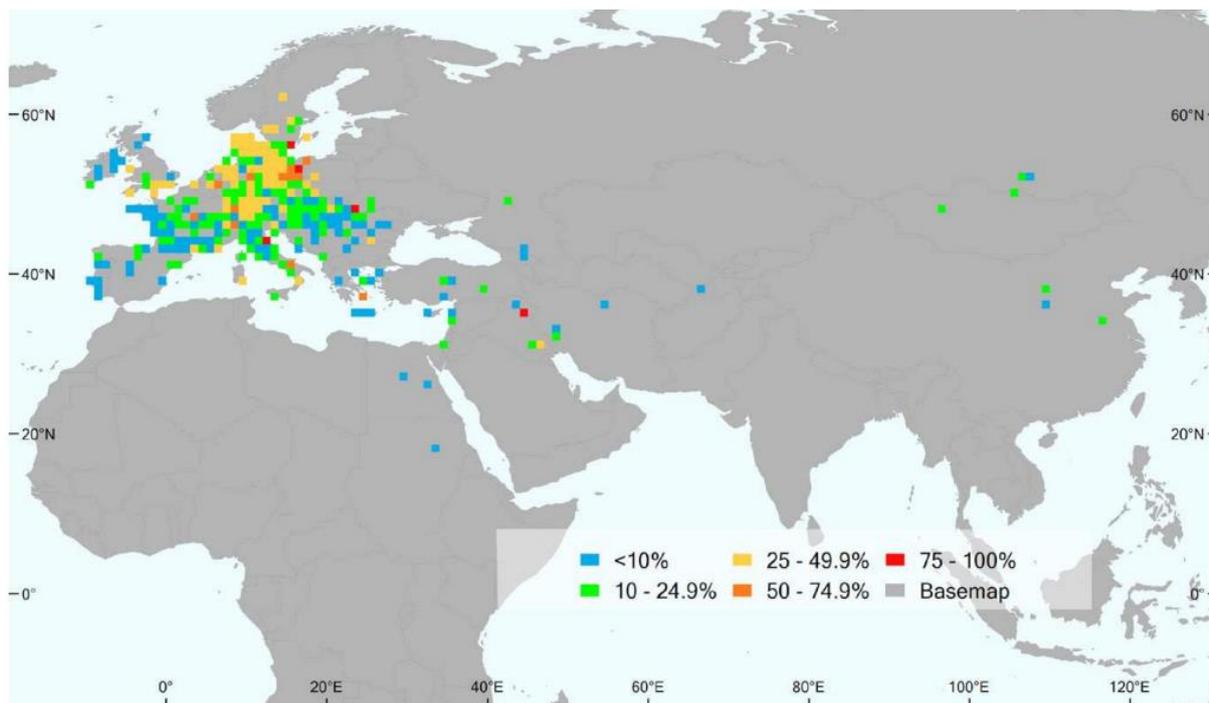


Figure 249 : Distribution spatiale du cuivre du groupe 16 (As, Sb, Ni, et Ag > 0.1 %) au début du II^e millénaire av. J.-C. Source : Pollard, 2018 p.103 (à partir de la base de données FLAME (Perucchetti et al., 2021)).

V/4.d Les échanges de biens exotiques : un moteur (ou une conséquence ?) de la mise en place des réseaux d'échanges

Les élites de l'âge du Bronze ont certainement joué un rôle important dans la mise en place d'échanges entre sociétés distantes. La circulation de biens de prestige est un témoin archéologique des alliances et des échanges commerciaux.

Une Europe de l'Ouest et du Nord fortement interconnectée ? Exemple de l'ambre scandinave.

Ces dix dernières années, le nombre d'études portant sur la Scandinavie a connu une croissance exponentielle. De nombreuses théories ont cherché à comprendre pourquoi cette région possède de si fortes connexions avec le reste de l'Europe. Historiquement, les auteurs s'accordaient sur le fait que cette région exportait de l'ambre contre d'autres biens. La valeur (économique, mais aussi culturelle et/ou spirituelle) de l'ambre était sans nul doute très importante³⁷¹.

Les grandes voies d'échanges unidirectionnelles que nous avons proposées pour le cuivre étaient donc certainement des voies bidirectionnelles, car elles propageaient au moins de l'ambre³⁷² vers le reste de l'Europe comme en témoignent les nombreuses découvertes d'ambre de la Baltique en Europe (Meller, 2017 ; Nørgaard et al., 2019).

³⁷¹ La volonté de se fournir en ambre a donc peut-être constitué un moteur d'interconnexion en Europe tout comme l'a été le jade auparavant.

³⁷² Ces exports d'ambre, probablement accompagnés d'autres ressources (telles que des armes, des guerriers ou même de la laine) expliqueraient l'importance des axes se dirigeant vers cette région.

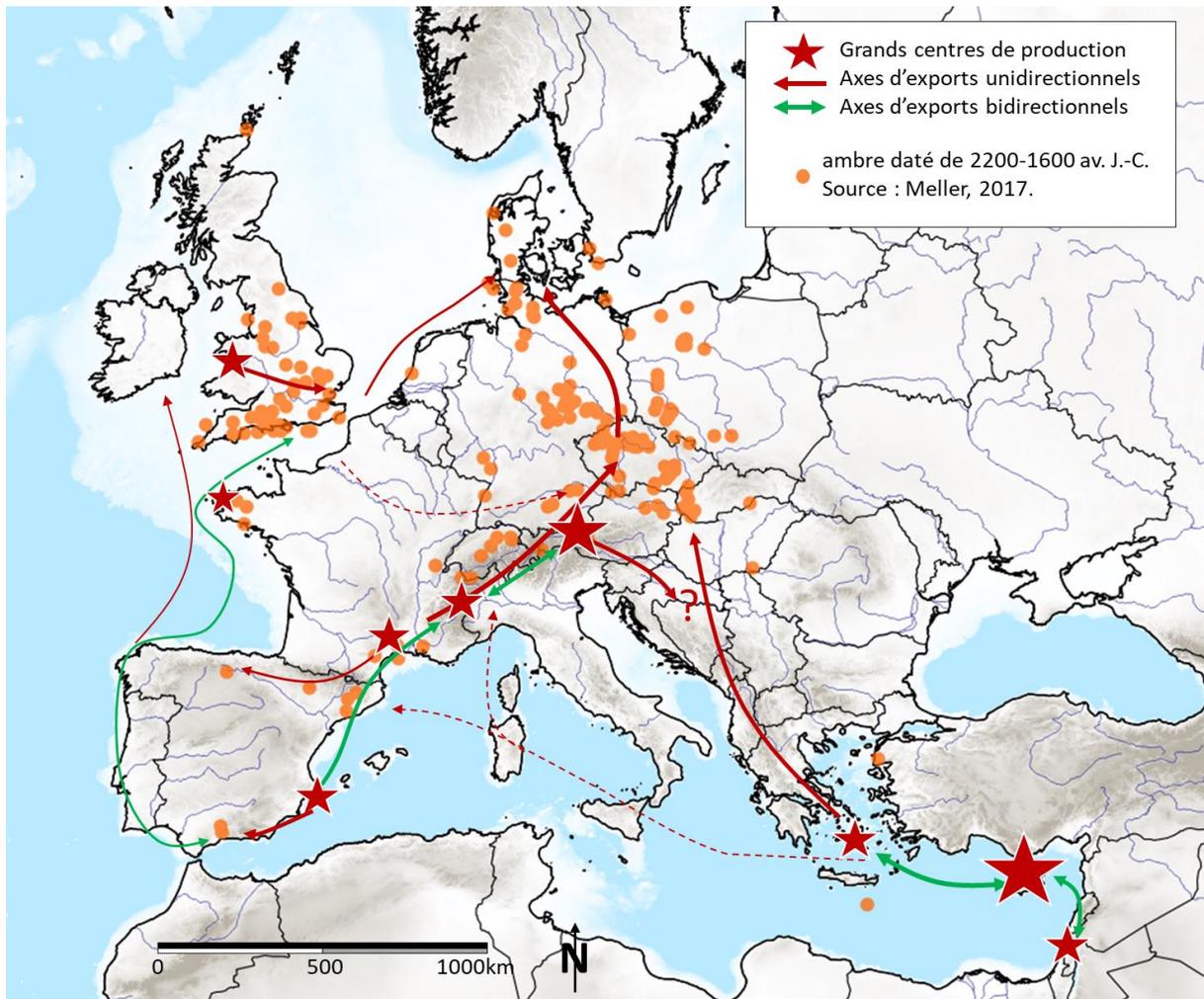


Figure 250 : Répartition des découvertes d'ambre européen de l'âge du Bronze ancien (ici 2200-1600 av. J.-C.) d'après Meller (2017) et synthèse des axes d'échange du cuivre précédemment supposés.

Ces analyses de la diffusion de l'ambre à l'échelle européenne permettent d'appuyer nos hypothèses : l'export d'ambre (Figure 250) semble suivre les mêmes grands axes « Manche-Scandinavie » et « Alpes-Scandinavie »³⁷³. Au Bronze ancien, les faibles échanges vers l'est de la Méditerranée semblent refléter la rupture de contact précédemment identifiée dans le secteur de l'actuelle Bosnie. En revanche, une faible proportion d'ambre atteint la péninsule Ibérique (probablement en suivant l'axe atlantique et l'axe bidirectionnel « Alpes-péninsule Ibérique »).

Ling *et al.* (2013) estiment que les routes reliant la Scandinavie au reste de l'Europe seraient en place dès l'émergence de l'âge du Bronze en Scandinavie soit vers 1800 av. J.-C. Ils tracent des axes d'importations (Figure 231) qui ne sont basés que sur l'étude des artefacts scandinaves et la présence d'ambre aux abords des grands districts miniers producteurs de cuivre mais n'incluent pas d'analyses d'artefacts découverts en dehors de cette zone d'étude.

³⁷³ Ils empruntent toutefois (et logiquement) les couloirs d'échange en sens inverse du cuivre.

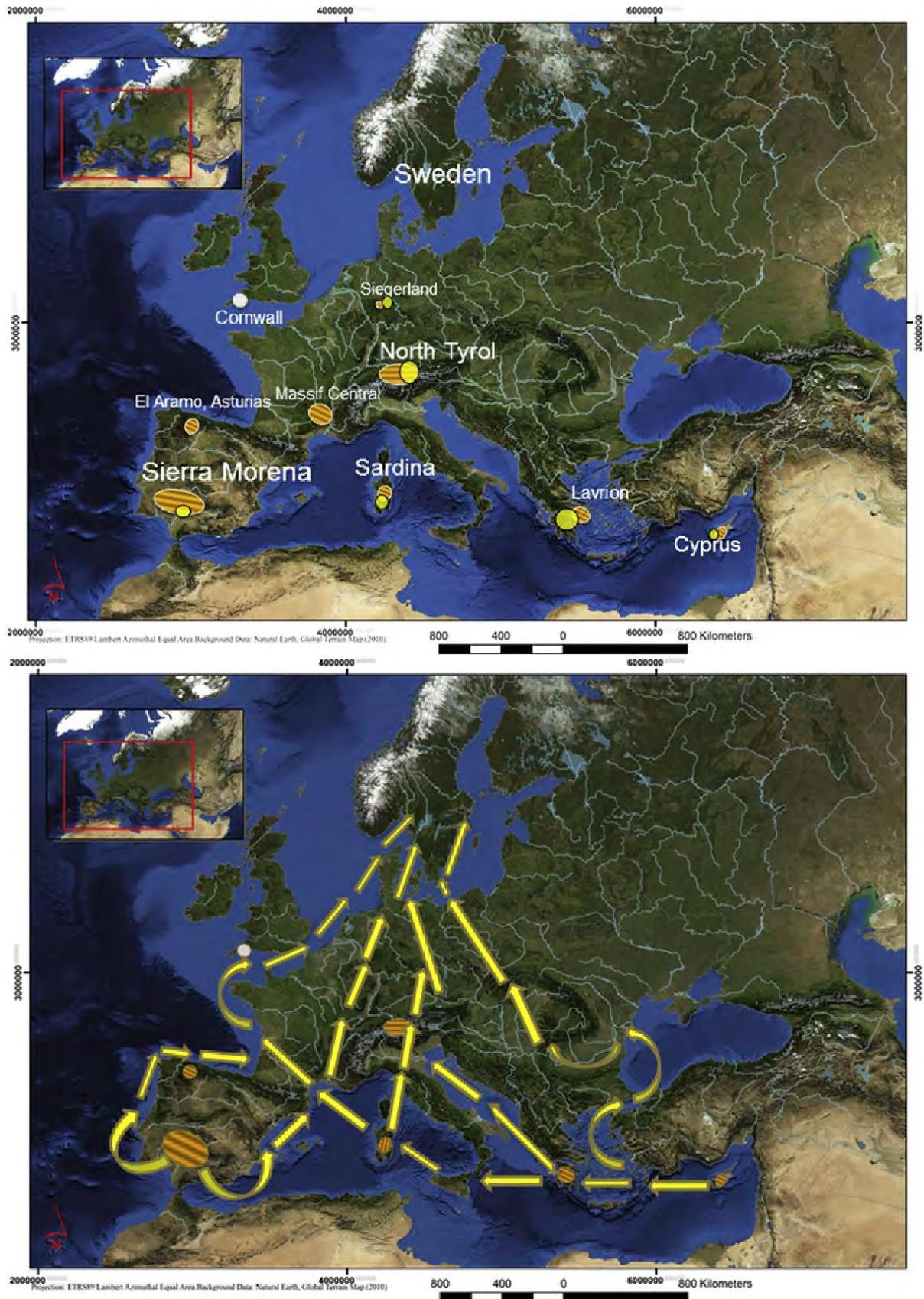


Figure 251 : Carte du haut : régions minières où des objets en ambre de la baltique ont été découverts ; carte du bas : Routes de commerce par lesquelles transiteraient du cuivre et de l'ambre. Source : Ling et al., 2013.

Les axes tracés par Ling *et al.* (2013) sont assez proches de ceux que nous proposons mais ils suggèrent l'existence de plusieurs axes continentaux partant vers le nord (dans l'hypothèse d'un trajet le plus court possible). Ceci semble tout à fait probable, mais nous ne pouvons pas le confirmer en l'absence d'analyses d'artefacts en quantité suffisante en France et en Allemagne.

Une seconde différence entre les cartes de Ling *et al.* (2013) et les nôtres réside (outre la manière dont elles ont été construites), dans la présence de connexions établies entre l'Europe de l'Ouest et l'Europe du sud-est. Nous ne pouvons que difficilement supposer l'existence de tels axes, tant peu d'analyses d'artefacts permettent de supposer des échanges est-ouest en Méditerranée.

En opposition avec les interprétations de Ling *et al.* (2013) et, de par l'interprétation que nous faisons des signatures isotopiques du plomb, des cartes de répartition de l'ambre et des cartes de répartition des compositions élémentaires, nous formulons plutôt l'hypothèse d'une Europe scindée en trois avec des échanges ouest-est peu marqués (contrairement à ce qui fut le cas au début du Chalcolithique). Selon nous, la façade atlantique, le centre de l'Europe et le sud-est de la Méditerranée formeraient trois grandes zones d'échanges distinctes, qui n'échangeraient que peu entre elles trois.

Une Europe de l'Ouest et du Nord peu connectée avec l'Europe du Sud-Est et le Proche-Orient ?

Nos résultats montrent que peu de cuivre d'origine chypriote et du Levant peut être identifié dans les artefacts découverts en Europe de l'Ouest.

La possible présence de cuivre issu de l'est de la Méditerranée en Europe de l'Ouest nous interroge d'autant plus qu'elle ne se marque quasiment pas auparavant. De plus, et de manière tout aussi suspecte, 9 des 23 artefacts en cuivre (soit 40 %) de provenance supposée fiable (« ok ») présentant une provenance du métal du sud-est de la Méditerranée, mais découverts en Europe de l'Ouest n'ont pas une typologie exotique. Ils correspondent majoritairement à des haches à rebords et très peu d'artefacts sont des lingots et des biens de prestige (Figure 252).

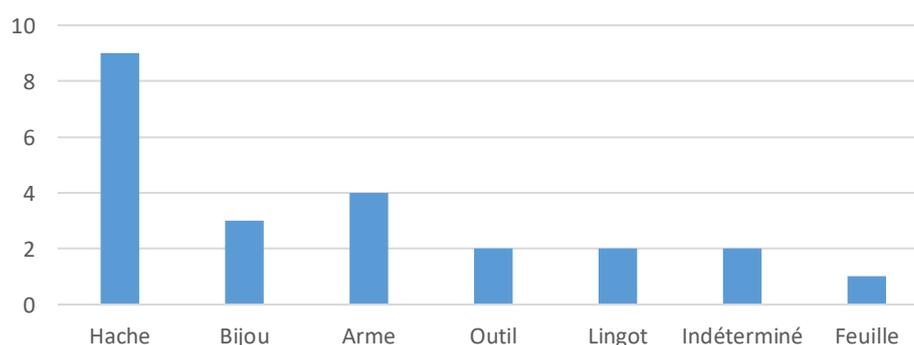


Figure 252 : Types d'artefacts contenant du cuivre chypriote, d'Abu Matar ou de Timna découverts à plus de 2000 km du lieu d'extraction du cuivre (soit en Angleterre, France, Portugal, Espagne, Allemagne, République tchèque, Autriche, Suisse, Suède et au Danemark).

Si ces attributions sont fiables alors (i) soit le cuivre est échangé sous forme de lingots fondus dans les régions de consommation pour produire des artefacts aux typologies locales (ii) soit le cuivre a été refondu pour produire des artefacts de typologies locales³⁷⁴.

Contrairement au modèle classiquement admis de connexions est-ouest par la Méditerranée, le faible nombre de découvertes d'artefacts contenant du cuivre extrait dans l'Est méditerranéen que nous percevons en Europe de l'Ouest pourrait témoigner que ces échanges n'impliquent que très faibles quantités de métal.

Proposer une cette scission ouest-est des échanges méditerranéens serait également cohérent avec contours des grands complexes culturels (voir notamment la synthèse de Funari (1998 p.15-29)). En effet, seuls peu d'échanges culturels et de population lieraient l'Europe de l'Ouest et du sud-est (alors que les populations d'Europe centrale et de l'Ouest seraient liées par de forts liens culturels et donc potentiellement commerciaux).

V/5 1600-1300 av. J.-C. Bronze moyen

La période 1600-1300 av. J.-C. est également relativement bien couverte spatialement et de nombreux artefacts en cuivre ont été analysés à l'échelle de l'Europe. Contrairement aux périodes précédentes, les artefacts plombifères sont beaucoup plus nombreux à avoir été analysés, ce qui permet une comparaison des grands couloirs d'échanges empruntés par les productions de cuivre et de plomb.

V/5.a Des axes d'échange peu modifiés ?

Nous constatons en premier lieu que les principales régions productrices de cuivre et les axes d'export du cuivre ne varient que très peu entre 2000-1600 av. J.-C. et 1600-1300 av. J.-C. (Figure 253). Cette constatation n'aurait pas pu être faite par la seule observation des cartes de répartition des mines qui montre une organisation en grands centres miniers tranchant avec un important nombre d'exploitations éparpillées en Europe entre 2000-1600 av. J.-C.

Nous pouvons en conclure que les districts miniers ne se sont pas développés du fait de l'apparition de nouveaux axes d'échange, mais que ces derniers tirent profit des axes préexistants. En effet, les grandes zones minières que nous avons identifiées en partie 1 (cf IV/2.f) correspondent à des points de contact entre plusieurs axes d'échange : Chypre, les Alpes de l'est, la péninsule Ibérique et le Pays de Galles. Or, ces régions fournissaient déjà en cuivre les réseaux d'échanges de la fin du Chalcolithique/Néolithique et du début de l'âge du Bronze.

³⁷⁴ Dans ces cas précis, les artefacts conservant leur signature, les recyclages impliqueraient un lot d'artefacts contenant du cuivre de même provenance, ce qui semble peu probable : l'hypothèse de fontes locales de lingots chypriotes semble donc plus juste.

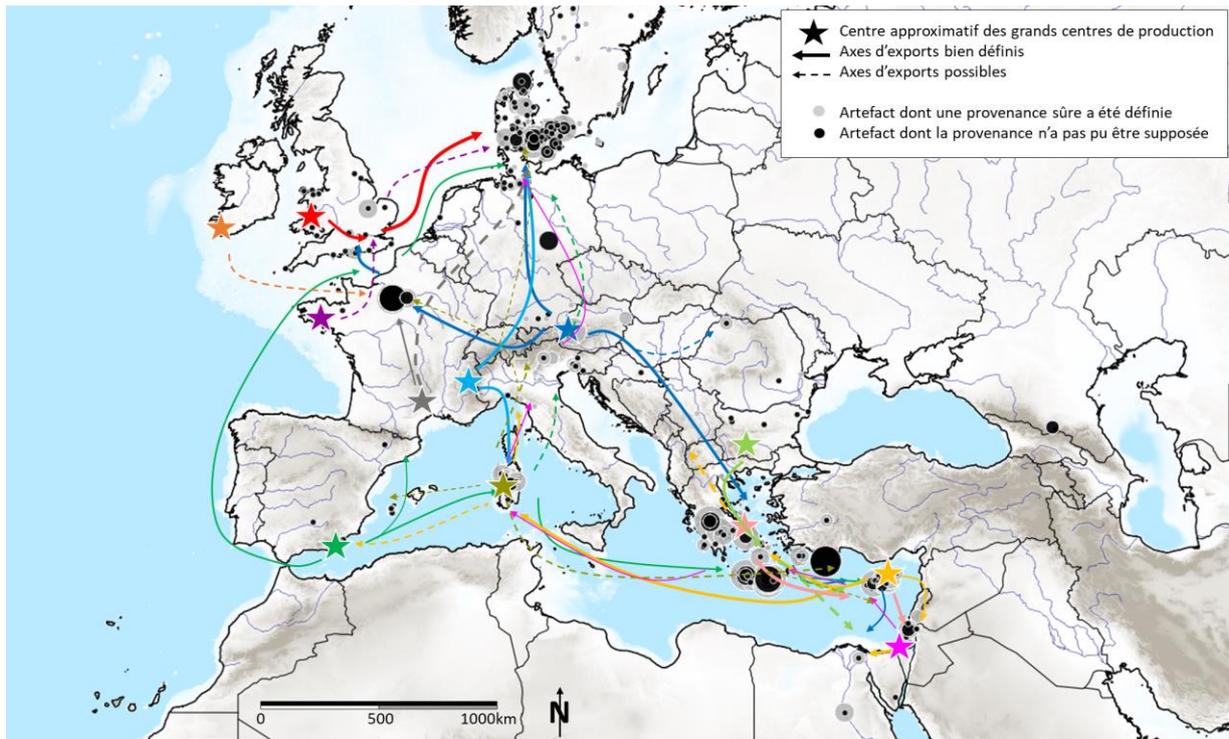


Figure 253 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 1600-1300 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.

Des différences existent cependant : il y aurait bien eu une modification des axes d'échange à partir de 1600 av. J.-C. comme les variations de production de cuivre nous l'ont laissé supposer (cf V/3.a).

Les productions alpines sont exportées sur des distances beaucoup plus importantes que précédemment, mais toujours le long des axes « Alpes-Scandinavie » et « Egée-Alpes ». Néanmoins, nous pouvons noter que la direction des exports de cuivre dans l'axe « Egée-Alpes » s'est inversée par rapport à précédemment : du cuivre produit égéen ne remonte plus vers les Alpes et c'est désormais du cuivre produit dans les Alpes qui est exporté en Égée³⁷⁵. L'axe pourrait donc être renommé « Alpes-Egée ».

De plus, contrairement à la période précédente, un axe « Manche/Seine » avec une ouverture sur l'axe atlantique est clairement visible et semble emprunté par les productions alpines, mais aussi par les productions des îles Britanniques (et peut-être du Massif armoricain) qui prennent encore clairement la direction de la Scandinavie le long de ce grand couloir d'échange.

³⁷⁵ La raison de cette inversion ne semble pas explicable dans l'état de nos connaissances. Des analyses récentes (non intégrées à notre base de données) ont également mis en avant des exports de cuivre des Alpes centrales et de l'est vers les Balkans où le cuivre local n'est plus exploité (Gavranović *et al.*, 2022)

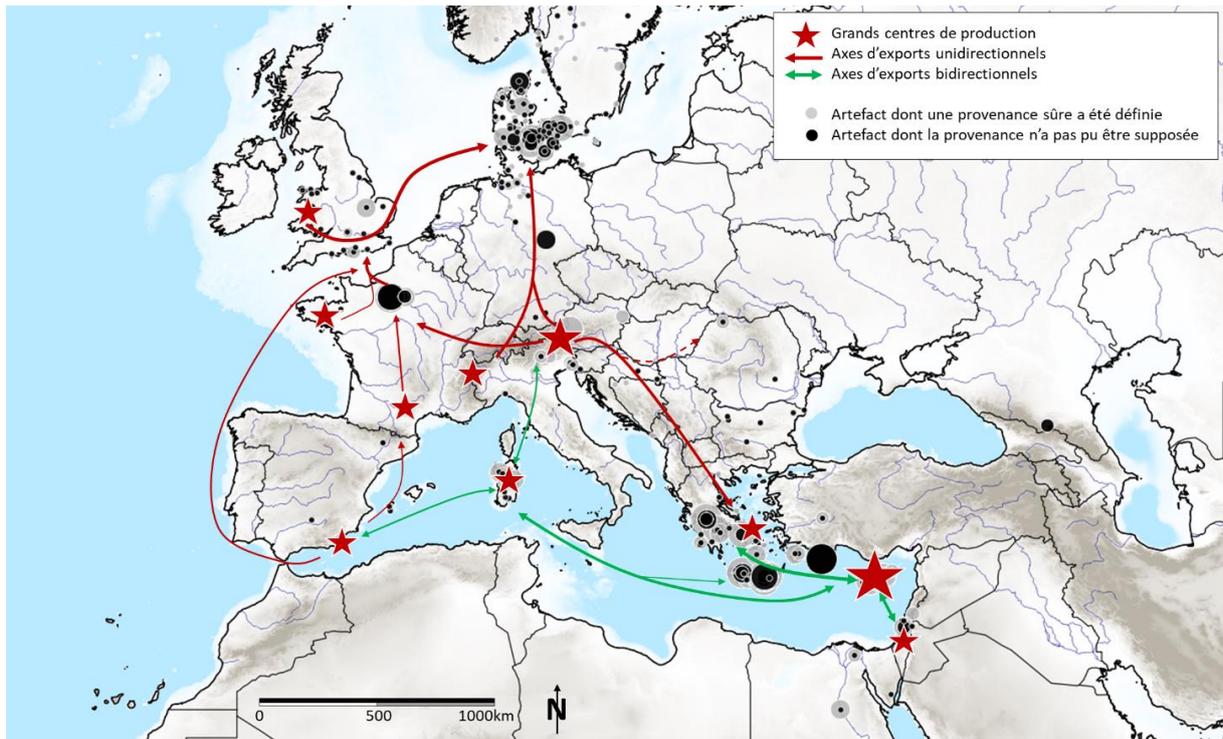


Figure 254 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour la période 1600-1300 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge. Les axes bidirectionnels sont représentés par des doubles flèches vertes.

L'axe « Manche-Scandinavie » est relié aux productions ibériques qui sont clairement tracées le long d'un axe atlantique.

L'axe côtier au nord de la Méditerranée n'est plus discernable du fait de l'absence d'analyse d'artefacts le long des côtes françaises et italiennes. Cependant, la péninsule Ibérique est reliée à l'ouest de la méditerranée par la Sardaigne le long d'un axe « ouest Méditerranée » qui constitue l'extrémité ouest du grand axe « sud Méditerranée ». La Sardaigne serait un grand carrefour d'échange, ce qu'il n'était pas clairement possible d'affirmer précédemment du fait de l'absence d'analyses d'artefacts précisément datés sur l'île. Ce grand nœud commercial pourrait inclure d'autres îles de l'ouest de la Méditerranée et en particulier la Corse où il a été trouvé des artefacts (majoritairement des biens de prestige) de typologie égéenne, chypriote, baltique et du Proche-Orient daté des Bronze moyen et final (1600-800 av. J.-C.) (Pêche-Quilichini *et al.*, 2017)³⁷⁶.

En méditerranée orientale, les échanges de l'axe « (Balkans)-Egée-Chypre/Levant » sont plus marqués que précédemment. Cette observation n'est que peu surprenante car ces grandes régions sont reliées par l'échange de biens divers (voir notamment la synthèse de Murray, 2023). De rares textes pharaoniques précisant que les Égyptiens importaient du cuivre de Chypre (Garenne-Marot, 1984) au Moyen Empire (~ 2040-1640 av. J.-C.) (Muhly, 1973 p.219 et p. 393), mais ce ne serait qu'après 1500 av. J.-C. que le commerce entre Chypre et l'Égypte serait le plus actif³⁷⁷ soit au moment où l'ensemble de ces sociétés étaient étatiques (Knapp, 1986).

³⁷⁶ Le fait que l'île exporte alors ou non des productions demeure cependant en suspens. Elle ne produit en effet déjà plus de cuivre à cette période.

³⁷⁷ Comme en témoignent les huit lettres d'El Armana (1353-1335 av. J.-C.) qui relatent des échanges entre l'Égypte et Chypre où sont mentionnés des envois d'environ 30 tonnes de cuivre depuis Chypre (Hellbing, 1979 p.42).

La présence d'un axe d'échange ou plus encore d'un grand centre d'échange en méditerranée orientale est corroborée par le nombre important de sites côtiers (Artzy, 2006) et d'épaves (Galili *et al.*, 1986), découverts le long des côtes bordant le mont Carmel en Israël. La variété des types de lingots de cuivre embarqués indiquerait que ces derniers proviendraient de régions différentes et qu'il existait une grande diversité des sources d'approvisionnement en cuivre (Yahalom-Mack *et al.*, 2014).

Le grand axe « sud-méditerranéen » dont nous avons difficilement suspecté l'existence pour la période précédente est donc désormais très net tant dans sa partie occidentale qu'orientale. Cela ne signifie pas que des quantités plus importantes de cuivre y circulaient par rapport au Bronze ancien. En effet, cet axe est clairement identifié par des signatures d'artefacts sardes dont nous ne disposons pas pour les périodes plus anciennes.

V/5.b Des exports de plomb suivant les grands couloirs d'export du cuivre

Les productions de plomb auraient également été exportées suivant le grand couloir d'échange méditerranéen (Figure 255).

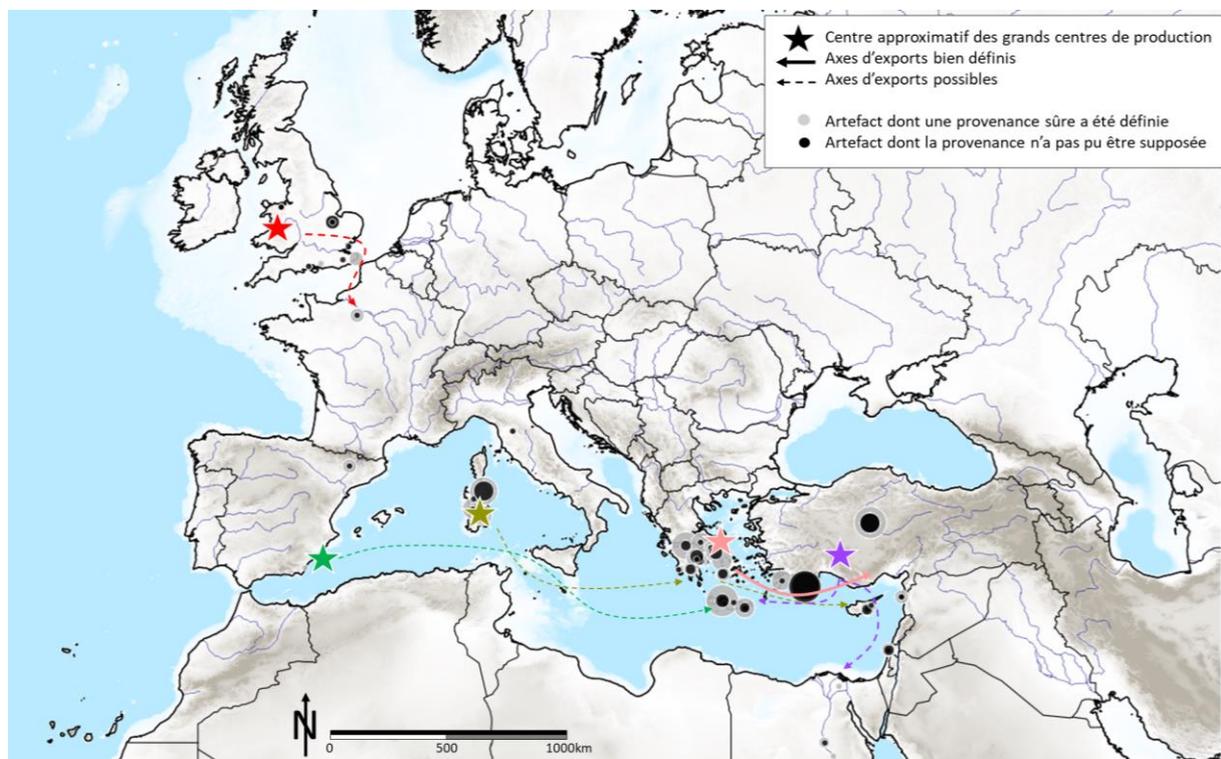


Figure 255 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 1600-1300 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.

La Sardaigne exporterait peu de cuivre et de plomb à très grande distance, mais aurait une place stratégique dans le commerce méditerranéen en tant que nœud commercial. La remarque que nous avons formulée concernant le fait que les grandes zones de productions étaient toutes localisées à l'intersection de grandes routes commerciales ne semble donc pas s'appliquer dans le cas de la Sardaigne.

V/5.c Une interdépendance accrue ?

Des régions d'Europe du Nord très fortement liées par des liens commerciaux ?

Des échanges importants continuaient de relier les îles Britanniques, la Scandinavie et les Alpes et impliqueraient encore au moins du cuivre, de l'étain et de l'ambre. Souvent décrits comme des échanges triangulaires, ces échanges ont été récemment mis en avant par Ling *et al.* (2019) pour la période 1600-1100 av. J.-C. et seraient hérités des échanges ayant débuté vers 2000 av. J.-C. (Nørgaard *et al.*, 2019).

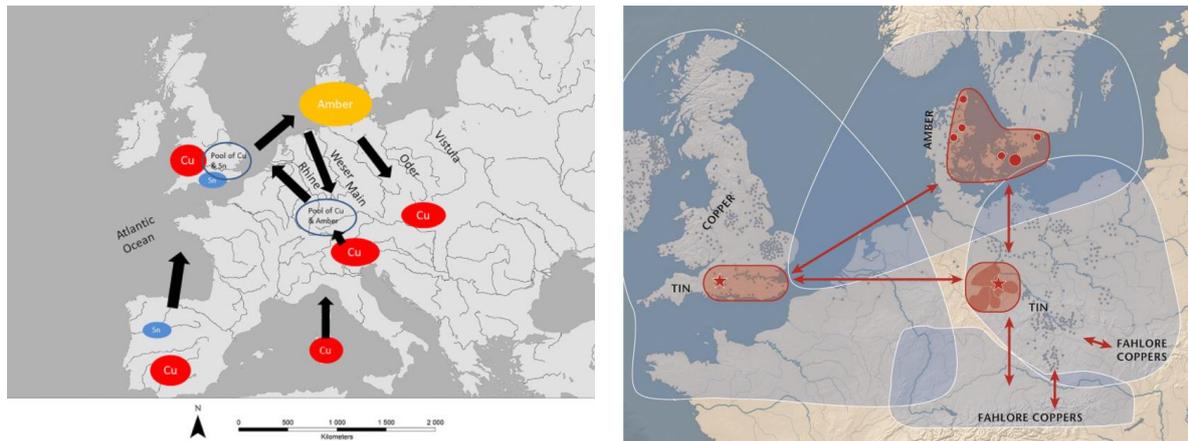


Figure 256 : Hypothèses d'échanges triangulaires : carte de gauche par Ling *et al.*, 2019 ; carte de droite par Nørgaard *et al.*, 2019.

Les échanges de matières premières seraient accompagnés d'échanges culturels comme pourraient l'indiquer de fortes correspondances typologiques de haches découvertes de part et d'autre de la mer du nord (Gandois *et al.*, 2019 ; Vandkilde, 2019). En plus de ces biens, des flux de populations circuleraient par l'Atlantique. Cela a notamment été montré par la fouille d'un établissement situé sur l'île de Thanet, à environ 25 km de Douvres³⁷⁸. L'analyse des isotopes du strontium et de l'oxygène des sépultures de Thanet montre qu'une population mixte (de personnes locales et non locales) y a vécu. Parmi les individus issus de régions distantes figurent des Scandinaves, des natifs de Grande-Bretagne, mais aussi de péninsule Ibérique (McKinley *et al.*, 2013).

Des échanges sur de plus grandes distances

Des productions exotiques circulent sur de plus grandes distances comme le témoignent par exemple les nombreux artefacts en cuivre présentant une provenance identifiée comme issue du Levant³⁷⁹ (Figure 257) ou encore de Chypre découverts en Europe de l'Ouest.

³⁷⁸ Cette île possède une position favorable de par sa position à l'entrée de la Manche et la présence d'une voie d'eau connectant le site à l'intérieur des terres anglaises (Nessel et Uhnér, 2019)

³⁷⁹ Il était déjà connu que les productions de luxe égyptiennes se diffusent largement au moins dans l'est de la Méditerranée (Peltenburg, 2007).

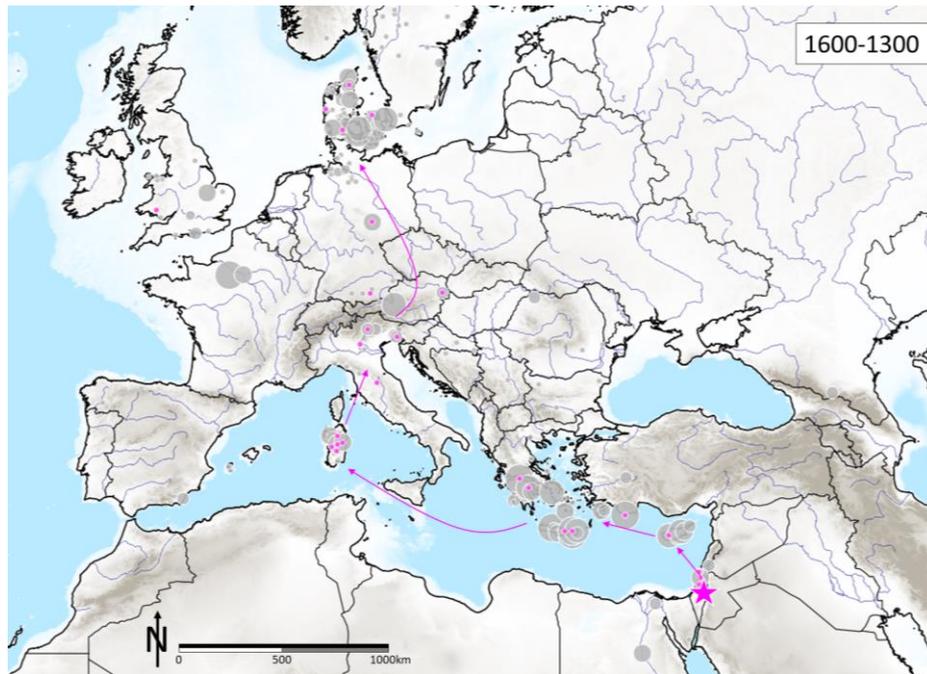


Figure 257 : Localisation des artefacts présentant une signature compatible avec les gisements du Levant pour la période 1600-1300 av. J.-C

Il en va de même pour la plupart des autres biens de prestige tels que l'ambre³⁸⁰ précédemment évoqué qui est diffusé désormais dans jusqu'en péninsule Italienne et dans le pourtour égéen (Figure 258).

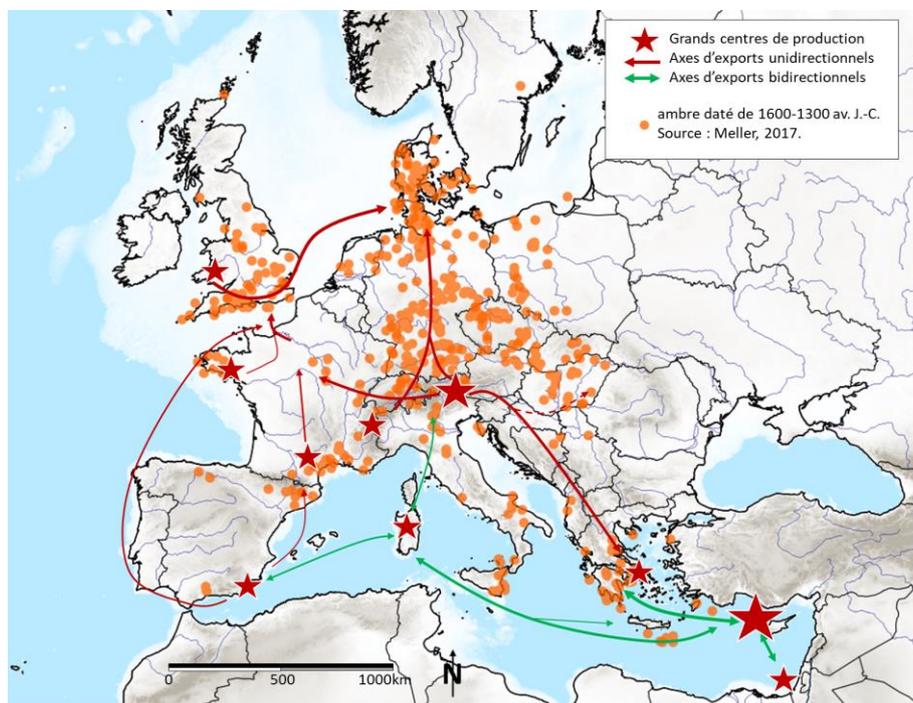


Figure 258 : Répartition des découvertes d'ambre européen de l'âge du Bronze moyen d'après Meller (2017) et synthèse des axes d'échange du cuivre précédemment supposés.

³⁸⁰ L'origine de l'ambre est souvent supposée être scandinave mais, comme résumé par Angelini et Vidale (2020), il a été prouvé que l'ensemble de l'ambre circulant à la fin de l'âge du Bronze n'est pas de source scandinave : des analyses chimiques indiquent des productions à petites échelles dans le sud de l'Italie, en péninsule Ibérique et en Roumanie (ce qui ne contredit pas que la grande majorité vienne de Scandinavie).

L'abondance de biens de prestige et de biens exotiques découverts loin de leurs zones de production indique sans nul doute la présence d'élites désireuses de posséder ces objets. La différence principale entre cette tranche d'âge et la précédente n'est alors certainement pas que commerciale : elle est aussi profondément sociétale. Le long de grandes routes commerciales déjà bien implantées circulaient des ressources précieuses témoignant d'un enrichissement d'au moins une partie des populations locales. Le moteur de l'augmentation très brutale de la production de cuivre observée à l'échelle de l'Europe repose certainement pour beaucoup dans cette dynamique d'acquisition et probablement d'alliances. Cette observation est cohérente avec les connaissances actuelles (cf I/2.a de cette partie), mais n'explique pas clairement l'apparition de grandes zones de production. L'influence des élites a probablement permis une circulation plus contrôlée des productions, ce qui expliquerait peut-être aussi la netteté des axes tracés.

V/5.d Des mélanges de sources d'approvisionnement ?

La répartition spatiale des artefacts ne présentant pas de provenance identifiable (« x » et « gris ») est complexe à définir. Dans la majorité des grands complexes culturels, il y a de nombreuses provenances non identifiées (Figure 259) et seul le complexe nord-alpin présente des artefacts aux provenances pouvant être supposées. Des zones de mélanges ne semblent donc pas avoir lieu aux contacts entre grands complexes culturels comme cela est parfois supposé.

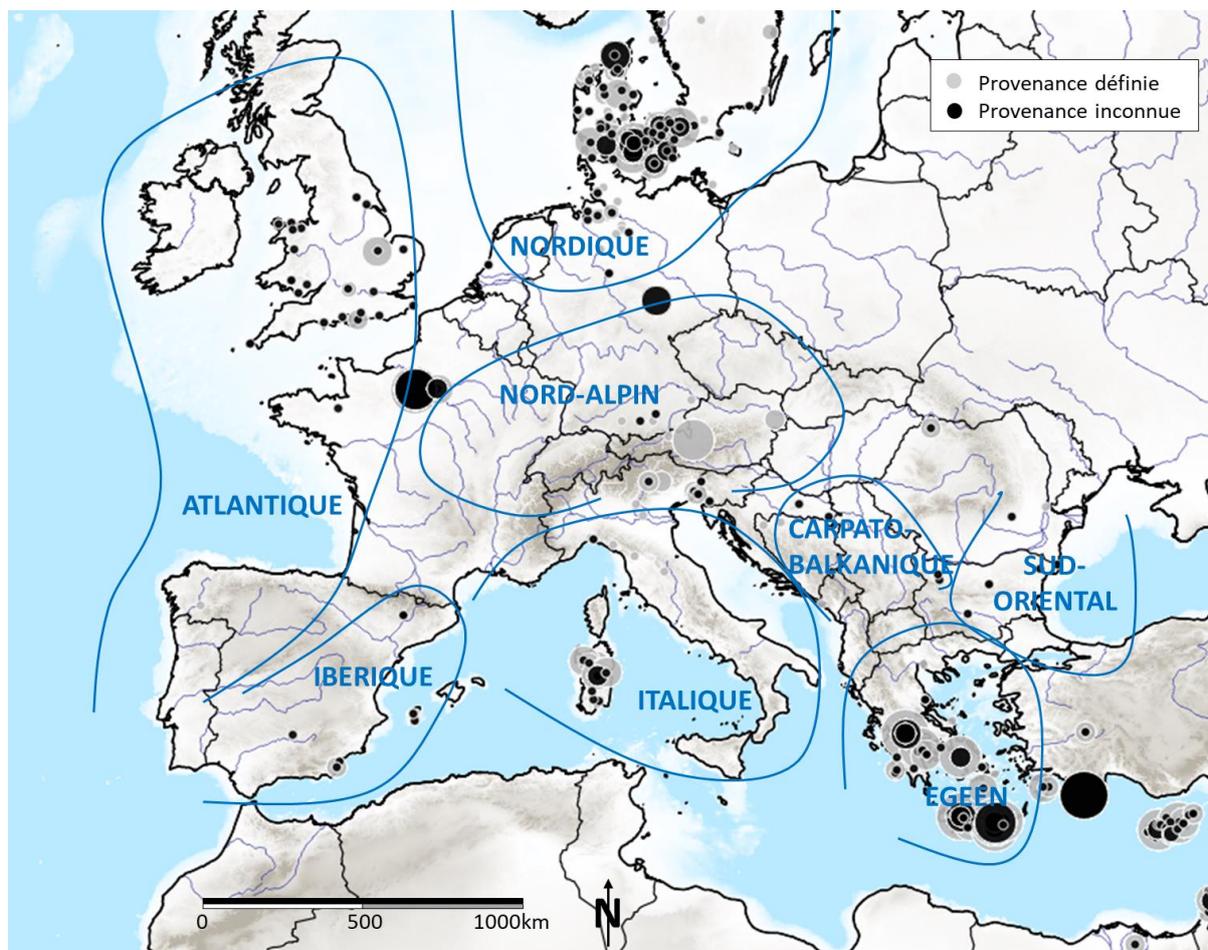


Figure 259 : Artefacts pour lesquels une provenance a pu ou non être supposée et grands complexes culturels de l'âge du Bronze tel que défini par Patrice Brun

Cependant, le tracé des axes d'export permet de montrer que la provenance des artefacts est plus complexe à tracer dans les régions alimentées par du cuivre de sources diverses : il y a en effet sensiblement plus d'artefacts aux provenances non définies (« x » et « gris ») au croisement de plusieurs axes d'exportation. Par exemple, les nombreux artefacts de Fort Harrouard (Eure-et-Loir) ne présentent pas de provenances claires (cela avait déjà été indiqué par Collin (1990) à l'origine de ces analyses). Le cuivre transitant par l'île de France pouvant provenir de péninsule Ibérique, du Massif central, des Alpes et peut-être même d'Irlande et du Massif armoricain, il est très probable que les cuivres fondus correspondaient à un mélange de cuivres issus de nombreux gisements.

Le tracé des axes d'exportation du cuivre permettrait donc d'expliquer pourquoi les provenances des artefacts alpins (et dans une moindre mesure des artefacts britanniques) sont plus aisément supposables que les signatures des artefacts égéens, chypriotes ou sardes pourtant eux aussi retrouvés proches de zones minières et dans un même contexte culturel.

V/6 1300-800 av. J.-C. Bronze final

L'une des lectures les plus claires que nous pouvons faire des résultats issus de l'analyse isotopique des artefacts concerne les exportations de cuivre pour la période 1300-800 av. J.-C. du fait du nombre très important de provenances supposées (680 soit 41 % des signatures d'artefacts).

Néanmoins, si les zones de production prises en compte sont proches de celles considérées pour la période 1300-800 av. J.-C., des différences importantes peuvent être notées concernant l'exportation des productions (Figure 260).

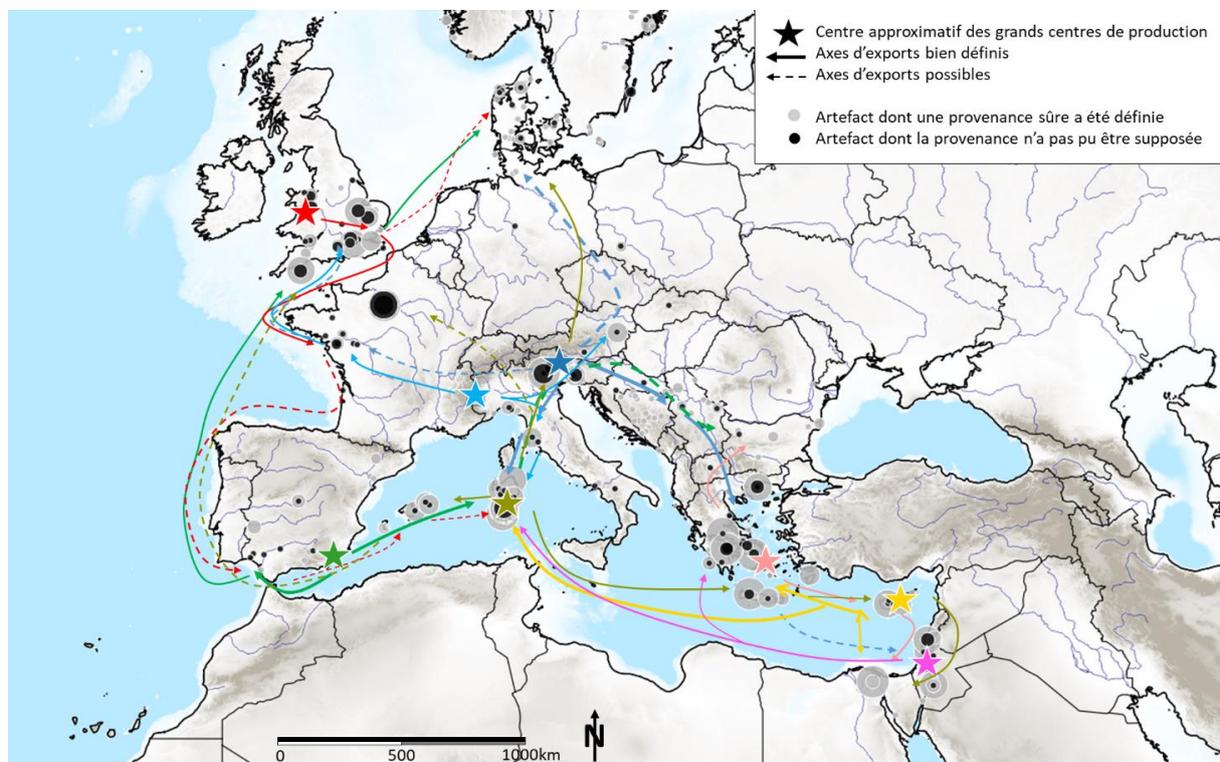


Figure 260 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 1300-800 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échanges au départ des régions minières.

V/6.a Une rupture dans l'axe « Egée-Chypre/Levant »

L'axe « Egée-Chypre/Levant » qui présentait la forme d'un commerce triangulaire semble rompu. Nous n'avons pas retrouvé de signatures isotopiques du Levant à Chypre et seulement une signature dans les Cyclades. Cet axe réduit n'inclurait donc clairement plus le Levant et pourrait être renommé « Egée-Chypre ». De même, les productions du Levant n'atteignaient plus que la Sardaigne au Bronze final alors qu'elles atteignaient clairement la Scandinavie en passant par la Sardaigne puis les Alpes au Bronze moyen.

Peu d'éléments expliquent clairement pourquoi les productions du Levant, autrefois transportées sur de grandes distances, ne le sont plus par la suite. Cela pourrait être dû aux crises économico-politiques, comme celles de 1200 av. J.-C., qui ont affecté le pourtour méditerranéen et provoqué l'effondrement des États dans cette région, interrompant ainsi les échanges commerciaux³⁸¹. Il est également possible que durant ces périodes de troubles, de nouveaux réseaux soient créés ou que des axes préexistants de faibles tonnages voient leurs échanges augmenter. Cela expliquerait pourquoi les fortes³⁸² productions du Levant s'exporteraient désormais vers d'autres destinations en Europe de l'Ouest et probablement hors Europe. Une réorganisation des échanges de métaux est en tout cas clairement visible.

V/6.b Des échanges îles Britanniques-Alpes-Scandinavie moins intenses

Les échanges de cuivre aux abords de la Manche seraient eux aussi désormais moindres. Les précédents imports de cuivre britanniques semblent décliner et l'abandon progressif des mines de cuivre dans les îles Britanniques (Irlande et Pays de Galles) pourrait peut-être s'expliquer par une diminution des échanges lointains.

Cette diminution ne paraît pas liée à une concurrence d'exports en provenance de l'axe « Alpes-Scandinavie », car cet axe semble également s'affaiblir. Des conflits pourraient néanmoins fragiliser le commerce le long de cet axe. Nous avons notamment la preuve qu'un conflit important a eu lieu dans la vallée de Tollense (nord-est de l'Allemagne) au 13^e siècle av. J.-C., comme en témoignent les 4000 dépouilles de guerriers (Jantzen *et al.*, 2011 ; Lidke et Lorenz, 2019) venus de Pologne ou encore des Pays-Bas (Price *et al.*, 2019 a et b)³⁸³. La diminution des exportations le long de cet axe pourrait donc être liée à des troubles militaires.

Une crise politique et commerciale pourrait ainsi impacter les échanges entre les îles Britanniques, la Scandinavie et les Alpes. Elle expliquerait le déclin des îles Britanniques, mais aurait moindrement affaibli les productions alpines de cuivre, cela peut-être, car les Alpes disposaient de plus de voies d'exportations : elles exportaient vers plus de régions que les îles Britanniques (vers les Balkans et l'Égée d'une part et vers la Sardaigne d'autre part).

³⁸¹ L'effondrement ne serait que partiel. Il concerne les États et affecte donc les relations politiques qui les lient mais toucherait cependant moins fortement les régions ne présentant pas ce mode d'organisation : toutes les régions de l'est de la Méditerranée ne sont pas étatiques (Middleton, 2020).

³⁸² Le grand district de Timna est notamment à son apogée entre 900 et 1100 av. J.-C. (Ben-Yosef *et al.*, 2012).

³⁸³ Le statut de guerrier de ces individus a été confirmé par des acquisitions en trois dimensions des ossements qui ont permis de déterminer qu'un tiers des individus eux présentaient des traces de blessure en voie de guérison, probablement liés à de précédentes batailles (Brinker *et al.*, 2018). L'origine des guerriers a pu être déterminée par l'analyse du strontium et de l'oxygène de leurs dents.

Les connexions de l'axe atlantique reliant le sud-est de la péninsule Ibérique et l'Angleterre ont clairement perduré et une partie des productions de cuivre ibériques pourraient avoir atteint la Scandinavie. Il en est de même pour l'axe « Manche/Seine » reliant les productions alpines aux îles Britanniques dont le tracé semble encore assez net.

V/6.c Des régions d'exports de cuivre alpins et Ibériques assez constants et une augmentation des exports sardes ?

Les trois axes unidirectionnels au départ des gisements alpins observés au Bronze final semblent correspondre à un héritage du Bronze ancien où ils sont déjà très nettement marqués :

- Axe « Alpes-Scandinavie » (en déclin ?) vers le nord ;
- Axe « Alpes-Balkans-Égéen » vers le sud-ouest ;
- Axe « Alpes-Atlantique » vers l'ouest qui, contrairement à la période précédente, semble impliquer davantage de productions de l'ouest des Alpes.

Les exports de cuivre ibériques semblent encore suivre l'axe « Atlantique » et « ouest Méditerranée ».

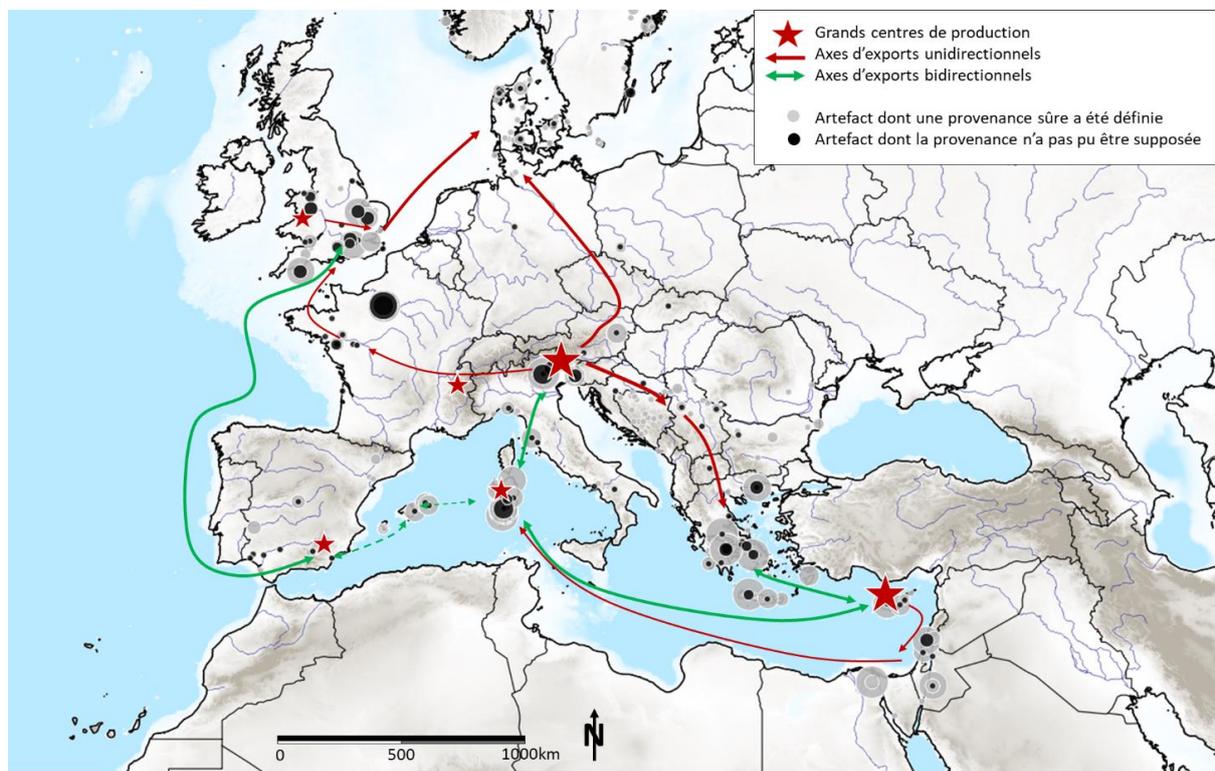


Figure 261 : Carte interprétée des principaux axes d'échange du cuivre précédemment définis pour la période 1300-800 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge. Les axes bidirectionnels sont représentés par des doubles flèches vertes.

La Sardaigne dont nous avons précédemment souligné la place stratégique de nœud commercial semble produire et exporter beaucoup de cuivre alors que ce n'était pas le cas précédemment. Si des erreurs d'attributions d'origine du cuivre liées à des similitudes entre les signatures sardes et les signatures d'autres gisements en Europe ne sont pas à exclure, il est probable que cette région était intensément exploitée alors que seuls des ateliers de métallurgie extractive de taille très réduite ont été

découverts³⁸⁴. À ce titre, Peche-Quilichini *et al.* (2021)³⁸⁵ précisent que l'île est très riche en minerais de cuivre et de plomb-argent, mais que l'importance des phases de reprises minières successives ont probablement fait disparaître tant les scories (refondues) et que les galeries minières. Envisager des exploitations plus nombreuses que celles connues semble donc tout à fait possible.

V/6.d Axes supposés par le traçage des provenances des artefacts en plomb

L'étude des axes pouvant être supposés par les provenances obtenues pour les artefacts en plomb et cuivre-plomb (Figure 262) indique des tendances comparables au cuivre avec la présence :

- De l'axe atlantique (la connexion entre l'Angleterre et la péninsule Ibérique n'est cependant pas nette) ;
- De l'axe « est méditerranéen » reliant le monde égéen, Chypre et la Sardaigne ;
- De l'axe reliant la Sardaigne aux Alpes.

Un axe qui n'était précédemment que supposé semble clairement établi : il s'agit de celui reliant la péninsule Ibérique et la Sardaigne que nous pourrions dénommer axe « ouest méditerranéen ».

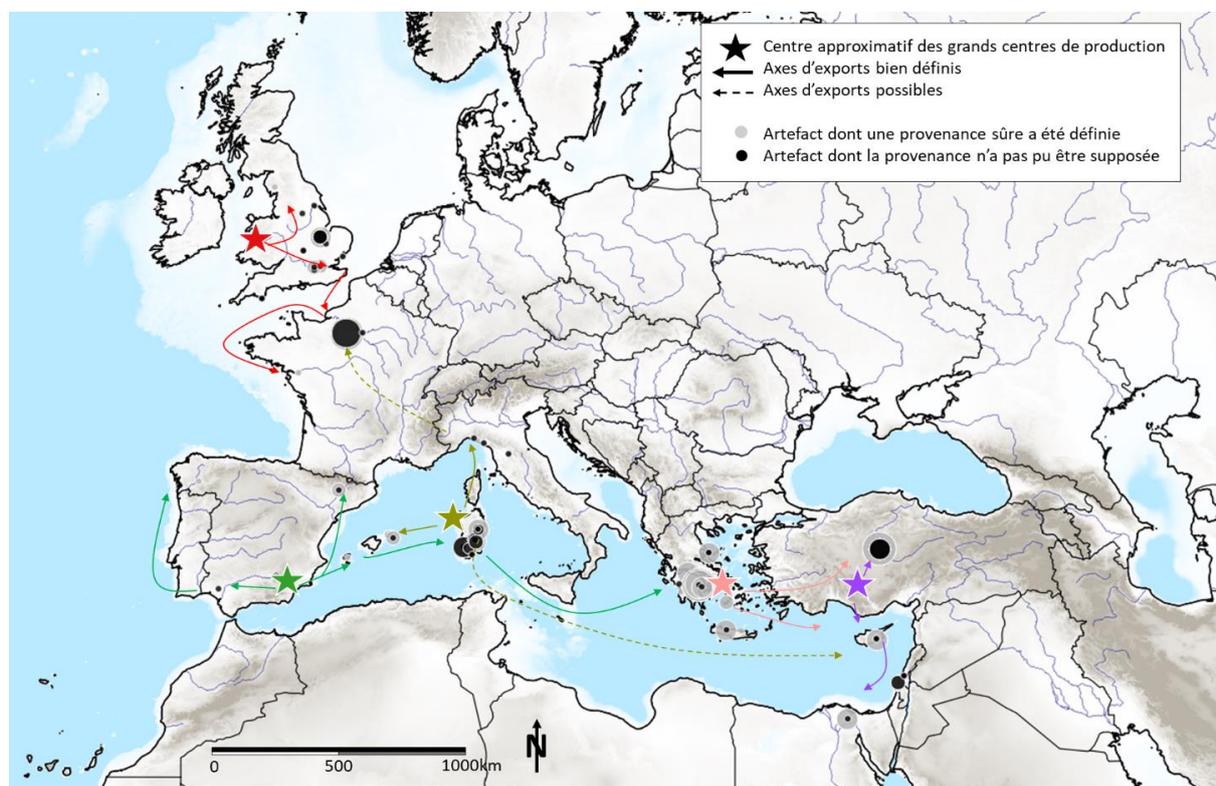


Figure 262 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 1300-800 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échanges au départ des régions minières.

³⁸⁴ Il s'agit des ateliers de Bruncu Madugui, Genna Maria et Santa Bárbara (Gallin et Tykot, 1993 ; Atzeni *et al.*, 2005 p.137-140).

³⁸⁵ Les auteurs se basent sur l'importante quantité de moules de bronziers (environ 80) et de creusets (une dizaine), découverts sur l'île à l'époque nuragique (soit à l'âge du Bronze). Ce type de mobilier indique cependant la présence d'activités de métallurgie d'élaboration, mais pas nécessairement d'une activité de métallurgie d'extraction.

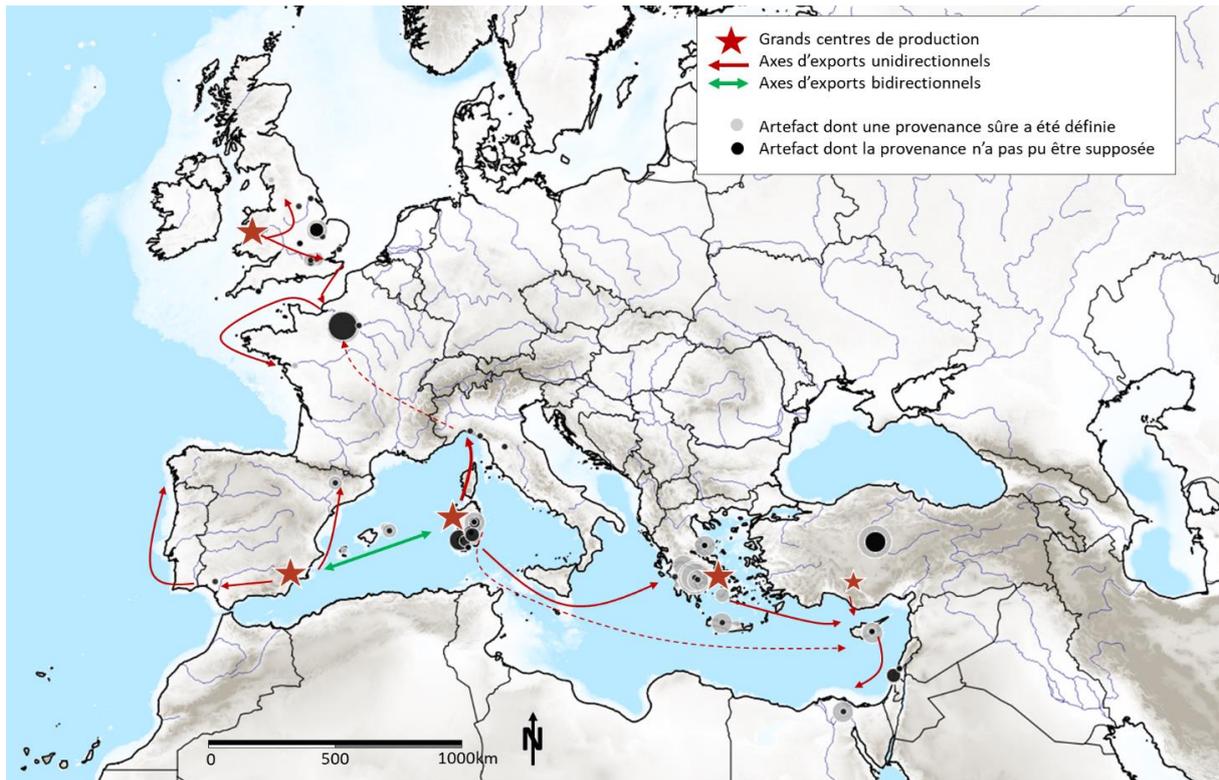


Figure 263 : Carte interprétée des principaux axes d'échange du plomb précédemment définis pour la période 1300-800 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge. Les axes bidirectionnels sont représentés par des doubles flèches vertes.

V/7 800-450 av. J.-C. Premier âge du Fer

Les résultats concernant la période 800-450 av. J.-C. (Figure 264) sont présentés mais restent très largement hypothétiques car ils s'appuient sur moins de données et car les artefacts analysés sont très inégalement répartis dans l'espace géographique étudié.

La faible abondance d'analyses d'artefacts dans les Balkans, en France ou encore en péninsule Ibérique ne permet que difficilement de définir si les autres axes d'échanges précédemment définis perdurent. Cependant, la détermination de provenance des artefacts cuivreux atteste à nouveau d'échanges très importants en Méditerranée, alors plus nettement scindée en deux, traduisant d'une part le commerce phénicien à l'est et d'autre part le commerce grec plus à l'ouest (Aubet, 2001).

Un faible export de productions britanniques pourrait perdurer vers la Scandinavie. Ces productions ne seraient alors plus originaires du Pays de Galles, mais du nord de l'Angleterre (Écosse/Cumbria).

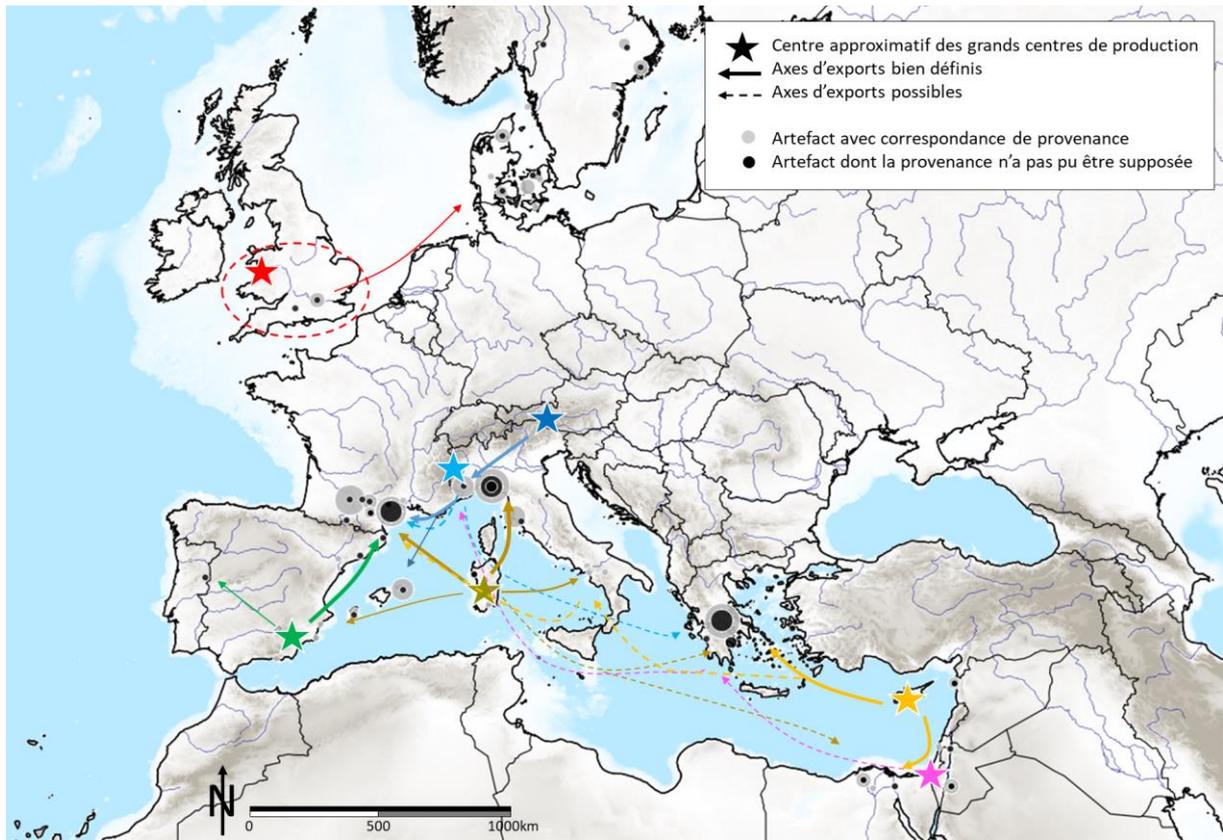


Figure 264 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 800-450 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échanges au départ des régions minières.

Les interprétations concernant les artefacts en plomb (Figure 265) souffrent des mêmes limites, mais présentent des similitudes frappantes avec celles définies pour les périodes antérieures. Des exports depuis l'Angleterre et les monts Taurus suivent (au moins) un axe vers le sud.

Des productions de plomb du Pays de Galles semblent atteindre les côtes armoricaines. Des exports de productions anglaises pourraient donc perdurer vers le sud (comme en témoignent les exports de plomb), mais également vers la Scandinavie (comme en témoigne le cuivre).

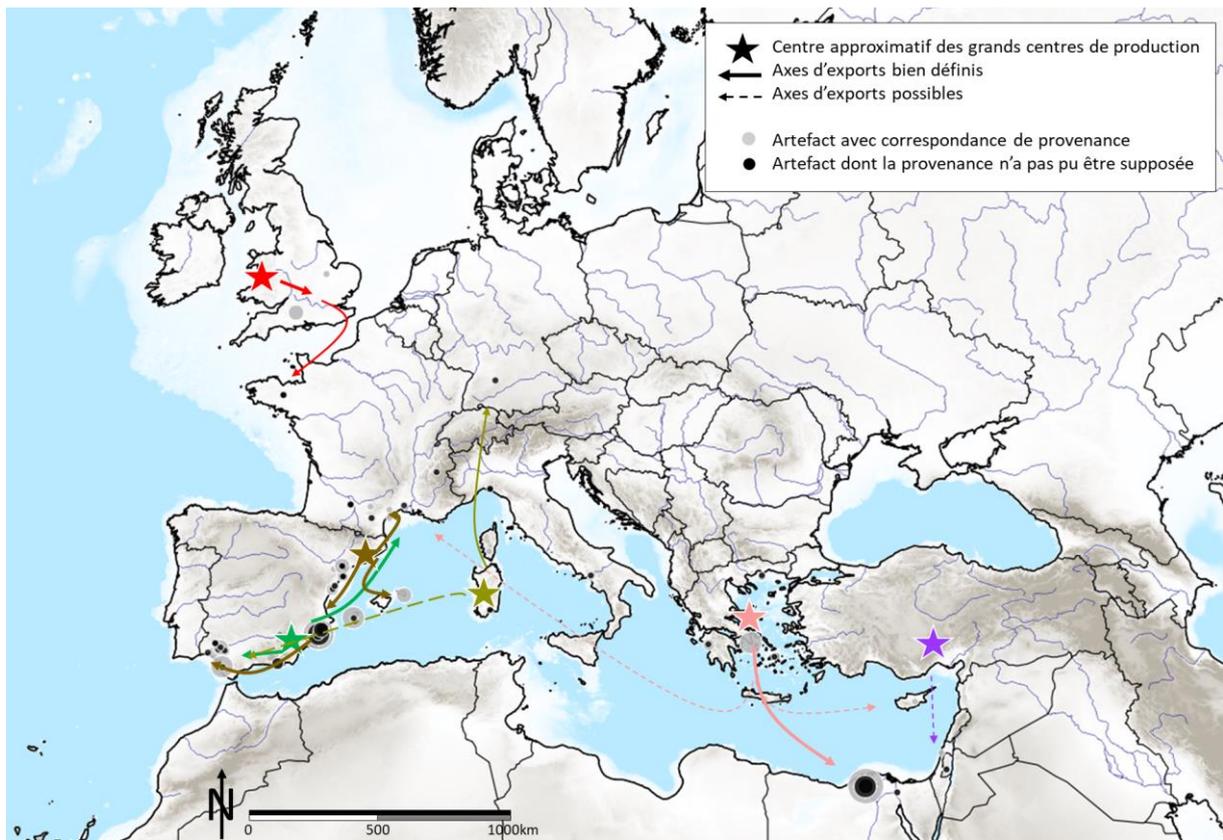


Figure 265 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 800-450 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échanges au départ des régions minières.

Des exports sont observés le long des côtes ibériques où d'importantes productions catalanes viennent s'ajouter aux riches productions de la région d'Alicante. De plus, si, nous ne traçons ces exports de plomb que sur des distances relativement faibles, les productions égéennes et sardes semblent s'exporter sur de plus grandes distances que pour les périodes antérieures. Les exports égéens sont liés à l'exploitation des riches mines du Laurion (Jones, 1982 ; Mussche, 2006), en revanche, les exportations sardes posent encore question.

Si ces attributions pourraient correspondre à des erreurs d'attribution liées aux très fortes similitudes de signatures isotopiques existant entre les gisements sardes et ibères, il faut rappeler qu'il est très difficile de retrouver les exploitations anciennes en Sardaigne : les riches (Pearce, 2018) gisements de plomb-argent sardes (en particulier ceux d'Iglesias) exploités au début de l'âge du Fer (Domergue, 1987 ; Caro *et al.*, 2013 ; Grazia Melis, 2014) ont pu faire l'objet d'une exploitation plus intense que celle que nous lui connaissons actuellement comme cela a été supposé précédemment pour le cuivre. Notre hypothèse d'une importante exploitation de plomb sur l'île est conforme aux récentes propositions issues des analyses isotopiques du plomb formulées par Wood *et al.* (2019), Terpstra (2021) et Yagel et Ben-Yosef (2022).

VI/ Discussion de la deuxième partie : Certains types d'artefacts parcourent-ils des distances plus importantes ?

VI/1 Du plomb échangé sur de moins grandes distances que le cuivre : pourquoi ?

Les exportations de plomb se tracent systématiquement à des distances moins importantes que celles du cuivre et le nombre de provenances indéterminé est plus conséquent pour les artefacts en plomb que pour les artefacts en cuivre (cf IV/3.a).

Le plomb, un métal souvent recyclé ?

Nous pourrions supposer que la difficulté à retracer le parcours du plomb pourrait être due à son recyclage fréquent, car ce métal est souvent utilisé pour fabriquer des éléments de fixation (Figure 194). Ces éléments, soumis à de forts risques d'usure et de casse, sont probablement souvent refondus.

Si cette hypothèse était correcte, les origines indéfinies (« x ») seraient également nombreuses pour les éléments de fixation en cuivre, qui sont aussi exposés à des risques élevés d'usure et de casse. Or, bien que les lingots de cuivre montrent des pourcentages plus élevés d'attributions précises (« ok »), les outils et les éléments de fixation en alliages cuivreux n'ont pas significativement plus d'origines indéfinies (« x ») que les autres catégories d'artefacts. En revanche, les figurines, peu sujettes à l'usure, constituent la catégorie d'artefacts aux origines les moins bien définies.

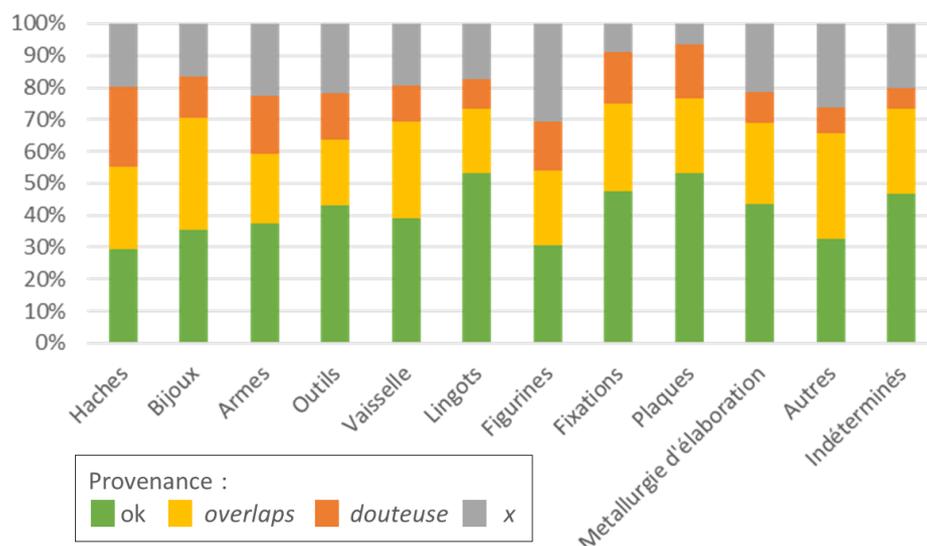


Figure 266 : Fiabilité des provenances par catégories fonctionnelles des artefacts en cuivre (1300-800 av. J.-C.)

Par ailleurs, en considérant les données géologiques, nous aurions au contraire pu supposer que le plomb aurait subi un recyclage moins fréquent que des métaux plus précieux (l'or, ou encore l'argent) Plus difficiles à obtenir, car plus rares dans la croûte terrestre et un recyclage moins important que le cuivre qui lui est plus courant³⁸⁶.

³⁸⁶ L'abondance naturelle du plomb est de 14 ppm soit environ 7 fois plus que l'étain (2,3 ppm) ou encore 200 fois plus que l'argent (0,075 ppm), mais 5 fois moins que le cuivre (60 ppm).

Des mines de plomb(-argent) encore à découvrir ?

Les plus faibles correspondances (% de « ok ») observées pour les artefacts en plomb pourraient être reliées à l'exploitation de mines encore à découvrir (peut-être même disparues) plus qu'à un recyclage particulièrement important du plomb. À la fin de l'âge du Bronze, du plomb est couramment associé au bronze, formant des alliages ternaires. Toutefois, nous ne connaissons que peu de zones de production pour cette ressource dont la consommation était importante. Du plomb était extrait au Pays de Galles et a également certainement été produit en quantités importantes³⁸⁷ en Méditerranée dans le cadre de la métallurgie de l'argent (fondre des galènes argentifères permet de récupérer environ 1 kg à 3 kg de plomb mais seulement 1 g d'argent). Les gisements de plomb(-argent) étant courants en Europe, il est probable que d'autres régions aient produit du plomb à l'âge du Bronze.

De faibles distances d'export ?

Le plomb n'était probablement pas un simple substitut à l'étain comme le suggèrent Figueiredo *et al.* (2010). Au contraire, l'hypothèse des auteurs selon laquelle le plomb serait abondant dans les bronzes dans les régions éloignées des sources d'étain, n'explique pas pourquoi du plomb serait exporté vers des zones productrices d'étain (Figure 267) et non pas uniquement vers des régions qui en sont dépourvues.

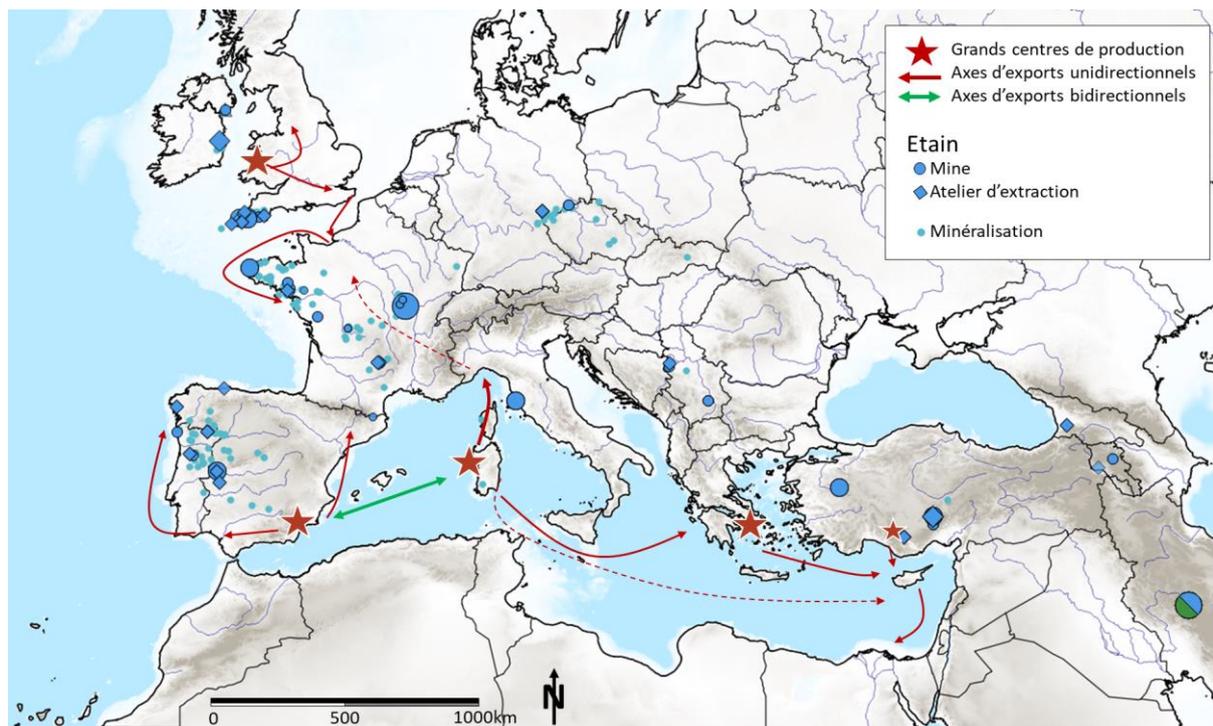


Figure 267 : Destination supposée des productions plombifères (flèches) et grandes zones de production stannifères entre 1300 et 800 av. J.-C. Le fait que les axes par lesquels transitent les productions de plomb ne se prolongent pas dans les secteurs produisant de l'étain est clairement à relier à l'absence d'analyses isotopiques d'artefacts dans ces régions.

³⁸⁷ Nous n'avons pas d'idée, même vague, de la quantité de plomb produite à la fin de l'âge du Bronze. Conophagos (1980 p.145-149) a estimé la production de plomb lors de l'âge d'or des mines du Laurion. Cette production semble colossale (1 400 000 t de plomb) et, ces mines étant moins actives à l'âge du Bronze, leur production devait être beaucoup plus faible.

Le fait que nous identifions moins régulièrement la provenance du plomb et que nous en traçons les échanges sur de plus courtes distances demeure énigmatique. Il est toutefois certain que le plomb était échangé via des axes d'échanges comparables à ceux du cuivre et que nous ne disposons pas encore de suffisamment de données pour définir clairement où il était exploité et jusqu'où il était clairement exporté.

VI/2 Certains types d'artefacts ont-ils été échangés sur de plus grandes distances ?

Comme nous venons de l'indiquer, pour la période 1300-800 av. J.-C., un peu plus de la moitié des lingots présentaient une provenance clairement probable (« ok »). Le fait que la provenance des lingots se trace bien se confirme pour l'ensemble de l'âge du Bronze.

En revanche, toutes périodes confondues, les haches, les armes, ou encore les bijoux ne présentent pas plus de provenances pouvant être clairement établies que de petites pièces de métal telles que des rivets et des plaques (Figure 268 ; voir également la Figure 266).

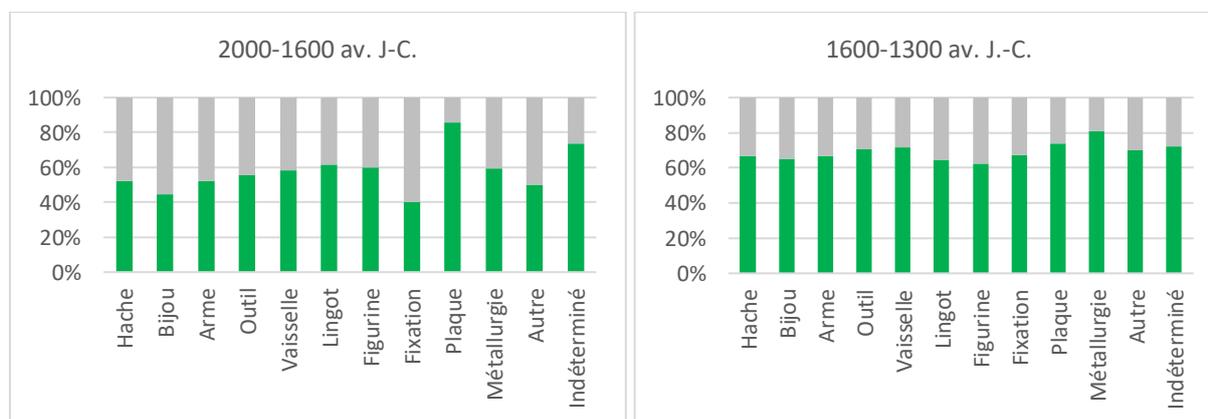


Figure 268 : Pourcentage de correspondances entre les signatures des minerais et des artefacts ayant pu être clairement définies (« ok », en vert) et n'ayant pas été définies (« x », en gris) par catégories d'artefacts et par tranche d'âge.

Regardons maintenant les artefacts pour lesquels la provenance est supposée fiable (« ok ») et observons les distances auxquelles chaque catégorie d'artefact a été exportée.

Durant la période 2000-1600 av. J.-C. (Figure 269), plus de 80 % des lingots et 75 % des haches et des bijoux³⁸⁸ sont issus de sources distantes (> 1000 km). Des provenances lointaines sont en revanche tracées pour peu d'armes (environ 35 %).

³⁸⁸ S'il n'est pas à exclure qu'ils puissent être conçus à partir de cuivre exotique dans des ateliers locaux, il est également possible qu'ils soient directement exportés sous leur forme définitive.

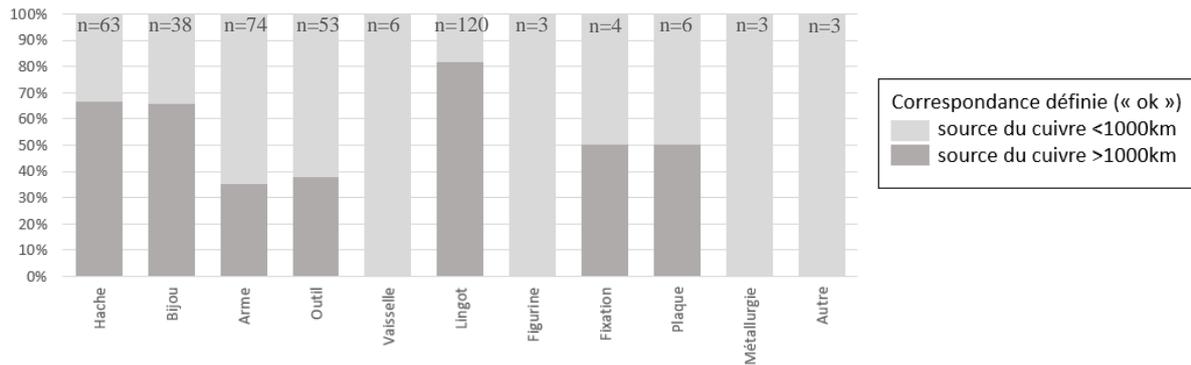


Figure 269 : Distance de la source supposée du cuivre pour les artefacts dont une provenance a pu être supposée (« ok ») par catégorie d'artefact pour la période 2000-1600 av. J.-C.

Entre 1300 et 800 av. J.-C. (Figure 270), les artefacts qui voyagent le plus loin restent les lingots et les haches mais la tendance s'inverse concernant les bijoux et les armes : 75 % des armes sont alors constitués de cuivre exotique contre seulement 45 % des bijoux.

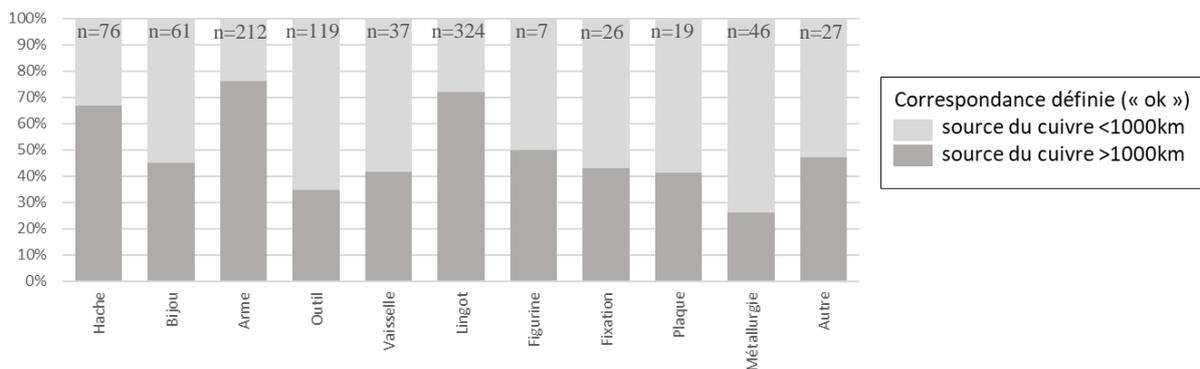


Figure 270 : Distance de la source supposée du cuivre pour les artefacts dont une provenance a pu être supposée (« ok ») par catégorie d'artefact pour la période 1300-800 av. J.-C.

Toutes périodes confondues, les outils seraient majoritairement constitués de cuivre issu de sources proches alors que les lingots et les haches circuleraient sur de plus grandes distances.

Les grandes distances de circulation des haches sont cohérentes avec leur interprétation régulière en tant que lingots bien que ces dernières peuvent également servir d'outil, être considérées comme des biens de prestige ou même des monnaies archaïques (Briard, 1994). La pluralité de ces statuts rend complexe toute interprétation.

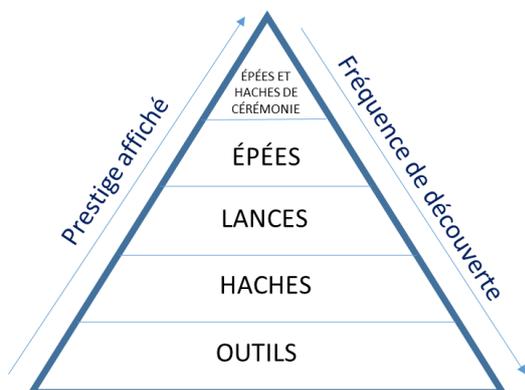


Figure 271 : Prestige de plusieurs catégories d'artefacts. Modifié d'après (Kuijpers, 2012). À partir de 2000 av. J.-C., les armes ne sont découvertes que dans les tombes d'un certain prestige (Kuijpers, 2012 ; Schwarz, 2014 ; Knoll et Meller, 2016).

VI/2.a Exportation d'objets finis ou de lingots ?

Les cartes de répartition (Figure 272) indiquent qu'au début de l'âge du Bronze toutes les régions importent des armes et des outils ou du cuivre servant à les élaborer (carte de gauche) mais que (carte de droite) :

- La moitié nord de l'Europe importerait préférentiellement des haches ou du cuivre permettant l'élaboration de ces dernières et peu de lingots et de bijoux ;
- Le centre de l'Europe importerait des bijoux ou du cuivre permettant leur élaboration.

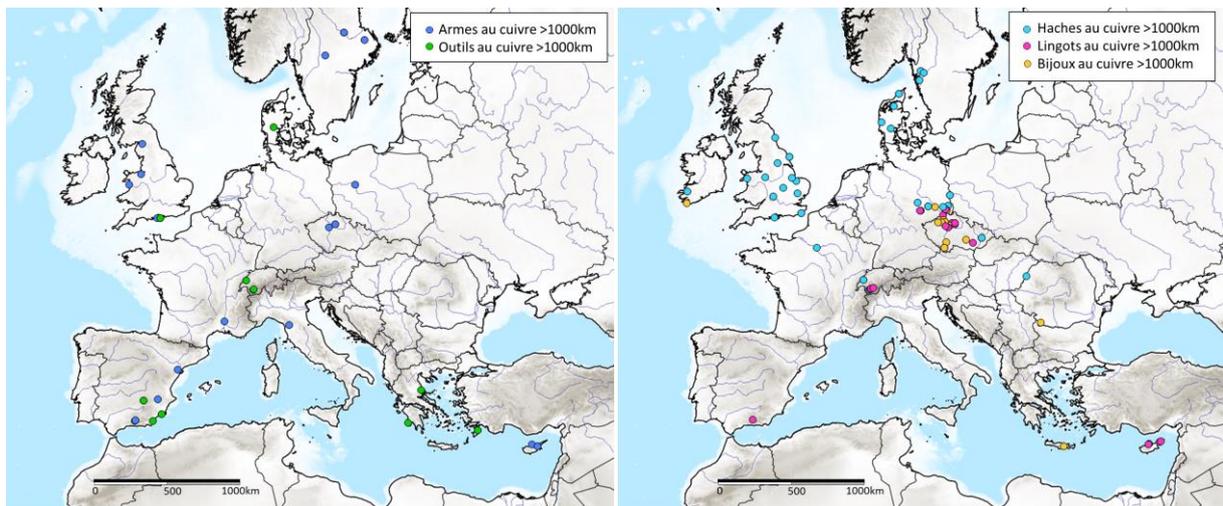


Figure 272 : Répartition spatiale des différentes catégories d'artefacts contenant du cuivre probablement extrait à plus de 1000 km de leur zone de découverte pour la période 2000-1600 av. J.-C. La carte de droite montre une répartition inégale des haches, lingots et bijoux alors que la carte de gauche permet de constater que des armes et des outils façonnés à partir de cuivre lointain sont plus uniformément répartis.

Cette différence de répartition pourrait être imputable aux grandes campagnes d'analyses pouvant cibler certains types d'artefacts (certaines études portant préférentiellement sur la provenance de haches ou de bijoux). Une quantité importante de haches ont été analysées en Scandinavie, mais n'explique pas à elle seule l'importance du nombre de haches contenant du cuivre de provenance lointaine dans la partie nord de l'Europe. Une question se pose alors : les différents types d'artefacts issus de cuivre lointains proviennent-ils de zones minières précises ? Autrement dit, les haches ou encore les bijoux proviennent-ils préférentiellement d'une grande zone minière où ces derniers seraient produits massivement (et exportés tels quels) ? Ou au contraire, les artefacts sont-ils produits dans une région spécialisée dans la métallurgie d'élaboration qui importe du cuivre sous une forme non définitive (telle que des lingots) ?

Observer la source du cuivre lointain des différents artefacts permet d'apporter un élément de réponse. Parmi les régions principales correspondant aux sources de ces cuivres figurent le Massif central, Chypre, le Levant ou encore le sud de la péninsule Ibérique (Figure 273). Si toutes les régions exportaient du cuivre sous forme de lingots, il apparaît que le cuivre du Massif central et de la péninsule Ibérique est contenu dans un plus grand nombre de produits finis (en particulier des haches³⁸⁹, mais aussi des armes). Ces régions pourraient donc produire directement ces objets ou produire un cuivre particulièrement adapté à leur conception.

³⁸⁹ Qui pourraient assurer une fonction de lingot.

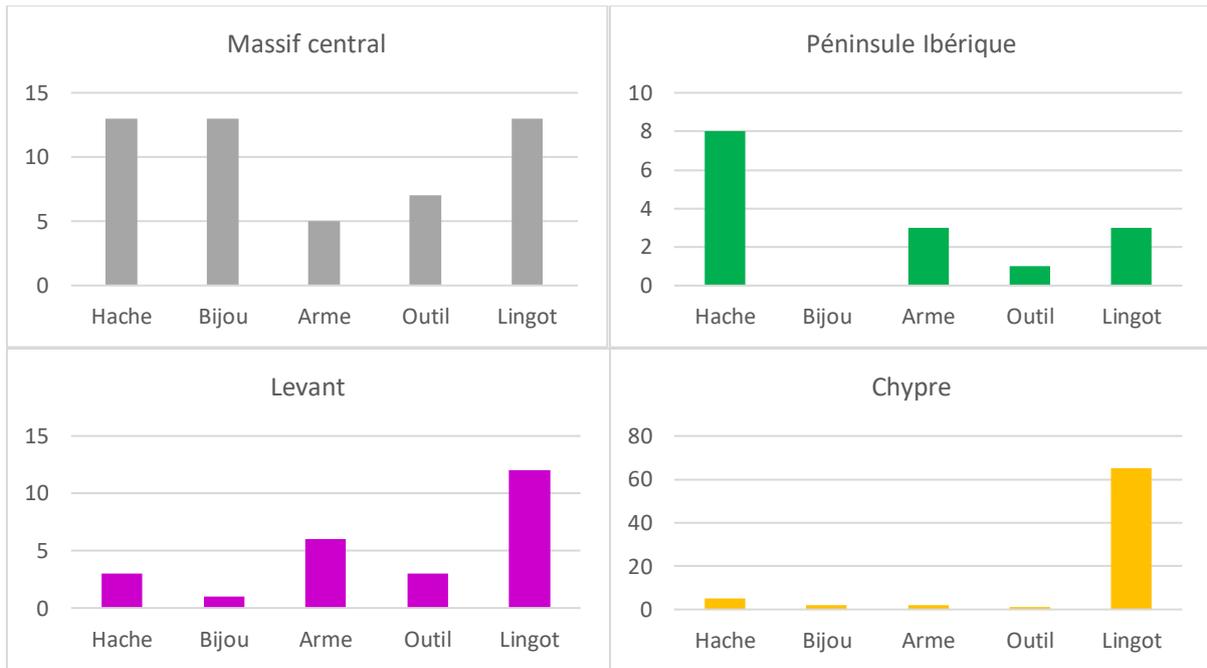


Figure 273 : Nombre d'artefacts par grands types de fonctions et par provenance supposée (le Massif central, le Levant, Chypre et la péninsule Ibérique) découverts à plus de 1000 km de leur source théorique. Nous ne présentons ici que les provenances auxquelles le plus d'artefacts ont été rattachés.

Cette possible spécialisation régionale dans la production d'un type d'artefact (ou d'un cuivre adapté à ce type de production) se ferait en parallèle de l'activité minière et pourrait se poursuivre par la suite. À la fin de l'âge du Bronze, la distribution des différents types d'artefacts provenant de sources lointaines devient homogène, les différentes régions d'Europe important des objets de tous types (Figure 274). Cependant, les principales régions minières semblent encore exporter certains types d'objets sur de grandes distances.

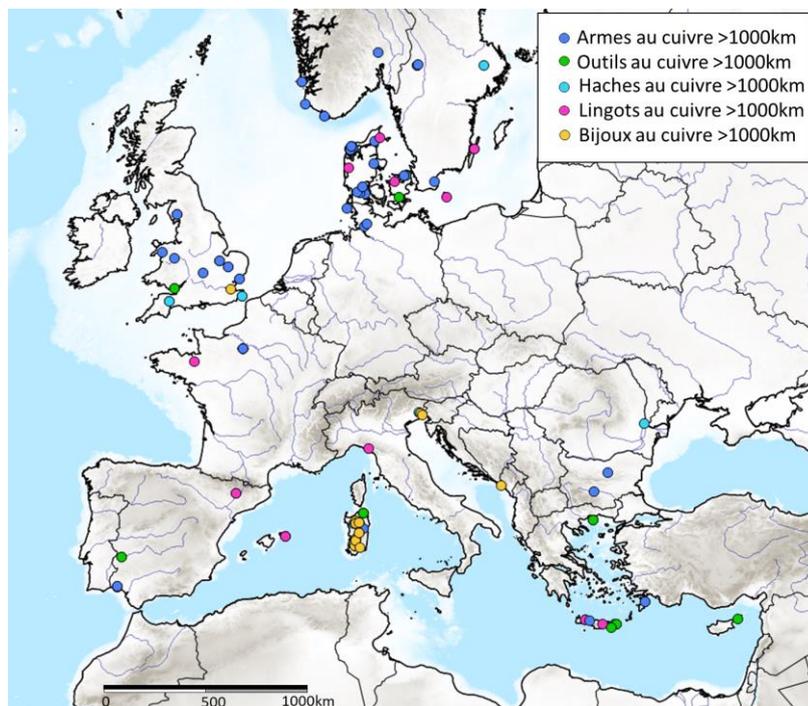
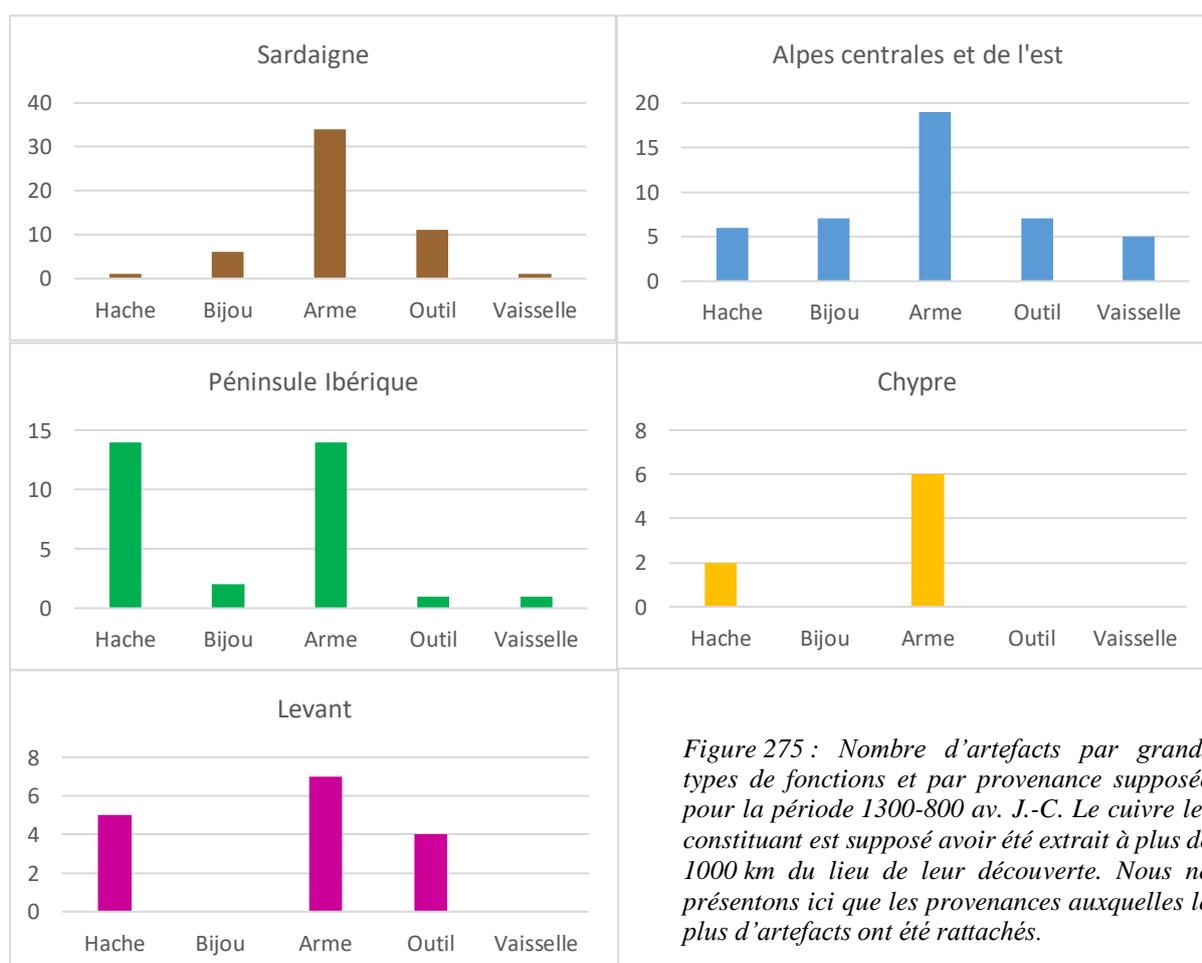


Figure 274 : Répartition spatiale des différentes catégories d'artefacts contenant du cuivre ayant supposément été extrait à plus de 1000 km de leur zone de découverte pour la période 1300-800 av. J.-C. La répartition ne présente plus de différence nord-sud.

Les sources chypriotes et du Levant exportent au moins des lingots alors que les régions minières d'Europe de l'Ouest exporteraient également certains types de produits finis. La Sardaigne ou encore les Alpes pourraient produire des armes^{390,391} à partir de cuivre produit localement mais leur destination semble différente : le cuivre sarde a été retrouvé dans des armes danoises alors que celui des Alpes constitue majoritairement des armes anglaises.

Une production importante d'armes et de haches destinées à l'export pourrait être issue de la péninsule Ibérique. Les haches seraient exportées vers la Sardaigne alors que les armes présenteraient des variations importantes de destinations.



En partie 1 nous avons fait l'hypothèse d'une production de cuivre plus conséquente à Chypre et dans les Alpes qu'en péninsule Ibérique. Nous aurions pu en déduire que des lingots ont été produits et exportés sur de grandes distances à partir de l'ensemble des très grandes zones de production. Or, une différence entre le sud-est de l'Europe (l'axe « est-méditerranéen » ou plus précisément l'axe « Chypre-Levant-Égée ») et la partie ouest de l'Europe semble s'observer. La forme sous laquelle le cuivre circule

³⁹⁰ Dans le cas de la Sardaigne, la production d'armes ne serait que peu surprenante car certaines caractéristiques guerrières de l'armement de Sardaigne sont partagées avec d'autres régions du Proche-Orient, de la Méditerranée et de l'Europe (voir notamment Matta et Vandkilde, 2022)

³⁹¹ La supposée production d'armes dans les Alpes est cependant plus difficile à confirmer mais pourrait aller dans le même sens que les conclusions de Ling *et al.* (2019) qui y identifient de probables productions d'épées.

le plus loin et donc la forme sous laquelle il serait exporté pourrait varier. Il s'agirait d'une part, de lingots à l'est de l'Europe, et d'autre part, de lingots, mais aussi de beaucoup d'autres produits manufacturés à l'ouest.

Ces différences pourraient à nouveau traduire des disparités régionales du système économique lié au métal de la métallurgie d'élaboration jusqu'à la forme sous laquelle le produit fini est principalement exporté. Il est également possible que certaines régions exportaient un cuivre particulièrement adapté à la conception de certaines catégories d'objets.

VI/2.b Des cuivres de qualité différentes ?

La question de la qualité des cuivres produits a été posée dans le cas de l'étude d'artefacts en bronze du début de l'âge du Fer. Un exemple précis ayant fait émerger cette hypothèse est l'étude du cratère de Vix (480 av. J.-C.), où deux types de cuivres (de sources différentes³⁹²) ont servi à réaliser les bronzes (Bourgarit et Mille, 2003) :

- Un cuivre très pur utilisé pour les bronzes travaillés par déformation plastique (martelage) ;
- Un cuivre de qualité moindre, plus riche en impuretés dans lequel sont façonnées les pièces de fonderies.

Supposer la circulation de cuivre de qualité différente aux périodes antérieures à l'âge du Fer est cependant complexe et très rares sont les sites où plusieurs qualités de cuivre ont été découvertes. Le site de Byblos (actuel Liban) constitue un cas intéressant. Entre 2000 et 1600 av. J.-C., les artisans utilisaient deux qualités de cuivre (El Morr *et al.*, 2013) : un cuivre « sale » était utilisé pour façonner des armes et un cuivre « propre » pour façonner de plus rares objets présentant des difficultés techniques de fabrication.

L'hypothèse que différentes qualités de cuivre aient été en circulation permettrait d'expliquer pourquoi des mines exploitaient des minerais très purs à seulement quelques kilomètres de mines présentant des minerais avec beaucoup d'impuretés. Le fait de produire des artefacts à une faible distance des mines pourrait permettre un contrôle de la qualité du cuivre importé (et éviter d'éventuelles tromperies).

VI/3 Distances d'exportation et type de transport

Dans une analyse précédente (cf discussion de la partie 1 : V/1.b) nous avons montré que les zones minières dédiées à la production de cuivre et celles dédiées à la production d'étain étaient généralement distantes d'environ 1000 km à la fin de l'âge du Bronze. Cette observation suggère que les distances moyennes parcourues par les productions de cuivre et d'étain pourraient être de l'ordre de 1000 km.

³⁹² Il a été prouvé que ces cuivres venaient de gisements différents et n'étaient pas dus à un traitement métallurgique différent (Bourgarit et Mille, 2003).

VI/3.a Utilisation de matrices de distances

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons utilisé des matrices de distances pour la période 1300-800 av. J.-C. Cette analyse a été réalisée en utilisant l'outil de « matrices de distance » disponible dans le logiciel QGIS. Les paramètres utilisés étaient les suivants :

- En données d'entrée : les artefacts dont la provenance a été définie comme fiable (« ok »), par période pour une région productrice donnée ;
- En données de sortie : un point désigné comme le centre géographique de la zone de production.

Les distances de sortie du modèle sont en degrés décimaux et non en kilomètres. Nous les avons multipliées par 111,32 afin de convertir la distance générée en une distance en kilomètres. Chaque distance correspond donc à la distance à vol d'oiseau séparant le lieu de découverte de l'artefact et le centre de la zone de production correspondant à sa provenance supposée. Il s'agit donc d'une distance d'exportation dont la principale limite est qu'elle repose sur des distances linéaires qui, par définition, ne prennent pas en compte les reliefs. Elles ne sont donc pas corrélables à des temps de trajet supposés.

Nous avons ensuite tracé des courbes de fréquences cumulées des distances à vol d'oiseau afin de définir des schémas de dispersion spatiale des artefacts en cuivre par rapport à leurs sources minières. Ces schémas nous permettent de proposer des tendances générales des réseaux de distribution du cuivre.

Des ruptures dans les circuits d'échange ?

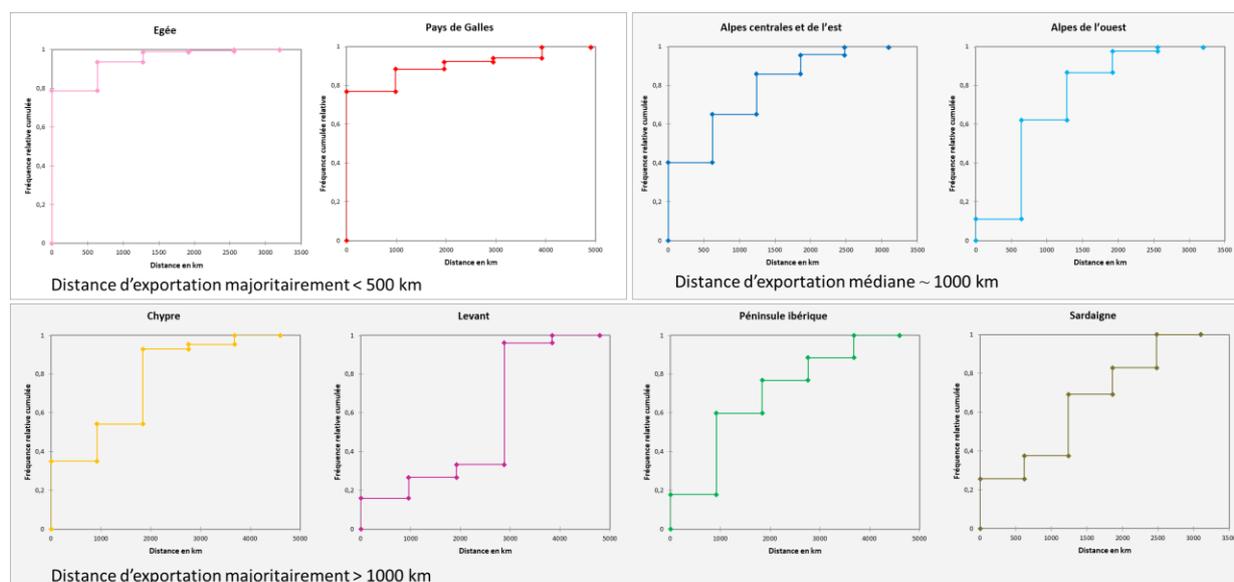


Figure 276 : Fréquences cumulées³⁹³ des distances à vol d'oiseau séparant différentes grandes régions minières et les lieux de découverte d'artefacts contenant du cuivre probablement issu de ces régions minières (provenances « ok ») pour la période 1600-800 av. J.- C.

Pour analyser les tendances générales, il nous faut analyser la forme générale des courbes :

- Cas n° 1 : si la courbe est croissante et atteint rapidement un plateau, cela indique que la plupart des artefacts en cuivre sont trouvés à des distances relativement faibles des régions minières ;

³⁹³ Chaque point sur la courbe indique le pourcentage cumulé des lieux de découverte d'artefacts en cuivre situés à une distance inférieure ou égale à la valeur correspondante sur l'axe des abscisses.

- Cas n° 2 : si la courbe est plus progressive (elle est dite bien classée), cela suggère que les artefacts en cuivre ont tendance à être exportés sur des distances relativement constantes et prévisibles par rapport à leurs sources minières ;
- Cas n° 3 : si les courbes présentent soudainement une rupture, il se produit un changement significatif dans la distribution spatiale des artefacts en cuivre par rapport à leurs sources minières.

Les régions productrices de cuivre peuvent être classées dans ces trois catégories (Figure 276). La première catégorie (cas n° 1) regroupe l'Égée et le Pays de Galles. Ces régions se caractérisent par des courbes atteignant rapidement un plateau. Elles présentent des distances d'exportation très faibles : environ 80 % du cuivre produit dans ces régions a été échangé à des distances inférieures à 1000 km : la production de cuivre répondrait à une demande majoritairement locale.

En revanche, les distances d'exportation du cuivre produit dans les Alpes centrales et de l'est sont très bien classées : la courbe de fréquence cumulée augmente de manière progressive, elle présente une forme en « marche d'escalier » dont chaque marche est de taille similaire (cas n° 2). Les échanges au départ de cette zone minière seraient donc relativement constants. Ce cas semble toutefois assez isolé et, seuls les exports au départ de la Sardaigne semblent également suivre une courbe relativement bien classée.

La lecture des fréquences cumulées montre des changements significatifs de pente pour la majorité des régions : les courbes présentent soudainement une « marche d'escalier abrupte » (cas n° 3). Ces ruptures de pente peuvent correspondre à des seuils importants dans la distribution spatiale des artefacts en cuivre par rapport aux régions minières.

Des modes de transport différents ?

La présence d'à-coups dans les courbes de fréquence cumulée pourrait indiquer que des modes de transport différents étaient employés :

- Des courbes bien classées traduisent l'existence de parcours avec des haltes régulièrement espacées, ce qui pourrait correspondre à un transport par voies terrestres et/ou fluviales ;
- Des courbes présentant des ruptures indiquent que les marchands réalisent des arrêts moins réguliers, ce qui pourrait correspondre à une navigation maritime, contrainte par le trait de côte et les courants marins ou d'autres obstacles naturels qui peuvent entraîner des arrêts moins réguliers pour les navires.

VI/3.b Des exportations par la mer et/ou la terre ?

Distribution statistique des distances d'export

La question du mode de transport mérite d'être posée. Il pourrait être maritime, strictement terrestre ou encore mixte maritime-terrestre. Pour définir le mode de transport, nous avons choisi une méthode mathématique qui permet d'identifier différents schémas de distances parcourues : un modèle de mélange gaussien. Ce modèle essaie de décomposer un ensemble de données en plusieurs groupes de données qui suivent des distributions gaussiennes, également appelées distributions normales. Il permet, par exemple, de révéler si la plupart des productions sont exportées vers des destinations proches du centre de production, ou si certaines productions sont exportées vers des destinations plus lointaines.

Deux éléments sont alors à prendre en compte dans la lecture des résultats : le nombre et l'amplitude des « cloches ».

Nombre de cloches

Si le graphique de mélanges gaussiens ne présente qu'une seule cloche, cela suggère qu'il existe une seule distribution principale des distances d'export pour les objets en cuivre³⁹⁴. Cela peut indiquer que les exportations de cuivre ont tendance à être relativement uniformes en termes de distances, avec peu de variations significatives dans les destinations ou les schémas d'exportation.

En revanche, la présence de plusieurs cloches sur le graphique indique la possibilité de plusieurs distributions ou groupes distincts dans les données. Cela suggère qu'il existe différents marchés de destination : les objets en cuivre peuvent être exportés vers plusieurs régions via des canaux de distribution et des réseaux commerciaux distincts.

Amplitude des cloches

Les distances sont dispersées autour de la moyenne si l'amplitude des courbes sur le graphique de mélanges gaussiens est très étendue. Cela peut indiquer une variabilité importante dans les distances d'export des objets en cuivre, avec des exportations s'étendant sur une gamme étendue de distances.

En revanche, si l'amplitude des courbes est très resserrée, alors les distances présentent une faible dispersion autour de la moyenne. Cela peut indiquer une cohérence plus forte dans les distances d'export, avec la plupart des exportations se concentrant autour d'une plage de distances relativement étroite.

Des modèles d'exports différents

Les distances d'exportation à vol d'oiseau peuvent être divisées en plusieurs groupes suivant ces deux informations (Figure 277) :

- Des courbes uniques ou quasi-uniques aux amplitudes très réduites (Pays de Galles, Égée) ;
- Des courbes uniques ou quasi-uniques aux amplitudes très marquées (Alpes, péninsule Ibérique) ;
- Des courbes nombreuses et aux amplitudes très réduites (Chypre, Levant, Sardaigne).

³⁹⁴ En d'autres termes, les données sont relativement homogènes et suivent une distribution normale autour d'une valeur centrale.

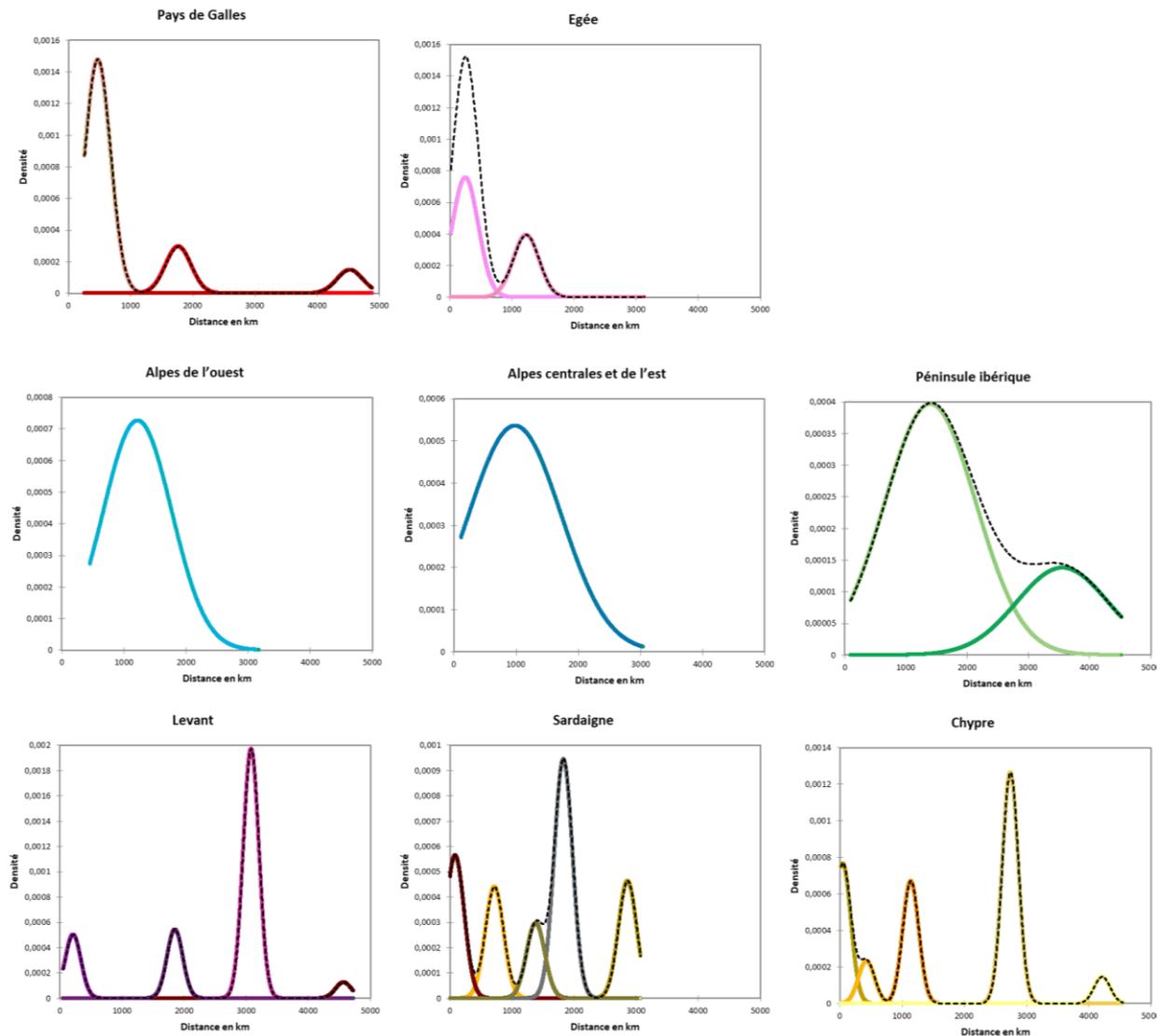


Figure 277 : Courbes de densités des distances d'export du cuivre par grande région minière pour la période 1300-800 av. J.-C. Les courbes ont été tracées à partir des distances précédemment calculées à l'aide d'une matrice de distances.

Nous proposons qu'une cloche unique sur le graphique de mélanges gaussiens puisse correspondre à des échanges terrestres :

- Les échanges terrestres peuvent être plus réguliers et prévisibles en raison de la proximité géographique des destinations et de la difficulté à parcourir plusieurs milliers à l'aide des seuls moyens de circulation terrestres et fluviaux, ce qui se refléterait dans une distribution relativement homogène des distances d'export et donc une cloche unique ;
- Les échanges maritimes sont souvent associés à des vitesses de transport plus élevées, une meilleure capacité de transport et une variété de destinations géographiques, soit à des schémas d'exportation plus complexes. Par conséquent, les données peuvent présenter une plus grande variabilité dans les distances d'export, ce qui se traduirait par la présence de plusieurs distributions distinctes sur le graphique de mélanges gaussiens et donc plusieurs cloches.

Interprétation des résultats

Les exports depuis les Alpes dessinent une unique courbe gaussienne, « en cloche ». Ce schéma d'échange serait très majoritairement terrestre. Il semble en être de même pour la péninsule Ibérique dont la répartition statistique des exportations se rapproche plus de celle des zones de production alpines que de celles du Levant, de Sardaigne et de Chypre. La majorité des échanges (représentés par la courbe marquée par la plus forte densité, en vert clair), se fait à une distance de 1400 km, ce qui est très proche de celles des Alpes (1200 et 1000 km). Il est donc plausible qu'une grande partie des exportations de la péninsule Ibérique puisse se faire par voie terrestre/fluviale. De plus, la distance d'environ 1000 km séparant les régions produisant du cuivre et celles produisant de l'étain pourrait donc correspondre à la longueur de la majorité des axes d'échanges terrestres.

Les courbes de densités obtenues pour les régions où les échanges seraient majoritairement maritimes sont plus complexes à interpréter notamment du fait qu'une partie des distances correspond à la distance de l'île au continent dans le cas de Chypre et de la Sardaigne. Cependant, les courbes en cloche sont séparées par une distance d'environ 1500 km à 2000 km³⁹⁵ qui pourrait correspondre à la longueur d'un axe d'échange maritime. Cette distance est légèrement supérieure à la distance séparant les zones de production de cuivre et d'étain mais se corrèle bien à la distance séparant ces régions minières aux régions produisant de l'argent et/ou du plomb.

Les trois quarts des productions échangées par voies maritimes circulaient à des distances très importantes et parcouraient plus de 2000 km. Il est donc envisageable que certains navires parcourent l'intégralité de l'axe méditerranéen ou atlantique, faisant des arrêts réguliers pour charger et décharger des marchandises. Un tel trajet pourrait prendre environ deux mois, en supposant que les 2000 km séparant les régions les plus éloignées de chaque axe puissent être parcourus à une vitesse de 40 km/h, comme supposé par (Cintas, 1949)³⁹⁶.

Cependant, la possibilité d'échanges maritimes n'entraîne pas pour autant une production minière importante comme le montrerait l'exemple des îles Britanniques et du monde égéen. La grande majorité des exportations de cuivre depuis ces régions ne dépasse pas 500 km et, si des régions de destination des productions semblent être localisées à 1500 km des côtes, seul peu de cuivre semble y être envoyé.

³⁹⁵ Cette distance sépare également les deux courbes de densité de distances obtenues pour la péninsule Ibérique.

³⁹⁶ Cela pourrait également être la durée d'un trajet reliant les îles scandinaves aux îles britanniques (Vandkilde, 2019).

Discussion générale : de grands axes d'échange reliant des zones produisant des métaux différents ?

L'étude des zones minières nous a permis de mettre en lumière des variations dans la production du cuivre mais aussi de mettre des changements de répartition des zones de production à travers le temps et l'espace en Europe.

Dès 1600/1500 av. J.-C., de grandes zones de production remplacent les exploitations initialement dispersées à travers l'Europe. Ces grandes régions minières, distantes d'environ 1000-1500 km, semblent principalement dédiées à l'exploitation d'un métal précis.

La deuxième partie de ce manuscrit explore les motifs de commerce à travers l'Europe. Nous supposons que les grandes régions qui échangent entre elles évoluent peu au fil du temps. Trois grands complexes interrégionaux, reliés par voie terrestre ou maritime, échangent de manière préférentielle et développeraient une relation d'interdépendance : l'est de la Méditerranée (axe « Chypre-Égée-Levant »), le nord-ouest de l'Europe (axe « Alpes-Îles Britanniques-Scandinavie »), et le centre-est de l'Europe (axe « Alpes-Balkans-Égée »).

Au terme de nos observations, la question de l'existence de complexes interrégionaux fortement interdépendants et peu interconnectés mérite d'être posée.

Il semble probable que des échanges à plus grande distance relient ces grandes régions : nous percevons des échanges le long de la façade atlantique et des échanges reliant l'est et l'ouest de la Méditerranée. L'ampleur des tonnages échangés et la régularité de ces échanges à très longue distance sont cependant complexes à définir, notamment en raison du faible nombre d'artefacts datés de 1600 av. J.-C. et après, analysés dans la péninsule Ibérique ainsi que sur la façade atlantique française. Des contacts commerciaux relient-ils les grandes régions qui échangent entre elles de manière préférentielle ? Quels sont les métaux échangés dans les grandes régions interconnectées ? Les réseaux sont-ils basés sur des relations de concurrence et/ou sur des relations d'alliance ?

I/1 La recherche de métaux différents ?

I/1.a Des alliances permettant des productions nouvelles ?

La conclusion de la partie 1 a montré que la géologie et la disponibilité des ressources minières pourraient partiellement contraindre la répartition spatiale des mines. Elles n'expliquent toutefois que partiellement les dynamiques économiques de l'âge du Bronze et l'arrêt de l'exploitation du cuivre au profit notamment de l'étain dans certaines régions. L'hypothèse théorisée par Earle *et al.* (2015) d'une spécialisation des régions dans la production du métal dont il est possible de tirer le plus de profit n'est que partiellement confirmée. En effet, la dynamique des activités minières serait intimement dépendante du tracé des grands axes d'échange reliant de grandes régions cuprifères à des régions stannifères et plombifères/argentifères. Les connexions établies au cours du III^e millénaire semblent pérennes et lient des sociétés échangeant ces ressources de manière préférentielle, au sein de grandes régions dont les contours sont proches de ceux des grands complexes culturels.

L'hypothèse formulée en partie 1 (cf V/1.b) proposant qu'un arrêt de l'exploitation du cuivre dans certaines régions puisse être lié à la concurrence de grandes mines voisines mérite d'être reposée.

Nous avons envisagé que l'arrêt (ou du moins la très forte diminution) de l'exploitation du cuivre en Bretagne et dans le Massif central pouvait être lié à la concurrence des grandes mines alpines. Néanmoins, cela ne semble pas le cas. Ces régions échangent entre elles depuis plus d'un millénaire et ont certainement noué des relations diplomatiques. S'il n'est pas aisé de déterminer le degré de stratification et l'organisation des communautés protohistoriques (Chaume *et al.*, 2021), il est certain que ces relations ne peuvent pas se faire à l'échelle de simples chefferies mais impliquerait à minima des élites aristocratiques. Clark (2005) illustre ce fait en prenant l'exemple de l'épave d'un navire (~1550 av. J.-C.) découvert dans la baie de Dover. Il argumente qu'un groupe familial élargi ne peut pas, à lui seul, construire l'embarcation, l'approvisionner, approvisionner son équipage et établir des relations commerciales.

Ces relations d'échange pourraient également expliquer l'arrêt des productions de cuivre de Toscane et de Ligurie au profit d'exploitations d'étain. De plus, le fait que l'Égée produisait peu de cuivre pourrait s'expliquer par sa facilité à s'en procurer via des axes d'exportation bien établis.

Il est donc possible que ces régions aient quitté une forme de dépendance vis-à-vis de la ressource cuivre pour exploiter de nouvelles ressources. Ces ressources sont certainement en partie des métaux, mais l'éventail des échanges est bien plus large. Dans les axes reliant la Scandinavie à la façade atlantique et aux Alpes, de l'ambre, mais aussi des biens périssables, des bronzes aux formes et ornements très élaborés (Nørgaard, 2015) ou encore des guerriers et de l'armement performant (Vandkilde, 2014) ont pu circuler en retour des métaux importés. En méditerranée, des poteries, des huiles, de l'ivoire ou encore du verre sont largement échangés (Murray, 2023).

Produire toutes ces ressources et des produits finis d'une qualité souvent remarquable demande des efforts considérables. Le fait que certaines populations se concentrent sur une activité spécifique implique qu'elles puissent se procurer facilement de la nourriture ou encore du cuivre/bronze. Cela nécessite une organisation sociale stratifiée et des relations intercommunautaires et intersociétales bien établies.

Il est par exemple fréquemment mentionné qu'il est aisé de récolter la cassitérite dans les cours d'eau (Niederschlag *et al.*, 2003 ; Haustein *et al.*, 2010 ; Kienlin, 2013 ; Svizzero et Tisdell, 2016), mais isoler la cassitérite des autres sédiments demande de les séparer par gravité, notamment par des systèmes de tables à secousse, et les méthodes permettant d'obtenir beaucoup d'étain nécessitent de modifier des cours d'eau. L'immense majorité des exploitations de placers découvertes à ce jour prend la forme de larges chantiers alluvionnaires remobilisant de très grandes quantités d'alluvions³⁹⁷. La mise en place d'exploitations alluvionnaires nécessite des prospections intenses et une maîtrise technique importante, très différente de celle des mines en roche (cf partie 1 II/1.a). Se consacrer à ce type d'exploitation nécessite de se spécialiser. La mise en concurrence pourrait justifier cette spécialisation, comme le suggère l'hypothèse formulée par Earle *et al.* (2015) mais le fait de disposer de relations fortes et pérennes (car établies depuis plusieurs siècles) avec des régions voisines productrices de cuivre est certainement également un facteur très important à considérer. Bien que la nature exacte des alliances et le statut des élites nous échappent encore, il est certain que les relations d'alliance économique ont

³⁹⁷ Tel que le fossé de 2 m de profondeur pour une largeur d'environ 20 m découverts dans le Finistère à Saint-Renan (Giot et Lulzac, 1998 ; Chauris, 2011). Des exploitations sous la forme de ravines sont également connues au début de l'âge du Fer en Europe (Cauuet *et al.*, 2006).

été largement facilitées par l'intervention de membres de l'élite sociale qui ont animé les réseaux d'échanges à longue distance et assuré leur pérennisation.

Il est enfin également encore complexe, de déterminer si les voies d'échange se sont mises en place dans le but de relier des zones minières en activité et ont ainsi stimulé ces zones minières ou si les grandes voies d'échanges déjà en place ont été progressivement modifiées afin de relier les centres miniers les plus dynamiques.

I/1.b Une spécialisation régionale liée au tracé des axes d'échange ?

Les axes d'exportation de cuivre que nous venons de tracer peuvent être superposés aux cartes de localisation des mines et des ateliers de métallurgie extractive établies en partie 1. Regrouper ces données pour la fin de l'âge du Bronze (Figure 278) montre que les axes d'export du cuivre traversent des districts miniers stannifères.

Cette observation est intéressante, car, le bronze étant un alliage de cuivre et d'étain, il est nécessaire que les circuits d'échange empruntés par ces métaux se croisent. Or, plus que se croiser, il se pourrait que les grands axes par lesquels circulent les métaux soient en grande partie communs. Par exemple, le cuivre exporté selon l'axe « Alpes-Manche » possédait certainement son axe inverse « Manche-Alpes » par lequel de l'étain est exporté vers les Alpes. Cet étain pourrait avoir été extrait dans les Cornouailles, le Massif armoricain, le Massif central ou encore en péninsule Ibérique (en transitant par le grand axe atlantique). Cependant, l'étain n'est apparemment pas le seul métal exploité dans des régions traversées par les axes d'exportation du cuivre.

Les grands axes identifiés relient des régions produisant cuivre, étain, or, plomb et (plomb)argent. L'or pourrait également être intégré à ces grands réseaux d'échange, mais que nous ne pouvons pas le prouver car le faible nombre de sites producteurs d'or répertorié permet difficilement de supposer que les grands axes tracés traversent des zones d'exploitation aurifère.

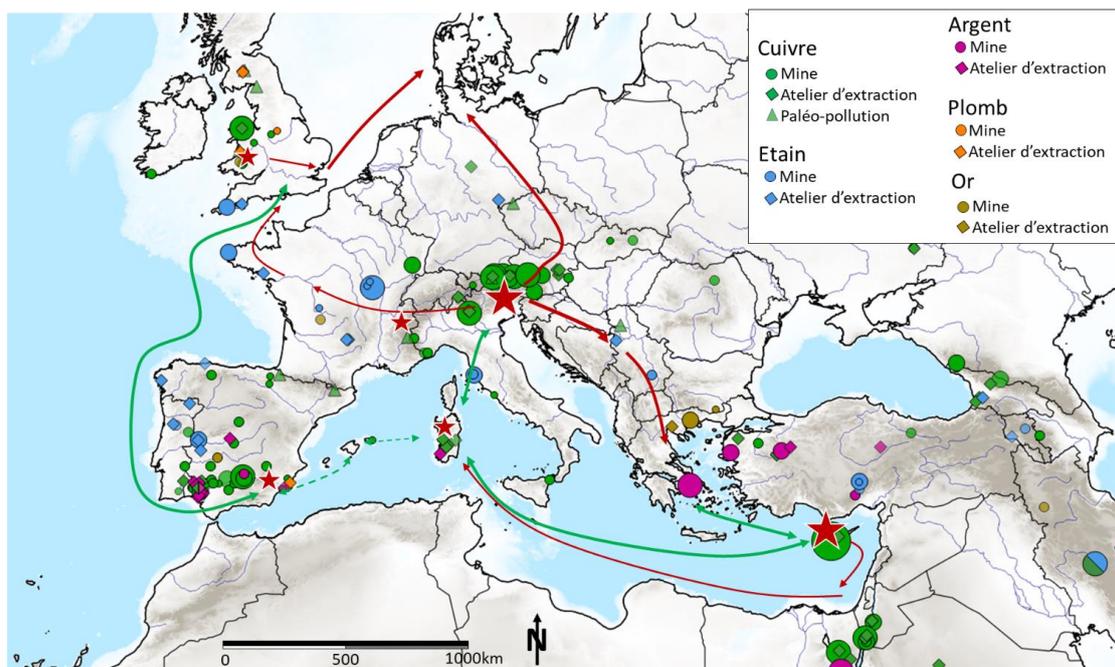


Figure 278 : Axes d'échange et grandes zones de production de cuivre, étain, or, plomb et (plomb)argent connus pour la période 1300-800 av. J.-C. et axes d'exportation de cuivre supposés (flèches rouges et vertes) à partir des principales zones minières (étoiles rouges).

L'île de Chypre profiterait d'une position favorable en Méditerranée orientale et de liens forts avec le monde égéen et le Levant dès le III^e millénaire. Si Chypre ne produit que du cuivre, elle est incluse dans un grand réseau d'échange par lequel transiteraient de l'étain et du plomb-argent issus des monts Taurus, des productions d'or et de plomb-argent venues d'Égée et du sud de l'actuelle Égypte.

L'Égée, productrice de plomb-argent et d'or, est également reliée aux Balkans alors producteurs d'étain puis aux Alpes produisant massivement du cuivre. L'axe « Alpes-Balkans-Égéen » permet donc également de relier des régions productrices de métaux différents.

Les Alpes présentent des connexions bidirectionnelles avec la Toscane produisant de l'étain et la Sardaigne produisant cuivre et plomb-argent. Cet axe de faible développement permettait donc également d'obtenir ces quatre métaux.

La péninsule Ibérique produisait du plomb-argent, du cuivre et de l'étain et pouvait constituer une région autonome en matière de production de métal. Elle possède une connexion avec l'axe atlantique la reliant aux productions d'étain, de plomb et de cuivre et peut-être d'or³⁹⁸ des îles Britanniques, mais aussi à l'étain et l'or du Massif central. Dans ces cas encore, l'absence supposée d'exploitation du cuivre des Cornouailles, du Massif armoricain ou encore du Massif central s'expliquerait par une facilité d'accès à ces ressources par des voies d'échanges pérennes, mises en place très précocement.

Seuls l'axe « Manche-Alpes » et l'axe triangulaire scandinave ne sont pas directement reliés à une zone argentifère connue. L'apparition d'exploitations de plomb en Angleterre pourrait combler en partie ce vide : les zones productions de plomb-argent actuellement connues les plus proches étant localisées sur le pourtour méditerranéen.

I/2 Quatre grandes régions aux échanges préférentiels

I/2.a Des relations de dépendance ?

Il semble que des volumes très différents de cuivre étaient extraits des différentes régions productrices de cuivre (cf partie 1 V/3.c). Nous avons argumenté que des gisements de types très proches n'étaient pas exploités de la même manière dans les différentes régions productrices. Dans l'est des Alpes ou encore à Chypre, des productions de masse ont eu lieu, marquées par des volumes extraits importants et un traitement des minerais dans de grands ateliers très spécialisés. À l'inverse, en péninsule Ibérique, les ateliers seraient de taille très réduite et les productions moins importantes.

L'analyse des axes d'échange permet de constater que Chypre s'intégrait dans un grand axe « Chypre-Levant-Egée » incluant des sociétés étatiques. La production pourrait avoir été importante car les échanges existaient depuis longtemps et ont été entretenus par les relations entre élites.

Les sociétés implantées géographiquement plus à l'ouest sont moins hiérarchisées mais des relations commerciales pérennes reliaient tout de même les sociétés scandinaves, britanniques et alpines. Cette très forte interconnexion aurait pu favoriser le développement des mines de cuivre alpines ou encore des mines d'étain des Cornouailles.

³⁹⁸ Il est très probable que de l'or soit exploité dans les Cornouailles bien que cela reste encore sujet à discussion du fait de la difficulté de tracer les sources d'or (Ehser *et al.*, 2011 ; Standish *et al.*, 2015 ; Timberlake, 2017).

En revanche, la péninsule Ibérique abritait des exploitations de cuivre de taille très modeste, produisait de l'argent, du plomb et de l'étain³⁹⁹. Cette région aurait potentiellement eu une dépendance moins forte envers les exportations⁴⁰⁰.

L'analyse de l'implantation des mines et le traçage de sources par isotopie du plomb nous ont conduits à suggérer l'existence d'une dépendance forte entre certaines régions pour se fournir en métal. Peut-être initiée par une relation de compétition, la mise en place des grands réseaux d'échanges reconnus a certainement entraîné une relation de dépendance entre régions distantes. En effet, l'abandon de l'exploitation du cuivre dans de nombreuses régions impliquait nécessairement de s'assurer un approvisionnement fiable en cette ressource essentielle.

Ces relations de dépendance relative liaient plusieurs grandes régions : l'Europe était probablement organisée en fonction de plusieurs grands espaces de production et d'échanges préférentiels et pérennes reliant des populations partageant une culture souvent proche⁴⁰¹.

Quatre grands ensembles interrégionaux semblent clairement définis (Figure 279) : le nord de l'Europe (grande région 1), le sud-est méditerranéen (région 2), le centre de l'Europe (région 3) et l'ouest méditerranéen (région 4). Toutes ces grandes régions comprennent des sous-ensembles aux échanges très pérennes tels que l'axe « Manche » ou encore l'axe « Alpes-Balkans ».

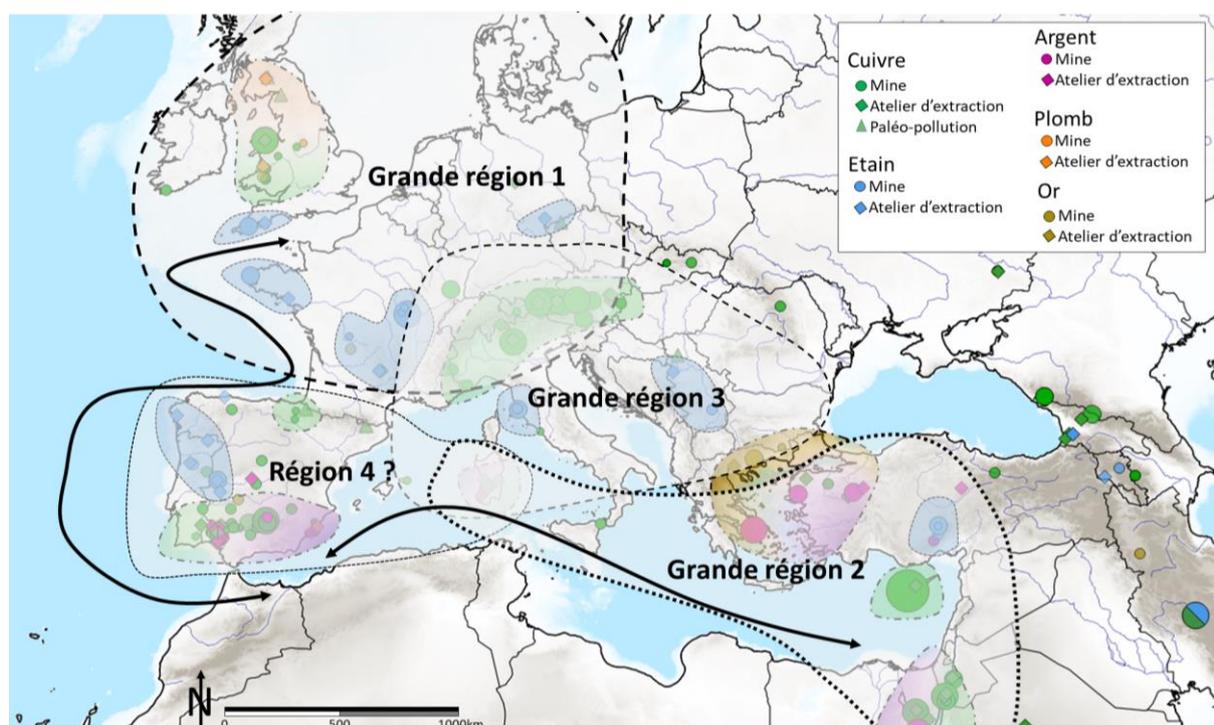


Figure 279 : Grandes régions de production de métaux, grandes régions d'échange préférentiel du cuivre et axes interrégionaux supposés pour la période 1300-800 av. J.-C.

³⁹⁹ Cela est surprenant car les gisements de cuivre comme d'argent y sont très riches et des échanges existent vers l'Atlantique et la Méditerranée.

⁴⁰⁰ Les faibles productions de cuivre estimées pour la péninsule Ibérique posent question et trop peu d'analyses ont été menées dans le sud-ouest de l'Europe pour permettre de définir clairement si une quantité importante de cuivre ibérique a circulé le long des axes atlantiques et méditerranéens.

⁴⁰¹ Les contours des grandes régions étaient certainement proches de ceux des grands ensembles culturels.

I/2.b Des régions très interconnectées ?

La distance moyenne des échanges et les cartes que nous avons établies suggèrent l'existence d'échanges interrégionaux durables et préférentiels, probablement plus réguliers que les échanges à très grande distance, qui pourraient revêtir un caractère plus exceptionnel, voire opportuniste. En effet, si les productions de certaines grandes régions (les Alpes, Chypre ou encore le Levant) semblent parcourir des distances très importantes, elles n'atteignent pas l'ensemble de l'Europe⁴⁰².

Si l'Europe et le Proche-Orient étaient interconnectés, les relations commerciales entretenues ne semblent pas s'inscrire dans le temps long contrairement aux relations interrégionales liant certaines régions d'Europe pendant plus d'un millénaire. Les objets exotiques revêtent une signification anthropologique importante, témoignant du statut social élevé de certaines élites mais ils ne reflètent pas nécessairement un commerce régulier et des relations stables, contrairement au cuivre qui est échangé de manière plus systématique et constante.

De plus, les interconnexions économiques ne s'étendent pas uniformément à toutes les régions, mais varient en intensité, ce qui signifie que certaines régions ne sont pas affectées par les grandes crises survenues dans des régions éloignées. Lorsque ces répercussions se font sentir, elles peuvent être diverses et parfois bénéfiques pour une région donnée. Deux exemples peuvent illustrer la complexité de ces relations à définir précisément.

Lors de la crise de 1200 av. J.-C., les troubles dans l'est de la Méditerranée auraient fragilisé les circuits d'export (et les productions) de cuivre chypriotes, mais auraient profité aux productions ibériques qui seraient alors plus importantes. Cela plaiderait en faveur de l'hypothèse selon laquelle des voies d'échanges à longue distance, bien que de faible ampleur, pouvaient être rapidement sollicitées (et ainsi voir leur transit augmenter) lorsque d'autres axes d'échange déclinent.

Concernant l'âge du Fer, Beaujard (2010) a analysé les relations d'interdépendances intersociétales en comparant les périodes de croissance et de décroissances de régions géographiques en Europe et en Asie (Tableau 58). Il indique que les périodes de crises et d'effondrements ne sont pas synchrones et suggère l'existence de nombreux systèmes et non d'un système unique.

⁴⁰² La carte illustrant la localisation des lingots peau de bœuf découverts en Europe est également très significative, car elle indique que ces derniers n'atteignent pas la péninsule Ibérique et les côtes atlantiques.

	Egypt	Israel Palestine	Syria Lebanon	W. Arabia	Anatolia	Greece	N. Africa	Italy	N. Meso- potamia	S. Meso- potamia	Iran	W. Central Asia	N. India	S. India	Conti- nental S.E. Asia	N. China	S. China
1000-900	+	+	+	+	?	+	-	?	-							+	?
900-850	+	+	+	+	M	+	+	+	+							+	?
850-800	-	+	+	+	+	-	-	-	-			-				-	?
800-750	-	+	+	+	+	-	+	-	-			-				-	-
750-700	-	-	+	+	M	+	+	+	-	+	+					M	-
700-650	-	-	-?	+	-	+	+	+	-	M			+			+	+
650-600	+	+	M	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+			+	+
600-550	+	-	-	-	+	+	+	+	+	M	+	+	+			+	+
550-500	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
500-450	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+			+	+
450-400	-	-	+	+	-	M	+	-	+	+	+		+			+	-
400-350	M	-	M	M	+	-	+	-	-?	-			+	+	+	M	+
350-300	M	M	M	M	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
300-250	+	+	+	+	M	M	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
250-200	+	M	M	+	M	M	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
200-150	-	-	-	-	M	-	+	+	-	M	+	M	M	+	+	+	+
150-100	-	-	-	-	M	-	-	M	-	M	-	-	M	+	+	+	+
100-50	-	-	-	-	M	-	-	M	+	+	M?	+	-?	+	+	+	+
50-1	M	M	M	+	+	-	M	+	+	+	+	+	-?	+	+	-	+

+ growth
- recession
M intermediate situation
? undetermined situation

Tableau 58 : Périodes de croissance et de décroissances par pas de 50 ans et par grandes régions d'Eurasie.
Source : Beaujard (2010).

La dynamique des échanges à grande distance ne peut donc pas s'expliquer correctement sans prendre en compte la dynamique économique à une échelle régionale. Comme conclu par Murray (2023), l'intérêt croissant pour la comparaison entre la connectivité à grande échelle et les vies sociales localement constituées au sein des communautés a conduit les chercheurs à une meilleure appréciation du fonctionnement du commerce à plusieurs échelles.

I/2.c Des axes à très grande distance difficilement perceptibles ?

Le fait que les très grands axes d'échange (atlantique et méditerranéen) puissent être rapidement sollicités en cas de déclin de la production dans une grande zone de production interrégionale confirme que les grandes régions sont reliées entre elles. Néanmoins, nous proposons que le rôle joué par les axes d'échange à très grande distance puisse être surestimé.

Il est indéniable que certaines pratiques culturelles et conditions matérielles sont partagées à très grande échelle (Daróczy, 2021) en particulier du fait que de nombreux individus seraient très mobiles. Cette intensification des interactions entre différentes régions est souvent comparée à une forme précoce de globalisation⁴⁰³ qui se manifeste par la circulation de biens, de technologies, d'idées et de pratiques culturelles à travers des distances considérables. Supposer l'existence d'une globalisation ne revient pas à nier l'existence de traditions locales ou de réseaux d'échange de plus faibles ampleurs mais suppose que ces traditions et ces réseaux mis bout à bout relient ces régions dans un grand système transcontinental. Vandkilde (2019) estime alors par l'étude typologique d'artefacts scandinaves, que la globalisation de l'âge du bronze s'étendait largement à travers l'Afro-Eurasie, reliant des régions locales, régionales et supra-régionales par des réseaux de commerce et d'échange (Figure 280).

⁴⁰³ Le terme de « système monde » a été proposé par Kristiansen (1987) et Frank (1993) ; celui de « système monde préindustriel » par Ratnagar (2001) ; plus récemment c'est le terme de « globalisation » qui a été choisi par Sweeney (2016), Vandkilde (2019), Hudson *et al.* (2021) et Warburton (2023) ; le terme de « bronzization » (globalisation de l'âge du Bronze) lui est parfois préféré (Vandkilde, 2016 ; Daróczy, 2021).

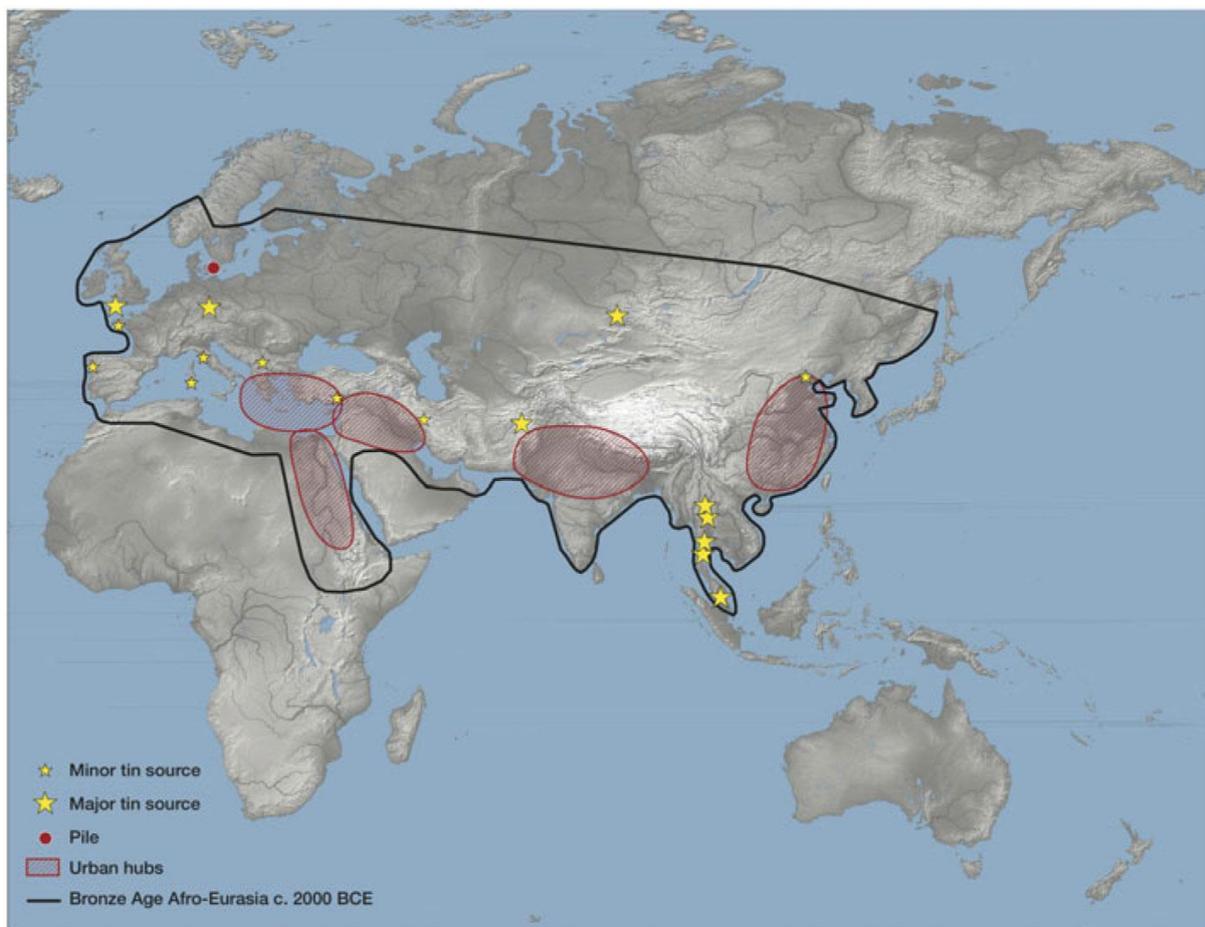


Figure 280 : Limites d'une « Hyper-région » afro-eurasiatique qui s'étendait de l'ouest du Pacifique aux côtes atlantiques à l'âge du Bronze. Source : Vandkilde, 2019.

Le premier argument qui remet en question l'existence d'une aire d'échange à l'échelle de l'Eurasie est que les échanges de cuivre et de plomb ne sont pas détectables au-delà de l'Europe de l'Ouest. En effet, malgré le fait que nous disposions de signatures de gisements lointains, nous ne parvenons pas à retrouver la signature de gisements du Moyen-Orient et de l'Oural dans des artefacts découverts en Europe. La raison de cette difficulté de percevoir les échanges à échelle subcontinentale pourrait être que les métaux pourraient avoir plus de chance d'être mélangés à mesure que les axes d'échange se croisent. L'hypothèse de Vandkilde (2019) d'un grand système monde Eurasiatique ne peut donc pas être confirmée par notre étude.

Les limites inhérentes aux recyclages et mélanges de sources et aux possibles similarités de signatures isotopiques nous rendent aveugles concernant les mélanges. Définir de quel possible mélange de sources un artefact proviendrait constitue un verrou analytique et plus encore statistique.

I/3 Perspectives : comment améliorer le tracé des axes d'exportation ?

I/3.a Reconnaissance des signatures correspondant à des mélanges

Une approche prometteuse pour résoudre ce problème a été proposée par Longman *et al.* (2018). Elle consiste à employer un modèle de mélange bayésien. Le modèle de mélange bayésien est une méthode statistique utilisée pour décomposer un mélange en ses sources constituantes, en intégrant des incertitudes sur les données et les estimations des sources. Cette approche est particulièrement utile lorsque les mélanges sont complexes et que les sources potentielles sont nombreuses et variées comme peuvent l'être les mélanges de sources de cuivre contenues dans un artefact. Elle demande cependant de présupposer les sources de métal pouvant constituer un artefact. Or, ce travail de thèse aborde précisément cette question. En effet, nous pouvons supposer qu'un artefact a de fortes chances de provenir d'une source située dans la ou les grandes régions d'échange où il a été découvert, ainsi que des régions connectées par de grands axes interrégionaux à ces grandes régions de production et d'échanges.

Ce type de traitement statistique pourrait donc constituer une piste prometteuse pour déterminer les provenances d'artefacts dont l'origine reste incertaine.

Prenons l'exemple des analyses isotopiques du plomb réalisées dans le cadre de cette thèse⁴⁰⁴ sur des artefacts datés d'après 1600 av. J.-C.⁴⁰⁵, et découverts respectivement à proximité de la Seine, de la Loire et de la Garonne.

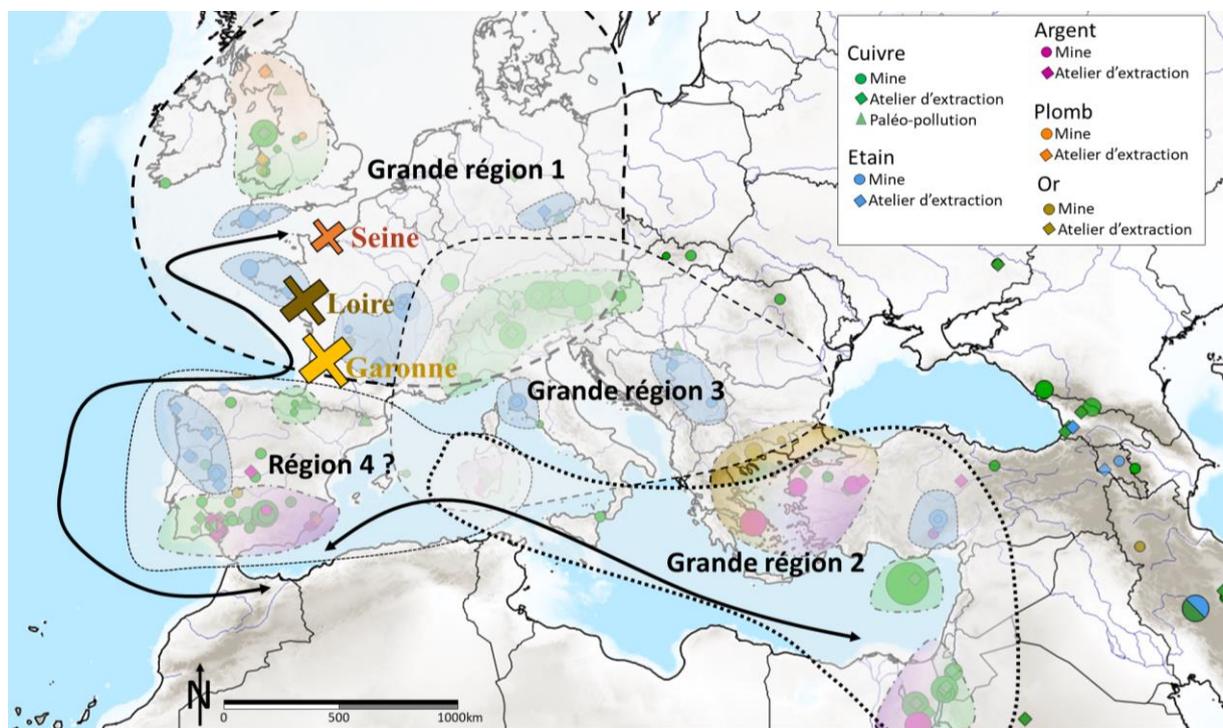


Figure 281 : Localisation des trois zones de découverte des artefacts analysés ainsi que des grandes régions de production et d'échange définies pour la fin de l'âge du Bronze.

⁴⁰⁴ Travail réalisé conjointement avec Kévin Costa à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP).

⁴⁰⁵ Période à laquelle les grandes régions d'échanges étaient établies.

L'étude de la provenance de ces artefacts n'a fourni aucun résultat clair pour la grande majorité d'entre eux. Une explication possible est que ces artefacts, découverts au cœur de la grande région 1 « Îles Britanniques, Scandinavie, Alpes » (Figure 281), pourraient correspondre à un mélange de cuivre provenant de différentes sources.

Les voies d'exportation que nous avons définies permettent de supposer que le cuivre composant les artefacts pourrait être issu de trois grandes régions :

- Région 1 : nord-ouest de l'Europe (Alpes, Pays de Galles, Scandinavie) ;
- Région 4 : zone ibérique (incluant les Pyrénées) ;
- Région 2 : est de la Méditerranée (Chypre, Levant, Égée).

Les résultats du modèle bayésien (Tableau 59) indiquent que, conformément à nos analyses précédentes, seuls de rares artefacts s'associent à une zone de production spécifique. De nombreuses provenances correspondent à des mélanges de sources provenant de la grande région 1 (c'est-à-dire des Alpes ou du Pays de Galles) avec des sources de la grande région 4 (la péninsule Ibérique⁴⁰⁶). Ces mélanges indiquent que :

- La péninsule Ibérique exporte du cuivre vers le nord en suivant l'axe atlantique ;
- Des alliages avec du cuivre issu de la grande zone 4 se produisent rapidement au contact de la grande zone 1 (au moins dès l'embouchure de la Garonne).

Le cuivre produit en péninsule Ibérique, dans les Alpes et au Pays de Galles, serait régulièrement mélangé dans les ateliers d'élaboration de la façade atlantique. Le cuivre extrait dans l'Est méditerranéen n'est, en revanche, quasiment jamais inclus dans les mélanges, ce qui prouverait le caractère exceptionnel des importations en provenance de l'est de la Méditerranée vers la façade atlantique.

⁴⁰⁶ Nous n'avons, en revanche, trouvé aucun apport de cuivre des Pyrénées, ce qui est probablement dû au faible nombre d'analyses de minerais disponibles pour cette région.

Site	Interprétation bayésienne	Alpes			P. de Galles	Péninsule Ibérique			Est Méditerranée			
		Alpes Ouest	Centre Alpes	Tyrol		Py Belt	Linares	SE Pibé	Chypre	Feinan	Timna	
Loire	P. des Mauves	Ibérique + Alpes (+ Chypre)	41%	0%	0%	1%	1%	44%	2%	11%	0%	1%
	P. des Mauves	Ibérique + Galles	0%	0%	0%	11%	89%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique + Galles	0%	0%	0%	10%	90%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Alpes	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique	0%	0%	0%	3%	97%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique	0%	0%	0%	3%	97%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique + Galles	0%	0%	0%	17%	82%	0%	0%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique + Alpes + Galles	28%	0%	0%	16%	9%	45%	1%	0%	0%	0%
	P. des Mauves	Ibérique	0%	0%	0%	9%	91%	0%	0%	0%	0%	0%
	Nivillac	Ibérique + Galles	0%	2%	0%	33%	65%	0%	0%	0%	0%	0%
	Nivillac	Ibérique + Alpes (+ Levant)	0%	43%	0%	3%	42%	0%	0%	0%	10%	1%
	Nivillac	Ibérique + Alpes + Galles	0%	28%	0%	12%	60%	0%	0%	0%	0%	0%
	chapelle Glain	Ibérique + Galles	8%	0%	0%	41%	42%	9%	0%	0%	0%	0%
	chapelle Glain	Ibérique + Galles	8%	0%	0%	40%	44%	9%	0%	0%	0%	0%
	chapelle Glain	Ibérique + Alpes + Galles	0%	20%	0%	17%	62%	0%	0%	0%	0%	0%
	chapelle Glain	Ibérique + Galles	3%	0%	0%	43%	51%	4%	0%	0%	0%	0%
	Doué la Fontaine	Ibérique + Alpes + Galles	0%	16%	0%	19%	65%	0%	0%	0%	0%	0%
	Doué la Fontaine	Ibérique + Alpes Galles	0%	11%	0%	22%	67%	0%	0%	0%	0%	0%
	F.-Mâchelles	Alpes + ibérique	0%	53%	0%	4%	41%	0%	0%	0%	2%	1%
	F.-Mâchelles	Ibérique + Alpes	0%	32%	0%	8%	59%	0%	0%	0%	0%	0%
Garonne	Moulin Neuf	Ibérique + Alpes	33%	1%	0%	16%	7%	40%	2%	0%	0%	1%
	M. de la Prade	Ibérique + Alpes + Chypre	33%	0%	0%	0%	0%	24%	11%	31%	0%	0%
	M. de la Prade	Ibérique + Alpes	40%	1%	0%	8%	3%	45%	3%	0%	0%	1%
	Moulin Neuf	Ibérique + Alpes	39%	0%	0%	9%	3%	45%	3%	0%	0%	1%
	Pauillac	Alpes + ibérique	0%	76%	0%	5%	18%	0%	0%	0%	0%	0%
	Ygos	Alpes + ibérique	0%	59%	0%	11%	30%	0%	0%	0%	0%	0%
	Pauillac	Alpes + ibérique	0%	69%	0%	6%	24%	0%	0%	0%	0%	0%
	Pauillac	Alpes + ibérique	0%	69%	0%	7%	24%	0%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	89%	0%	1%	9%	0%	0%	0%	0%	1%
	Martillac	Ibérique + Alpes	42%	1%	0%	8%	3%	41%	4%	0%	0%	1%
	Martillac	Ibérique (+ Alpes)	9%	0%	3%	0%	0%	0%	87%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	66%	0%	9%	23%	0%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	69%	0%	9%	21%	1%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	69%	0%	8%	22%	0%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique (+ Galles)	0%	55%	0%	15%	30%	1%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	85%	0%	2%	12%	0%	0%	0%	0%	0%
	St Germain	Alpes + ibérique	0%	63%	0%	10%	27%	0%	0%	0%	0%	0%
St Germain	Alpes + ibérique	0%	77%	0%	7%	15%	1%	0%	0%	0%	0%	
Seine	Port-en-Bessin	Ibérique + Alpes	37%	1%	0%	11%	4%	44%	3%	0%	0%	1%
	Blainville/Orne	Alpes + ibérique	10%	69%	0%	6%	4%	10%	0%	0%	0%	0%
	Caen	Ibérique + Galles	2%	0%	0%	53%	42%	3%	0%	0%	0%	0%

Tableau 59 : Mélanges de sources estimés en utilisant un modèle bayésien (précision globale du modèle : 0,69) appliqué aux signatures d'artefacts découverts à proximités de fleuves en façade atlantique.

Des traitements de ce type pourraient être étendus à une échelle plus large et mériteraient d'être systématisés pour analyser des milliers d'artefacts dont la signature ne correspond pas clairement à une zone de production⁴⁰⁷. Beaucoup de travail reste à faire pour déterminer dans quelle mesure le recyclage est important au sein d'une même grande région d'échange et à quelle fréquence les importations de cuivre en provenance de l'est de la Méditerranée et du Proche-Orient atteignent l'Europe de l'Ouest. La présence de recyclages mériterait également d'être posée aux périodes plus anciennes où les zones de production sont plus nombreuses.

Enfin, si nous cette piste nous permet de mieux tracer les échanges à très grande distance en Europe, déterminer s'il existe une connexion par réseaux segmentés à l'échelle de l'Eurasie comme le suppose Vandkilde nécessite de disposer de signatures de gisements à grande échelle. Pour cela, il est crucial d'analyser des gisements de cuivre situés en Asie (notamment du Sud-Est) et de définir des grandes régions échangeant préférentiellement entre elles dans ces nouveaux secteurs ce qui représente un travail colossal.

⁴⁰⁷ Nous n'avons pu déterminer une provenance « fiable » que pour environ un tiers des artefacts.

I/3.b Nécessité de réaliser des analyses dans des régions ciblées

Si le nombre d'artefacts analysés en isotopie du plomb est conséquent, il serait important de réaliser des analyses d'artefacts cuivreux dans des régions où peu de données ont été publiées (notamment l'Espagne, la France et l'Allemagne, mais aussi les îles du centre de la Méditerranée pour les périodes les plus anciennes). La couverture de l'Europe serait alors plus complète, ce qui permettrait de confirmer des axes d'export supposés par l'ajout d'un faible nombre d'artefacts analysés. Il est également important que les analyses isotopiques du plomb soient accompagnées d'informations typologiques précises et, plus encore, de données analytiques concernant les compositions élémentaires. Si nous avons disposé de ces données, nous aurions pu envisager un traitement de statistiques multivariées regroupant l'ensemble de ces informations (notamment une ACM permettant de traiter des données qualitatives et quantitatives) et ainsi affiner le modèle proposé.

Toutefois, l'une des principales limites du tracé des axes d'exportation⁴⁰⁸ concerne l'hétérogénéité des signatures des minerais de plusieurs régions. Si certaines provenances sont assez clairement définies, d'autres, à l'image des productions britanniques, demeurent très hypothétiques du fait de la dispersion des signatures de minerais. Réaliser de nouvelles analyses de gisements (en prenant en compte les contextes géologiques) dans ces régions pourrait permettre de mieux identifier ces provenances. On peut regretter que les dynamiques de recherche depuis 40 ans aient clairement fait augmenter le nombre d'artefacts analysés bien plus rapidement que le nombre de gisements analysés. Or, caractériser des minerais exploités durant la Protohistoire (et plus généralement aux périodes anciennes) pourrait permettre de définir des provenances pour une partie des 60 % d'artefacts pour lesquels aucune provenance ne peut être supposée (« x » et « gris »). Cette multiplication des données de signatures de minerais risque probablement de créer de nouveaux *overlaps* et donc de modifier des provenances précédemment supposées⁴⁰⁹ mais ne pourrait offrir qu'une vision plus juste des échanges, car elle permettrait de prendre en compte l'ensemble des zones minières en exploitation durant la Protohistoire.

Pourtant, même en disposant d'un jeu de signatures plus précis et plus complet, les études de provenances présenteront toujours des limites, en grande partie du fait de possibles recyclages des objets. La connaissance des aires possibles de diffusion des métaux couplée à l'emploi de modèles bayésiens pourrait alors constituer une piste pour l'identification de mélanges.

Enfin, d'autres pistes de recherche pourraient être couplées aux analyses isotopiques du plomb et permettraient de mieux définir les grands axes d'échange.

I/3.c Des développements géochimiques pour affiner les hypothèses de provenance

Les progrès en matière d'analyse des matériaux ont été fulgurants ces 20 dernières années et de nombreuses analyses géochimiques pourraient être menées en complément de l'isotopie du plomb.

L'analyse des teneurs en éléments traces pourrait constituer une piste de recherche efficace afin de définir certaines provenances. En effet, certains éléments traces sont caractéristiques de certains types

⁴⁰⁸ Et, plus généralement, du traçage de source utilisant uniquement les isotopes du plomb.

⁴⁰⁹ Les provenances supposées ne peuvent pas être considérées comme parfaitement fiables du fait de l'absence de caractérisation de nombreuses zones minières.

de gisements de cuivre⁴¹⁰. Par exemple, les chalcopyrites issues de gisements ultramafiques contiennent du nickel sous forme de traces alors que cet élément est absent des gisements hydrothermaux (pour plus de détails concernant les éléments traces associés aux différents types de gisements de cuivre, voir George *et al.*, 2018 ; Marfin *et al.*, 2020 ; Torró *et al.*, 2022 et Caraballo *et al.*, 2022). Deux grandes régions de production pourraient donc posséder des signatures isotopiques très proches, mais produire du cuivre contenant des éléments traces très différents.

Ces analyses mériteraient d'être menées sur les artefacts analysés en isotopie du plomb, mais également sur les minerais analysés et les scories afin de définir quels éléments pourraient être perdus lors des processus métallurgiques. Dans la péninsule Ibérique, Murillo-Barroso *et al.* (2019) ont analysé des éléments traces de minerais en complément des compositions isotopiques. Cela offre des pistes de recherche novatrices à condition de définir quels sont les éléments conservés suite aux processus métallurgiques, soit quels éléments sont conservés depuis les minerais vers le métal final.

Nous pourrions également améliorer le tracé des axes d'exports à l'aide des isotopes du cuivre. Ces derniers se fractionnent dans l'environnement proche de la surface, de sorte que les minerais oxydés peuvent être différenciés des minerais des sulfures qui se trouvent à une profondeur plus importante. La quantification du ⁶⁵Cu permet de définir si le cuivre contenu dans l'artefact a été extrait de minéraux primaires (dont ⁶⁵Cu est négatif) ou secondaires (dont ⁶⁵Cu est positif) (Larson *et al.*, 2003 ; Markl *et al.*, 2006 ; Asael *et al.*, 2007 ; Klein *et al.*, 2009 ; Powell *et al.*, 2017). Ce type d'analyse permet d'affiner la datation de la transition entre la métallurgie réductrice à faible température et le couplage grillage-réduction des sulfures de cuivre (Powell *et al.*, 2017). Les isotopes du plomb pourraient également aider à confirmer certaines hypothèses de provenance (Artioli *et al.*, 2008 ; Jansen *et al.*, 2018 ; Reguera-Galan *et al.*, 2019 ; Klein et Rose, 2020) car nous connaissons les types de minerais principalement extraits dans les régions productrices de cuivre.

Si nous possédons des pistes pour améliorer la détermination de la provenance du cuivre, intéressons-nous maintenant à l'étain contenu dans les bronzes. Identifier la provenance de l'étain permettrait de retracer ses propres circuits d'échanges⁴¹¹ mais cela représente encore un défi scientifique. En effet, les éléments traces de l'étain ne constituent pas de bons marqueurs (Canovaro, 2015 p108-109 ; Berger *et al.*, 2019)⁴¹² et il en est de même pour le ¹²⁶Sn. Utilisé seul, cet isotope de l'étain semble d'un intérêt limité, car :

- Les minéralisations européennes présentent des signatures très similaires (Berger *et al.*, 2019 ; John *et al.*, 2019)⁴¹³ ;

⁴¹⁰ Si de l'étain est ajouté au cuivre, la composition en éléments traces ne sera que peu modifiée, car les minerais d'étain ne présentent pas les mêmes éléments traces que les minerais de cuivre (voir Wang *et al.* 2022 pour plus de détails). En revanche, si du plomb ou du zinc sont ajoutés comme élément d'alliage, la similarité des éléments traces présents dans ces minéraux et dans les minerais cuivreux ne permettrait pas une telle approche.

⁴¹¹ Nous les supposons probablement proches de ceux du cuivre sans pouvoir clairement appuyer cette hypothèse par des données analytiques.

⁴¹² L'étain métal rejette des éléments sous forme d'oxydes qui ne sont pas complètement solubles (par exemple Fe et Mn) dans son réseau cristallin.

⁴¹³ Cela n'est pas lié au fait que les gisements sont de même âge : le ¹²⁶Sn est l'isotope de l'étain à la demi-vie la plus longue : 100 000 ans. Une région minière donnée est donc susceptible de présenter des compositions isotopiques très variables car héritées des granites contenant les cassitérites et que ces dernières peuvent présenter un fractionnement au cours de la genèse du minéral (John *et al.*, 2019).

- Les rapports isotopiques de l'étain sont modifiés par les processus métallurgiques et varient selon les températures de fusion (Berger *et al.*, 2018 et 2019).

Coupler l'étude des isotopes du plomb, de l'étain et des éléments traces liés à l'étain dans des artefacts pourrait en revanche permettre d'émettre des hypothèses de provenance pour l'étain (Berger *et al.*, 2022 et 2023).

Ces données issues de l'analyse des circuits du métal pourraient être confrontées aux mouvements de population révélés par les progrès en matière d'analyses isotopiques du strontium (Reiter et Frei, 2021) et plus encore, par l'ADN ancien. Bien que les raisons des mouvements de population ne soient pas toujours liées à des motifs économiques et techniques, combiner ces informations avec les études de provenance des métaux nous permettrait de confirmer l'existence de connexions fortes entre des sociétés éloignées dans certaines régions (en particulier en Europe centrale et en Méditerranée) et de mouvements plus restreints géographiquement dans d'autres.

Conclusion générale

Il y a maintenant plus d'un siècle, le cours de Jullian (1910) débutait ainsi : « Une grande découverte faite par les hommes, qui devait transformer peu à peu les conditions matérielles de leur vie, la découverte du métal. Elle inaugure dans les destinées de notre pays une nouvelle période, qu'on a appelée âge du Bronze ». Nous partons d'un prérequis historique que l'économie du métal s'inscrit pleinement dans l'économie des sociétés. Or, si le rôle des métaux et notamment du cuivre est indéniable, il ne faut pas perdre de vue que leur étude ne permet sûrement pas de restituer l'ensemble des ressources produites, consommées et échangées sur de grandes distances.

Ce travail de recherche offre cependant une vision inédite des zones minières en activité et des échanges liant des populations protohistoriques distantes à l'échelle de l'Europe et d'une partie du Proche-Orient. Il est innovant car il part des informations minières, s'appuie sur des milliers de données de signatures isotopiques et des traitements statistiques multivariés et permet un regard sur la fiabilité des résultats.

Le recensement des zones d'exploitation de métaux entre 5000 et 800 av. J.-C. jusqu'alors inexploré avec un degré de précision important permet de redessiner les contours des zones d'où partent les échanges, de définir quelles étaient les régions les plus productrices de métaux, ainsi que d'établir de grandes périodes d'ouverture et de fermeture des mines.

Bien que le nombre de sites aurifères identifiés reste insuffisant pour formuler des hypothèses solides quant à leur évolution géographique et quantitative, il en va autrement pour les exploitations d'étain, de plomb/argent et, surtout, de cuivre. Les cartes de répartition des mines montrent qu'elles sont abondantes sur le pourtour méditerranéen dès le IV^e millénaire av. J.-C. et que le nombre de mines a été multiplié par 5 au milieu du III^e millénaire. Des exploitations étaient dès lors présentes dans l'ensemble de l'Europe et employaient une diversité importante de techniques minières et métallurgiques. Cependant, un changement important et progressif semble s'opérer au début du Bronze moyen (vers 1600 av. J.-C.). Les zones d'exploitation ont été moins nombreuses et moins uniformément réparties en Europe. De grandes zones de production dédiées à l'exploitation d'un métal se sont mises en place.

L'étude des sites d'extraction du cuivre, constituant le corpus le plus complet dont nous disposons, révèle des disparités régionales dans les pratiques d'extraction. Les techniques utilisées dépendaient en grande partie de la géologie locale, mais on doit reconnaître que des exploitations aux dimensions et aux processus très différents coexisteraient au sein même des grandes zones de production. Le modèle traditionnellement proposé d'une spécialisation croissante des tâches, qui aurait impliqué une homogénéisation des pratiques dans un objectif d'une production plus rentable économiquement, semble contredit par la persistance d'une grande diversité des pratiques minières tout au long de la Protohistoire.

Si des critères d'ordre géologique et environnemental (tels que la disponibilité des ressources) pourraient expliquer pourquoi certains types de gisements étaient exploités de manière préférentielle, des motivations socio-économiques constituaient probablement le moteur des échanges. Il est donc nécessaire de tenter de suivre le trajet des productions si l'on souhaite percevoir la dimension commerciale dans laquelle s'inscrivent la production et l'échange des métaux.

La compilation et la comparaison de signatures isotopiques du plomb constituent pour cela un outil précieux. La compilation d'un corpus à l'échelle de l'Europe et du Proche-Orient n'avait jusqu'alors jamais été entreprise.

La prise en compte de signatures de minerais issues de publications archéologiques comme géologiques offre une couverture très satisfaisante des gisements de l'ouest de l'Eurasie même si certaines zones minières en activité durant la Protohistoire sont peu ou pas caractérisées. Comparer ces données de gisements à plusieurs milliers d'artefacts dont les datations ont été homogénéisées a nécessité l'élaboration d'un traitement statistique adapté à un corpus de plusieurs milliers d'analyses. Ce traitement était nécessaire pour dépasser les limites régulièrement citées pour ce type d'analyse de provenance, en particulier les ressemblances importantes de signatures isotopiques du plomb de gisements pourtant distants de plusieurs milliers de kilomètres.

À partir des correspondances identifiées par les statistiques multivariées, des cartes d'export des productions ont pu être tracées. Elles indiquent la possible existence de mines encore à découvrir et confirment la place centrale des grandes zones de production précédemment identifiées dans les échanges de cuivre. De grands axes d'export du cuivre se mettraient en place au III^e millénaire, donnant lieu à des circuits d'échanges qui semblent pérennes sur le temps long. Le plomb produit emprunterait ces mêmes grands réseaux et il pourrait en être de même pour l'étain.

Si les productions de cuivre parcourent des distances très importantes, elles ne semblent que rarement dépasser 2000 km et rester dans de grandes aires d'influences intracontinentales. Plusieurs de ces aires peuvent être clairement définies et deux d'entre elles sont particulièrement nettes : le nord-ouest de l'Europe (reliant les îles Britanniques, les Alpes et la Scandinavie) et le sud-est méditerranéen (incluant le Levant, l'île de Chypre, l'ouest de l'Anatolie, le pourtour égéen et le nord des Balkans). D'autres axes d'échange relieraient la péninsule Ibérique à l'ouest de la Méditerranée et aux îles Britanniques.

Les axes d'échanges à très grande distance (transitant dans l'ensemble de l'axe « atlantique » ou de l'espace méditerranéen) ne peuvent pas être précisément retracés en recherchant une provenance unique aux métaux constituant les artefacts. Cependant, l'utilisation d'un modèle de mélanges bayésiens permet de définir l'existence de mélanges de sources. Les échanges pourraient donc clairement atteindre des distances supérieures à 2000 km que nous percevons mal car le cuivre de plusieurs zones minières se mélangeait régulièrement au contact des grands couloirs d'exportation de métaux.

Il est toutefois certain que du cuivre, du plomb, de l'étain et certainement bien d'autres ressources transitaient dans chacune des grandes régions que nous avons définies. L'arrêt de l'exploitation du cuivre au profit de nouvelles activités (exploitation d'autres métaux, production d'autres ressources ou d'objets finis) pourrait en partie s'expliquer par une compétitivité accrue entre régions minières. Toutefois, le fait que les régions ayant cessé d'exploiter le cuivre soient connectées à d'autres régions produisant cette ressource permet de poser l'hypothèse de relations de confiance entraînant une possible fragilité des sociétés en cas de rupture du lien commercial.

Ainsi, ce travail présente la volonté d'apporter un regard nouveau sur les études de provenance en cherchant non pas à partir des produits finis, mais en revenant à leurs sources et en considérant la possible existence de recyclages, jusqu'alors régulièrement rejetée dans la littérature existante.

Trop peu de cartes de localisation des mines existaient avant notre travail. Or, il est primordial de connaître précisément les lieux de production possibles pour définir les sources probables d'un

artefact. Au commencement de cette thèse, aucune base de données de signatures de gisements ne regroupait autant de données. Les analyses de provenances doivent pourtant s'appuyer sur un maximum de données isotopiques. Enfin, si des traitements statistiques avaient déjà été développés dans le but d'améliorer les études de provenance, ces derniers n'étaient que peu employés. Ce n'est pourtant que par l'usage de statistiques multivariées que l'on parvient à contourner en grande partie le problème des similarités de signatures qui constitue l'un des freins les plus importants à l'interprétation des signatures isotopiques du plomb.

L'étude des mines et de leur production fait encore trop souvent défaut. Ces fouilles sont complexes à conduire et les enjeux ne sont pas toujours bien compris par la communauté des archéologues. Trouver des financements pour analyser des minerais est également nécessaire et induit des budgets importants. La qualité des prédictions de provenance des artefacts repose cependant sur ces données. Nous ne voudrions toutefois pas noircir le tableau. Depuis quelques années, nous assistons à une nouvelle dynamique de recherche en archéologie minière en Europe de l'Ouest. Des régions au potentiel minier jusqu'alors inconnu se révèlent, en particulier pour l'étain. Le panorama que nous avons des exploitations anciennes devient de plus en plus complet. L'emploi de nouvelles technologies (Lidar ou encore prospections géochimiques avec un XRF portable, Figure 282) permettra de retrouver d'anciens sites d'extraction.

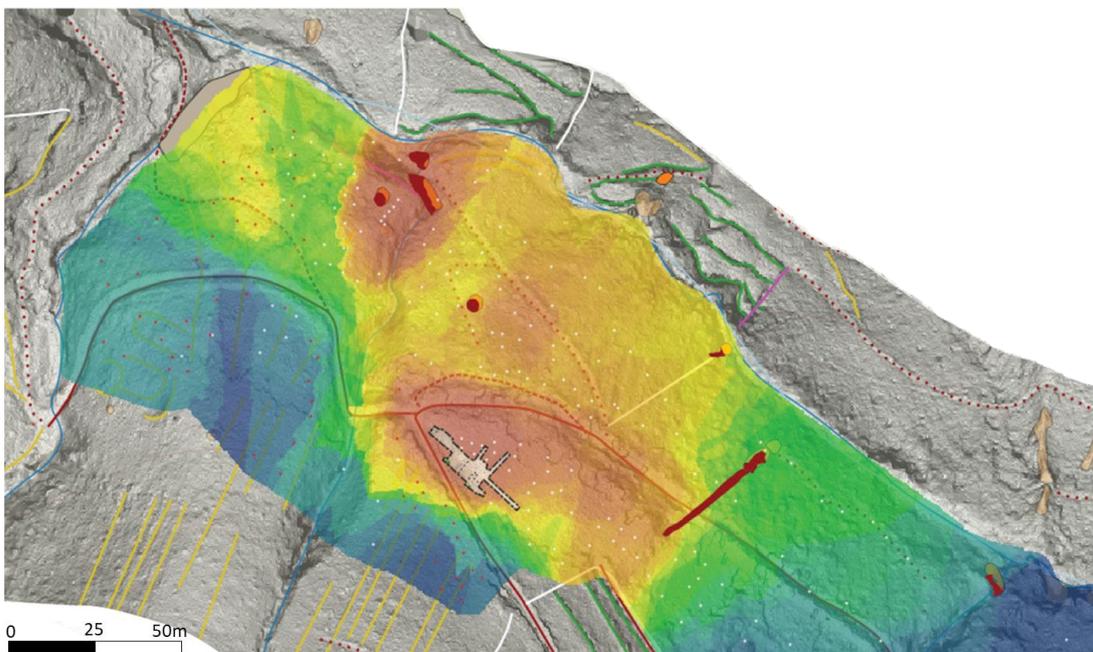


Figure 282 : Relevés LiDAR et analyse géochimique (pXRF) de sols à l'échelle d'une vallée (travaux menés dans le cadre du PCR Le Minier, Aveyron). Les teneurs de surface en plomb (chaque point blanc correspond à un dosage pXRF) ont révélé l'existence de haldes aujourd'hui recouvertes, de tranchées minières (en rouge) et d'un atelier de minéralurgie où les minerais étaient concassés.

Les méthodes d'analyses deviennent également de plus en plus précises. Le développement de puissants spectromètres de masse à ablation laser (LA-MC-ICPMS) devrait faciliter les analyses isotopiques du plomb en réduisant les temps et les coûts d'analyses. La systématisation de la quantification d'un nombre important d'éléments traces ou encore le développement de l'étude de nouveaux isotopes pourront venir conforter les hypothèses de provenances formulées. Enfin, la démocratisation des scanners 3D permettra de définir plus clairement la typologie des objets. Ces études sont très prometteuses et permettront peut-être à terme de tracer des écoles d'ateliers et leur manière même de travailler.

Références bibliographiques

- Abdalla, H.I., 2022. A Brief Comparison of K-means and Agglomerative Hierarchical Clustering Algorithms on Small Datasets, in: Qian, Z., Jabbar, M.A., Li, X. (Eds.), *Proceeding of 2021 International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Nature, Singapore, pp. 623–632. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_64
- Abdel-Motelib, A., Bode, M., Hartmann, R., Hartung, U., Hauptmann, A., Pfeiffer, K., 2012. Archaeometallurgical expeditions to the Sinai Peninsula and the Eastern Desert of Egypt (2006, 2008). *Metalla* 19, 3–59.
- Addis, A., Angelini, I., Nimis, P., Artioli, G., 2016. Late Bronze Age Copper Smelting Slags from Luserna (Trentino, Italy): Interpretation of the Metallurgical Process. *Archaeometry* 58, 96–114. <https://doi.org/10.1111/arc.12160>
- Aftabi, A., Ghodrati, Z., MacLean, W.H., 2006. Metamorphic textures and geochemistry of the Cyprus-type massive sulfide lenses at Zurabad, Khoy, Iran. *J. Asian Earth Sci.* 27, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.06.001>
- Alarashi, H., Borrell, F., 2020. The variscite ornaments of Gavà (Barcelona), in: Alarashi, H., Dessì, R.M. (Eds.), *L'art Du Paraître: Apparences de l'humain, de La Préhistoire à Nos Jours*. Presented at the 40es rencontres internationales d'archéologie et d'histoire, Éditions APDCA, Nice, pp. 109–125.
- Albarède, F., Blichert-Toft, J., Gentelli, L., Milot, J., Vaxevanopoulos, M., Klein, S., Westner, K., Birch, T., Davis, G., de Callatay, F., 2020. A miner's perspective on Pb isotope provenances in the Western and Central Mediterranean. *J. Archaeol. Sci.* 121, 105194. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105194>
- Albarède, F., Desauty, A.-M., Blichert-Toft, J., 2012. A geological perspective on the use of Pb isotopes in Archaeometry. *Archaeometry* 54, 853–867. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00653.x>
- Albarède, F., Telouk, P., Blichert-Toft, J., Boyet, M., Agranier, A., Nelson, B., 2004. Precise and accurate isotopic measurements using multiple-collector ICPMS 1 Associate editor: Y. Amelin. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 2725–2744. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.11.024>
- Alcalde, G., Molist, M., Montero, I., Planagumà, L., Saña, M., Toledo, A., 1998. Producciones metalúrgicas en el nordeste de la Península Ibérica durante el III milenio cal. *AC: el taller de la Bauma del Serrat del Pont (Tortellà, Girona)*. *Trab. Prehist.* 55, 81–100. <https://doi.org/10.3989/tp.1998.v55.i1.318>
- Allan, M., Pinti, D.L., Ghaleb, B., Verheyden, S., Mattielli, N., Fagel, N., 2018. Reconstruction of Atmospheric Lead Pollution During the Roman Period Recorded in Belgian Ombrotrophic Peatlands Cores. *Atmosphere* 9, 253. <https://doi.org/10.3390/atmos9070253>
- Allen, M.J., 2012. Is There a British Chalcolithic? : People, Place and Polity in the later Third Millennium. *There Br. Chalcolithic* 1–336.
- Allentoft, M.E., Sikora, M., Sjögren, K.-G., Rasmussen, S., Rasmussen, M., Stenderup, J., Damgaard, P.B., Schroeder, H., Ahlström, T., Vinner, L., Malaspinas, A.-S., Margaryan, A., Higham, T., Chivall, D., Lynnerup, N., Harvig, L., Baron, J., Casa, P.D., Dąbrowski, P., Duffy, P.R., Ebel, A.V., Epimakhov, A., Frei, K., Furmanek, M., Gralak, T., Gromov, A., Gronkiewicz, S., Grupe, G., Hajdu, T., Jarysz, R., Khartanovich, V., Khokhlov, A., Kiss, V., Kolář, J., Kriiska, A., Lasak, I., Longhi, C., McGlynn, G., Merkeveicius, A., Merkyte, I., Metspalu, M., Mkrtychyan, R., Moiseyev, V., Paja, L., Pálfi, G., Pokutta, D., Pospieszny, Ł., Price, T.D., Saag, L., Sablin, M., Shishlina, N., Smrčka, V., Soenov, V.I., Szeverényi, V., Tóth, G., Trifanova, S.V., Varul, L., Vicze, M., Yepiskoposyan, L., Zhitenev, V., Orlando, L., Sichert-Pontén, T., Brunak, S., Nielsen, R., Kristiansen, K., Willerslev, E., 2015. Population genomics of Bronze Age Eurasia. *Nature* 522, 167–172. <https://doi.org/10.1038/nature14507>

- Almodóvar, G.R., Yesares, L., Sáez, R., Toscano, M., González, F., Pons, J.M., 2019. Massive Sulfide Ores in the Iberian Pyrite Belt: Mineralogical and Textural Evolution. *Minerals* 9, 653. <https://doi.org/10.3390/min9110653>
- Amal, J., Bocquet, A., Robert, A., Verraes, G., 1979. La naissance de la métallurgie dans le sud-est de la France, in: *Proceedings of the Fifth Atlantic Colloquium*. Dublin, pp. 35–63.
- Ambert, P., 1999. Grandeurs et décadences des exploitations de cuivre de Cabrières (Hérault) entre néolithique et moyen âge. *Pallas* 50, 391–404. <https://doi.org/10.3406/palla.1999.1565>
- Ambert, P., Barge-Mahieu, H., Bourhis, J., Espérou, J.-L., 1984. Mines de cuivre préhistoriques de Cabrières (Hérault), premiers résultats. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 81, 83–88. <https://doi.org/10.3406/bspf.1984.8616>
- Ambert, P., Bouquet, L., Guendon, J.-L., Mischka, D., 2005. La Capitelle du Broum (district minier de Cabrières-Péret, Hérault) : établissement industriel de l'aurore de la métallurgie française (3100-2400 BC), in: *La Première Métallurgie En France et Dans Les Pays Limitrophes*. Presented at the Actes du colloque international de Carcassonne, Société Préhistorique Française, Carcassonne, 2002, pp. 71–81.
- Amzallag, N., 2009. From Metallurgy to Bronze Age Civilizations: The Synthetic Theory. *Am. J. Archaeol.* 113, 497–519. <https://doi.org/10.3764/aja.113.4.497>
- Ancel, B., 1997. La mine de cuivre des Closis à St Véran : apports des sources écrites et relevés des travaux protohistoriques souterrains. *Archéologie En Languedoc* 21, 121–128.
- Ancel, B., Carre, R., Kammenthaler, É., 2006. La mine de cuivre des Clausis à Saint Véran. *Cah. Château St.-Jean* 3–65.
- Ancel, B., Favier-Cauvin, S., 2021. The Vallauria Mine - Silver mine in the Mercantour. *Visit. Guide - Neige Merveilles* 32.
- Ancel, B., Py, V., 2008. L'abattage par le feu : une technique minière ancestrale. *Archéopages* 34–41.
- Ancel, B., Py, V., Kammenthaler, E., Leleu, V., Marconnet, C., 2010. Une mine de plomb argentifère dans un environnement montagnard. *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 203–220. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2771>
- Anders G. Nord, Billström, K., 2018. Isotopes in cultural heritage: present and future possibilities. *Herit. Sci.* 6, 25. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0192-3>
- Angelini, I., Vidale, M., 2020. The Bronze age amber industry in northern Italy in light of high-resolution 3D imaging. *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 237–249. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.8024>
- Anguilano, L., 2012. Roman Lead Silver Smelting at Rio Tinto - the Case Study of Corta Lago (PhD Thesis). University College London.
- Anguilano, L., Rehren, T., Müller, W., Rothenberg, B., 2010. The importance of lead in the silver production at Riotinto (Spain). L'importance du plomb dans la production d'argent à Riotinto (Espagne). *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 269–276. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2833>
- Antonović, D., Vukadinovic, M., 2012. Eneolithic mine Prljusa: Mali Sturac archaeological and geophysical investigations. *Starinar* 2012, 95–106. <https://doi.org/10.2298/STA1262095A>
- Aracena, A., Véliz, M., Jerez, O., Balladares, E., Pérez-Tello, M., 2023. An Overview of the Behavior of Concentrates with Arsenic, Antimony, and Bismuth under Roasting Conditions. *Minerals* 13, 942. <https://doi.org/10.3390/min13070942>
- Arndt, N., Ganino, C., 2009. Ressources minérales : Nature, origine et exploitation. Cours et exercices corrigés. Dunod.

- Artemyev, D.A., Ankushev, M.N., 2019. Trace Elements of Cu-(Fe)-Sulphide Inclusions in Bronze Age Copper Slags from South Urals and Kazakhstan: Ore Sources and Alloying Additions. <https://doi.org/10.20944/preprints201910.0011.v1>
- Artignan, D., Cottard, F., 2003. Eléments à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM) (Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2003-DEPY01 No. BRGM/RP-52049-FR). BRGM.
- Artioli, G., Angelini, I., Burger, E., Bourgarit, D., Colpani, F., 2007. Petrographic and chemical investigations of the earliest copper smelting slags in Italy, in: *Proceedings of the Second International Conference. Presented at the Archaeometallurgy in Europe, Milan*, pp. 12–20.
- Artioli, G., Angelini, I., Kaufmann, G., Canovaro, C., Dal Sasso, G., Villa, I.M., 2017. Long-distance connections in the Copper Age: New evidence from the Alpine Iceman's copper axe. *PLoS ONE* 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179263>
- Artioli, G., Angelini, I., Nimis, P., Addis, A., Villa, I., 2014. Prehistoric copper metallurgy in the Italian Eastern Alps: Recent results. *Hist. Metall.* 47, 51–59.
- Artioli, G., Angelini, I., Nimis, P., Villa, I.M., 2016. A lead-isotope database of copper ores from the Southeastern Alps: A tool for the investigation of prehistoric copper metallurgy. *J. Archaeol. Sci.* 75, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.09.005>
- Artioli, G., Angelini, I., Tecchiati, U., Pedrotti, A., 2015. Eneolithic copper smelting slags in the Eastern Alps: Local patterns of metallurgical exploitation in the Copper Age. *J. Archaeol. Sci.* 63, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.08.013>
- Artioli, G., Baumgarten, B., Marelli, M., Giussani, B., Recchia, S., Nimis, P., Giunti, I., Angelini, I., Omenetto, P., 2008. Chemical and isotopic tracers in Alpine copper deposits: geochemical links between mines and metal. *Geo Alp* 5, 139–148.
- Artioli, G., Canovaro, C., Nimis, P., Angelini, I., 2020. LIA of Prehistoric Metals in the Central Mediterranean Area: A Review. *Archaeometry* 1–33. <https://doi.org/10.1111/arc.12542>
- Artzy, M., 2006. The Carmel Coast during the Second Part of the Late Bronze Age: A Center for Eastern Mediterranean Transshipping. *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 343, 45–64. <https://doi.org/10.1086/BASOR25066964>
- Asael, D., Matthews, A., Bar-Matthews, M., Halicz, L., 2007. Copper isotope fractionation in sedimentary copper mineralization (Timna Valley, Israel). *Chem. Geol.* 243, 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.06.007>
- Atef, A., Surour, A.A., Madani, A.A., Azer, M.K., 2023. Au-Cu Resources in Some Mines from Antiquity in the South Gabal Um Monqul and Gabal Al Kharaza Prospects, North Eastern Desert, Egypt. *Geosciences* 13, 283. <https://doi.org/10.3390/geosciences13090283>
- Atzeni, C., Massidda, L., Sanna, U., 2005. Investigation and Results, in: *Archaeometallurgy in Sardinia. Monographies instrumentum*, pp. 115–184.
- Atzeni, C., Massidda, L., Sanna, U., Viridis, P., 1990. Notes on lead metallurgy in Sardinia during the Nuragic period. *Hist. Metall.* 24, 97–105.
- Aubert, C., 1992. La période pré-phénicienne en Péninsule ibérique: relations avec la Méditerranée centrale. *Mélanges Casa Velázquez* 28, 7–18. <https://doi.org/10.3406/casa.1992.2601>
- Aubert, M.E., 2001. *The Phoenicians and the West: Politics, Colonies and Trade*. Cambridge University Press.
- Audouze, F., Karlin, C., 2017. La chaîne opératoire a 70 ans : qu'en ont fait les préhistoriens français. *J. Lithic Stud.* 4, 5–73. <https://doi.org/10.2218/jls.v4i2.2539>

- Averbouh, A., Brun, P., MERY, S., Pierre, de M., 2006. Spécialisation des tâches et société. *Tech. Cult.* 47, 7–20.
- Bailly-Maitre, M.-C., Gonon, T., 2008. L'exploitation de la chalcopryrite à l'Âge du Bronze dans le massif des Rousses en Oisans (Isère) : premiers éléments, in: *Le Peuplement de l'arc Alpin*. Presented at the 131e congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Grenoble, 2006, pp. 207–223.
- Baker, J., Stos, S., Waight, T., 2006. Lead Isotope Analysis of Archaeological Metals by Multiple-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Archaeometry* 48, 45–56. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2006.00242.x>
- Baranov, A.V., Stolyarova, T.A., Brichkina, E.A., Osadchii, E.G., 2019. Standard Enthalpy of the Formation of Selenium Stannite $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$. *Geochem. Int.* 57, 1120–1123. <https://doi.org/10.1134/S0016702919100033>
- Barge, H., 1997. L'installation métallurgique Préhistorique de la cabane des Clausis à Saint-Véran (Hautes-Alpes). *Archéologie En Languedoc* 21, 99–110.
- Baron, S., Carignan, J., Laurent, S., Ploquin, A., 2006. Medieval lead making on Mont-Lozère Massif (Cévennes-France): Tracing ore sources using Pb isotopes. *Appl. Geochem.* 21, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.09.005>
- Baron, S., Coustures, M.-P., 2018. Apports et limites des méthodes isotopiques pour restituer la circulation des métaux aux périodes anciennes. *Nouv. Archéologie* 138, 35–39. <https://doi.org/10.4000/nda.2743>
- Baron, S., Le Carlier, C., Ploquin, A., 2010. Géochimie isotopique du plomb en archéologie minière et métallurgique. *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 149–147. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2723>
- Baron, S., Rico, C., Antolinos Marin, J.A., 2017. Le complexe d'ateliers du Cabezo del Pino (Sierra Minera de Cartagena-La Unión, Murcia) et l'organisation de l'activité minière à Carthago Noua à la fin de la République romaine. Apports croisés de l'archéologie et de la géochimie. *Arch. Esp. Arqueol. Ser. Anejos Cons. Super. Investig. Científicas* 90, 147–169.
- Baron, S., Tamas, C.G., Le Carlier, C., 2014. How mineralogy and geochemistry can improve the significance of Pb isotopes in metal provenance studies. *Archaeometry* 56, 665–680. <https://doi.org/10.1111/arc.12037>
- Barrouquère, H., Merlet, J.-C., Vignaud, D., 2004. Prospections et sondages dans quatre communes du Brassens (Landes). *Archéologie Pyrén. Occident. Landes* 23, 157–171.
- Bartelheim, M., Contreras Cortés, F., Moreno Onorato, A., Murillo-Barroso, M., Pernicka, E., 2012. The silver of the South Iberian El Argar Culture: A first look at production and distribution. *Trab. Prehist.* 69, 293–309. <https://doi.org/10.3989/tp.2012.12093>
- Barthomeuf, D., 2004. La place de l'Anatolie dans les débuts de la métallurgie du cuivre et du bronze (du VIIe au IIIe millénaire av. J.-C.). *Trav. Maison Orient Méditerranée* 39, 149–186.
- Bassiakos, Y., Philaniotou, O., 2007. Early copper production on Kythnos: archaeological evidence and analytical approaches to the reconstruction of metallurgical process, in: *Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean*. Oxbow Books, pp. 19–56.
- Bau, M., Romer, R.L., Lüders, V., Beukes, N.J., 1999. Pb, O, and C isotopes in silicified Mooidraai dolomite (Transvaal Supergroup, South Africa): implications for the composition of Paleoproterozoic seawater and 'dating' the increase of oxygen in the Precambrian atmosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.* 174, 43–57. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00261-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00261-7)
- Baxter, M.J., 1999a. Detecting Multivariate Outliers in Artefact Compositional Data. *Archaeometry* 41, 321–338. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1999.tb00986.x>

- Baxter, M.J., 1999b. Testing Multivariate Normality, with Applications to Lead Isotope Data Analysis in Archaeology, in: *Archaeology in the Age of the Internet*. Presented at the Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Archaeopress, Oxford, University of Birmingham, pp. 170–181.
- Baxter, M.J., 1999c. On the Multivariate Normality of Data Arising from Lead Isotope Fields. *J. Archaeol. Sci.* 26, 117–124. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0368>
- Baxter, M.J., 1995. Standardization and Transformation in Principal Component Analysis, with Applications to Archaeometry. *J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat.* 44, 513–527. <https://doi.org/10.2307/2986142>
- Baxter, M.J., Beardah, C.C., Westwood, S., 2000. Sample Size and Related Issues in the Analysis of Lead Isotope Data. *J. Archaeol. Sci.* 27, 973–980. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0546>
- Baxter, M.J., Beardah, C.C., Wright, R.V.S., 1997. Some Archaeological Applications of Kernel Density Estimates. *J. Archaeol. Sci.* 24, 347–354. <https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0119>
- Baxter, M.J., Gale, N.H., 1998. Testing for multivariate normality via univariate tests: a case study using lead-isotope ratio data. *J. Archaeol. Sci.* 26, 117–124.
- Bayard, D.T., 1980. An Early Indigenous Bronze Technology in Northeast Thailand: Its Implications for the Prehistory of East Asia, in: Loofs-Wissowa, H.H.E., Davis, A.R. (Eds.), *The Diffusion of Material Culture: 28th International Congress of Orientalists*. Asian and Pacific Archaeology, University of Hawaii, pp. 191–214.
- Bayley, J., 1985. What's what in ancient technology: an introduction to high-temperature processes, in: Phillips, P. (Ed.), *The Archaeologist and the Laboratory*. London: Council for British Archaeology, pp. 41–44.
- Baysal, E., 2014. A Preliminary Typology for Beads from the Neolithic and Chalcolithic Levels of Barcın Höyük. *Anatolia Antiq. Rev. Int. Archéologie Anatolienne* 1–10. <https://doi.org/10.4000/anatoliaantiqua.280>
- Beardah, C., Baxter, M., 1999. Three-dimensional data display using kernel density estimates, in: Barceló, J.A., Briz, A., Vila, A. (Eds.), *New Techniques for Old Times*. Presented at the Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Archaeopress, Oxford, Barcelona, pp. 163–170.
- Beaujard, P., 2010. From Three Possible Iron-Age World-Systems to a Single Afro-Eurasian World-System. *J. World Hist.* 21, 1–43. <https://doi.org/10.1353/jwh.0.0097>
- Begemann, F., Hauptmann, A., Schmitt-Strecker, S., Weisgerber, G., 2010. Lead isotope and chemical signature of copper from Oman and its occurrence in Mesopotamia and sites on the Arabian Gulf coast. *Arab. Archaeol. Epigr.* 21, 135–169. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0471.2010.00327.x>
- Begemann, F., Kallas, K., Schmitt-Strecker, S., Pernicka, E., 1999. Tracing ancient tin via isotope analyses, in: *The Beginnings of Metallurgy*. Der Anschnitt, Beiheft 9. Deutsches Bergbau-Museum, pp. 277–284.
- Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Pernicka, E., 2003. On the composition and provenance of metal finds from Beşiktepe (Troia), in: *Troia and the Troad - Scientific Approaches*. Springer, Heidelberg, pp. 173–201.
- Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Pernicka, E., Schiavo, F.L., 2001. Chemical Composition and Lead Isotopy of Copper and Bronze from Nuragic Sardinia. *Eur. J. Archaeol.* 4, 43–85. <https://doi.org/10.1177/146195710100400102>
- Belgiorno, M.R., Ferro, D., Loepp, D.R., 2009. Pyrgos-Mavroraki in Cypriot metallurgy, in: *Eastern Mediterranean Metallurgy in the Second Millennium BC*. Vasiliki Kassianidou and George Pappasavvas, Nicosia, pp. 26–34.
- Bendall, C., Wigg-Wolf, D., Lahaye, Y., Von Kaenel, H.-M., Brey, G.P., 2009. Detecting changes of Celtic gold sources through the application of trace element and Pb isotope laser ablation analysis of Celtic gold coins. *Archaeometry* 51, 598–625. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00423.x>

- Ben-Tor, D., 2007. Scarabs, Chronology, and Interconnections: Egypt and Palestine in the Second Intermediate Period. Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co KG, Fribourg : Göttingen.
- Ben-Yosef, E., Shaar, R., Tauxe, L., Levy, T.E., Kassianidou, V., 2011. The Cyprus Archaeomagnetic Project (CAMP): targeting the slag deposits of Cyprus and the Eastern Mediterranean. *Antiq.* 85-330.
- Ben-Yosef, E., Shaar, R., Tauxe, L., Ron, H., 2012. A New Chronological Framework for Iron Age Copper Production at Timna (Israel). *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 367, 31–71. <https://doi.org/10.5615/bullamerschoorie.367.0031>
- Ben-Yosef, E., Tauxe, L., Levy, T.E., 2010. Archaeomagnetic dating of copper smelting site F2 in the Timna Valley (Israel) and its implications for the modelling of ancient technological developments: archaeomagnetic dating of site F2 in the Timna Valley (Israel). *Archaeometry* 52, 1110–1121. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00528.x>
- Berger, D., Brüggmann, G., Friedrich, R., Lutz, J., Meyer, H.-P., Pernicka, E., 2022. Shiny bronze in glassy matter: an inconspicuous piece of slag from the Bronze Age mining site of Mušiston (Tajikistan) and its significance for the development of tin metallurgy in Central Asia. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 14, 150. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01606-2>
- Berger, D., Figueiredo, E., Brüggmann, G., Pernicka, E., 2018. Tin isotope fractionation during experimental cassiterite smelting and its implication for tracing the tin sources of prehistoric metal artefacts. *J. Archaeol. Sci.* 92, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.02.006>
- Berger, D., Kaniuth, K., Brüggmann, G., Pernicka, E., 2023. Why Central Asia’s Mushiston is not a source for the Late Bronze Age tin ingots from the Uluburun shipwreck. *Front. Earth Sci.* 11.
- Berger, D., Soles, J.S., Giunlia-Mair, A.R., Brüggmann, G., Galili, E., Lockhoff, N., Pernicka, E., 2019. Isotope systematics and chemical composition of tin ingots from Mochlos (Crete) and other Late Bronze Age sites in the eastern Mediterranean Sea: An ultimate key to tin provenance? *PLOS ONE* 14, 1–46. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218326>
- Berger, D., Wang, Q., Brüggmann, G., Lockhoff, N., Roberts, B.W., Pernicka, E., 2022c. The Salcombe metal cargoes: New light on the provenance and circulation of tin and copper in Later Bronze Age Europe provided by trace elements and isotopes. *J. Archaeol. Sci.* 138, 105543. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105543>
- Bernbeck, R., 2004. Iran in the Neolithic, in: Stöllner, T., Slotta, R., Vatandoust, A. (Eds.), *Persia’s Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Deutsches Bergbau-Museum. Bochum, pp. 140–147.
- Bertholon, R., Relier, C., 1990. Les métaux archéologiques, in: Berducou, M.-C. (Ed.), *La conservation en archéologie: méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*. Masson, Paris, pp. 163–221.
- Bertrand, G., 1979. La notion de “système technique” (essai d’épistémologie technique). *Tech. Cult.* I, 8–18.
- Besse, M., 2004. Des Campaniformes européens au Campaniforme méditerranéen. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 101, 215–222. <https://doi.org/10.3406/bspf.2004.12988>
- Betancourt, P.P., 2006. *The Chrysokamino Metallurgy Workshop and Its Territory*. ASCSA.
- Billard, C., Bourhis, J.-R., Desfossés, Y., Evin, J., Huault, M.-F., Lefèbvre, D., Paulet-Locard, M.-A., 1991. I. L’habitat des Florentins à Val-de-Reuil (Eure). *Gall. Préhistoire* 33, 140–171. <https://doi.org/10.3406/galip.1991.2288>
- Birch, T., Westner, K.J., Kemmers, F., Klein, S., Höfer, H.E., Seitz, H.-M., 2020. Retracing Magna Graecia’s silver: coupling lead isotopes with a multi-standard trace element procedure. *Archaeometry* 62, 81–108. <https://doi.org/10.1111/arc.12499>

- Birmingham, J., 1977. Spectrographic Analyses of Some Middle Bronze Age Metal Objects. *Levant* 9, 115–120. <https://doi.org/10.1179/lev.1977.9.1.115>
- Blagoi, G.A., 1999. Lead isotope data for ore deposits from Bulgaria and the possibility for their use in archaeometry. *Berl. Beitr. Zur Archäom.* 16, 5–19.
- Blanco Freijeiro, A., Rothenberg, B., 1981. Exploración arqueometalúrgica de Huelva. *Río Tinto Minera : Labor*, Barcelona.
- Blichert-Toft, J., Delile, H., Lee, C.-T., Stos-Gale, Z., Billström, K., Andersen, T., Hannu, H., Albarède, F., 2016. Large-scale tectonic cycles in Europe revealed by distinct Pb isotope provinces. *Geochem. Geophys. Geosystems* 17, 3854–3864. <https://doi.org/10.1002/2016GC006524>
- Blitte, H., 2016. Les dépôts non funéraires de l'âge du Bronze en Europe : Des pratiques votives, précieux témoins de l'histoire sociale, in: Brancier, J., Vallette, T., Rémeaud, C. (Eds.), *Des vestiges aux sociétés : Regards croisés sur le passage des données archéologiques à la société sous-jacente*, Archéo.doct. Éditions de la Sorbonne, Paris, pp. 157–170. <https://doi.org/10.4000/books.pSORbonne.4871>
- Bogosavljević Petrović, V., 2016. An archaeological experiment and new knowledge about the chipped stone industry from the Vinča culture. *J. Lithic Stud.* 3, 53–71. <https://doi.org/10.2218/jls.v3i2.1437>
- Bogosavljevic, V., 1990. Mining hammerstones of Prljusa-Mali Sturac site. Presented at the Ancient mining and metallurgy in Southern Europe, Borislav Jovanovic, Archaeological institute, Belgrade, pp. 37–44.
- Boni, M., Di Maio, G., Frei, R., Villa, I., 2000. Lead isotopic evidence for a mixed provenance for Roman water pipes from Pompeii. *Archaeometry* 42, 201–208. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2000.tb00876.x>
- Booth, T.J., Brück, J., Brace, S., Barnes, I., 2021. Tales from the Supplementary Information: Ancestry Change in Chalcolithic–Early Bronze Age Britain Was Gradual with Varied Kinship Organization. *Camb. Archaeol. J.* 31, 379–400. <https://doi.org/10.1017/S0959774321000019>
- Borg, G., 2017. It's all about timing – the origin of the European Kupferschiefer ores. *World Min. - Surf. Undergr.* 69, 24–30.
- Borg, G., Piestrzyński, A., Bachmann, G.H., Puttman, W., Walther, S., Fiedler, M., 2012. An overview of the European Kupferschiefer deposits. *Econ. Geol. Spec. Publ. Special Publication*, 455–486.
- Bostyn, F., Vaquer, J., 2018. Matériaux, échanges, circulations au Néolithique, in: *La protohistoire de la France*, Collection Histoire et archéologie. Hermann, Paris, pp. 109–123.
- Bourgarit, D., 2019. Mineralogy of slags: a key approach for our understanding of ancient copper smelting processes. *EMU Notes Mineral.* 20, 203–231.
- Bourgarit, D., 2007. Chalcolithic copper smelting, in: Hook, D. (Ed.), *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*. Archetype Publications, London, pp. 3–14.
- Bourgarit, D., Mille, B., 2014. Provenance du cuivre et alliages, in: Dillmann, P., Bellot-Gurlet, L. (Eds.), *Circulation et Provenance Des Matériaux Dans Les Sociétés Anciennes*, Sciences Archéologiques. Editions des archives contemporaines, pp. 103–131.
- Bourgarit, D., Mille, B., 2005. Les nouvelles données de l'atelier métallurgique chalcolithique de La Capitelle du Broum dans le district de Cabrières (Hérault) : la transformation des minerais de cuivre à base de sulfures se précise, in: *Mémoires de La Société Préhistorique Française*. Presented at the La première métallurgie en France et dans les pays limitrophes. Colloque international, Pôle éditorial archéologique de l'Ouest, pp. 97–108.
- Bourgarit, D., Mille, B., 2003. The elemental analysis of ancient copper-based artefacts by inductively-coupled-plasma atomic-emission spectrometry: an optimized methodology reveals some secrets of the Vix crater. *Meas. Sci. Technol.* 14, 1538. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/9/306>

- Bourgarit, D., Mille, B., 2001. La transformation en métal de minerais de cuivre à base de sulfures : et pourquoi pas dès le Chalcolithique. *Rev. Archéom.* 25, 145–155. <https://doi.org/10.3406/arsci.2001.1011>
- Bourgarit, D., Mille, B., Prange, M., Ambert, P., Hauptmann, A., 2003. Chalcolithic fahllore smelting at Cabrieres: Reconstruction of smelting processes by archaeometallurgical finds, in: *Archaeometallurgy in Europe*, Milano, Associazione Italiana Di Metallurgia. Presented at the Archaeometallurgy in Europe 2003, Associazione italiana di metallurgia, Milan, pp. 431–440.
- Bourgarit, D., Rostan, P., Burger, E., Carozza, L., Mille, B., Artioli, G., 2008. The beginning of copper mass production in the western Alps: the Saint-Véran mining area reconsidered. *Hist. Metall.* 42, 1–11.
- Bourgarit, D., Rostan, P., Carozza, L., Mille, B., Artioli, G., 2010. Vingt ans de recherches à Saint-Véran, Hautes Alpes : état des connaissances de l'activité de production de cuivre à l'âge du Bronze ancien. *Trab. Prehist.* 67, 269–285. <https://doi.org/10.3989/tp.2010.10039>
- Bourke, S.J., 2008. The Chalcolithic Period, in: Adams, R. (Ed.), *Jordan: An Archaeological Reader*. Equinox Publishing Ltd, Oakville, CT, pp. 109–160.
- Boyadziev, Y.D., 1995. Chronology Of Prehistoric Cultures In Bulgaria, in: Bailey, D.W., Panayotov, I., Alexandrov, S. (Eds.), *Prehistoric Bulgaria, Monographs In World Archaeology*. Prehistory Press, Madison, Wisconsin, pp. 149–191.
- Brandherm, D., Montero Ruiz, I., Müller-Kissing, M., Maass, A., Diz Ardid, E., 2022. Copper Supply Networks in the Early Bronze Age of South-east Spain: New Evidence from the Lower Segura Valley. *IANSA* 13, 14.
- Branigan, K., 1974. *Aegean Metalwork of the Early and Middle Bronze Age*. Oxford University Press, London.
- Bray, P., 2022. Is a focus on 'recycling' useful? A wider look at metal mutability and the chemical character of copper alloys. *Archaeometry* 64, 87–97. <https://doi.org/10.1111/arcm.12753>
- Bray, P., Cuénod, A., Gosden, C., Hommel, P., Liu, R., Pollard, A.M., 2015. Form and flow: the 'karmic cycle' of copper. *J. Archaeol. Sci., Scoping the Future of Archaeological Science: Papers in Honour of Richard Klein* 56, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.12.013>
- Bray, P.J., Pollard, A.M., 2012. A new interpretative approach to the chemistry of copper-alloy objects: source, recycling and technology. *Antiquity* 86, 853–867. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00047967>
- Breglia, F., Caricola, I., Larocca, F., 2016. Macrolithic tools for mining and primary processing of metal ores from the site of Grotta della Monaca (Calabria, Italy). *J. Lithic Stud.* 3, 57–76. <https://doi.org/10.2218/jls.v3i3.1651>
- Briard, J., 1995. L'âge du Bronze, in: *Protohistoire de la Bretagne ([Nouv. éd.] / Pierre-Roland Giot, Jacques Briard, Louis Pape*. Rennes, pp. 27–45.
- Briard, J., 1994. Thésaurisations et paléomonnaies du Bronze final méridional et du Launacien. *Études Sur L'Hérault* 5–8.
- Briard, J., Bourhis, J., Onnée, Y., Nicolau-Guillaumet, P.-L., Berretrot, F., 1995. Le Néolithique et l'Age du Bronze du site à Gué de la Vilaine entre Massérac (Loire-Atlantique) et Langon (Ille-et-Vilaine). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 92, 109–122. <https://doi.org/10.3406/bspf.1995.9981>
- Briggs, C.S., 1983. Copper Mining at Mount Gabriel, Co. Cork: Bronze Age Bonanza or Post-Famine Fiasco?. *Proc. Prehist. Soc.* 49, 317–333. <https://doi.org/10.1017/S0079497X00008033>
- Brill, R.H., Barnes, I.L., Adams, B., 1974. Lead Isotopes in some ancient Egyptian objects, in: *Recent Advances in Science and Technology of Materials*. Plenum Press, New York and London, pp. 9–27.
- Brill, R.H., Wampler, J.M., 1967. Isotope Studies of Ancient Lead. *Am. J. Archaeol.* 71, 63–77. <https://doi.org/10.2307/501589>

- Brinker, U., Harten-Buga, H., Staude, A., Jantzen, D., Orschiedt, J., 2018. Perimortem Lesions on Human Bones from the Bronze Age Battlefield in the Tollense Valley: An Interdisciplinary Approach, in: Dolfini, A., Crellin, R.J., Horn, C., Uckelmann, M. (Eds.), *Prehistoric Warfare and Violence: Quantitative and Qualitative Approaches, Quantitative Methods in the Humanities and Social Sciences*. Springer International Publishing, Cham, pp. 39–60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78828-9_3
- Brodie, N., 2008. The donkey: an appropriate technology for early bronze age land transport and traction, in: Brodie, N., Doole, J., Gavalas, G., Renfrew, C. (Eds.), *Horizon: A Colloquium on the Prehistory of the Cyclades*. McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge, pp. 299–304.
- Broholm, H.C., Hald, M., 1935. Danske Bronzealders Dragter. *Nord. Fortidsminder* 2, 215–347.
- Brown, J.S., 1966. Ore lead isotopes of the British Isles and Scandinavia. *Econ. Geol.* 61, 1191–1204. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.61.7.1191>
- Brozio, J.P., Stos-Gale, Z., Müller, J., Müller-Scheeßel, N., Schultrich, S., Fritsch, B., Jürgens, F., Skorna, H., 2023. The origin of Neolithic copper on the central Northern European plain and in Southern Scandinavia: Connectivities on a European scale. *PLOS ONE* 18, e0283007. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283007>
- Brück, J., 2016. Hoards, Fragmentation and Exchange in the European Bronze Age. <https://doi.org/10.18452/5339>
- Brun, P., 2015. Réflexion sur les degrés de spécialisation artisanale dans les sociétés de l'âge du Bronze, in: Boulud, S., Nicolas, T. (Eds.), *Artisanats et productions à l'âge du Bronze: actes de la journée de la Société préhistorique française. Séances de la Société préhistorique française*, Nantes, pp. 11–22.
- Brun, P., 2007. Les pratiques funéraires de l'âge du Bronze en Europe: quel reflet sociologique?, in: *Pratiques funéraires et sociétés: Nouvelles approches en archéologie et en anthropologie sociale: Actes du colloque interdisciplinaire de Sens 12-14 juin 2003, 2007*, ISBN 9782915552577, págs. 115-132. Presented at the *Pratiques funéraires et sociétés: Nouvelles approches en archéologie et en anthropologie sociale: Actes du colloque interdisciplinaire de Sens 12-14 juin 2003*, pp. 115–132.
- Brun, P., 1999. La genèse de l'État : les apports de l'archéologie, in: Ruby, P. (Ed.), *Les Princes de la Protohistoire et l'émergence de l'État*, Collection du Centre Jean Bérard. Publications du Centre Jean Bérard, Naples, pp. 31–42. <https://doi.org/10.4000/books.pcbj.285>
- Brun, P., 1998. Le complexe culturel atlantique : entre le cristal et la fumée, in: Oliveira Jorge, S. (Ed.), *Existe Uma Idade Do Bronze Atlântico?*, *Trabalhos de Arqueologia*. Instituto Português de Arqueologia, Lisboa, pp. 40–51.
- Budd, P., 1991. A metallographic investigation of eneolithic arsenical copper artefacts from Mondsee, Austria. *Hist. Metall.* 25, 99–108.
- Budd, P., Gale, D., Pollard, A.M., Thomas, R.G., Williams, P.A., 1993. Evaluating Lead Isotope Data: Further Observations. *Archaeometry* 35, 241–247. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1993.tb01038.x>
- Budd, P., Haggerty, R., A. Ixer, R., Scaife, B., G. Thomas, R., 2000. Copper deposits in south-west England identified as a source of Copper Age metalwork 8.
- Budd, P., Haggerty, R., Pollard, A.M., Scaife, B., Thomas, R.G., 1996. Rethinking the quest for provenance. *Antiquity* 70, 168–174. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00083034>
- Budd, P., Ottaway, B.S., 1991. The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of Eneolithic metallurgy, in: Budd, Paul, Chapman, B., Jackson, C., Janaway, R., Ottaway, B.S. (Eds.), *Archaeological Science 1989, Proceedings of a Conference on the Application of Scientific Techniques to Archaeology*. Oxbow Books, Bradford, pp. 132–142.

- Budd, P., Pollard, A.M., Scaife, B., Thomas, R.G., 1995. The Possible Fractionation of Lead Isotopes in Ancient Metallurgical Processes. *Archaeometry* 37, 143–150. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1995.tb00732.x>
- Bunnefeld, J.-H., 2016. Crafting Swords. The emergence and production of full-hilted swords in the Early Nordic Bronze Age. *Praehistorische Z.* 91, 379–430. <https://doi.org/10.1515/pz-2016-0023>
- Burger, E., 2008. Métallurgie extractive protohistorique du cuivre : Etude thermodynamique et cinétique des réactions chimiques de transformation de minerais de cuivre sulfurés en métal et caractérisation des procédés (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Burger, M., Glaus, R., Hubert, V., van Willigen, S., Wörle-Soares, M., Convertini, F., Lefranc, P., Nielsen, E., Günther, D., 2017. Novel sampling techniques for trace element quantification in ancient copper artifacts using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Archaeol. Sci.* 82, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.04.009>
- Bussone, R., Suméra, F., CAMPS, P., Fekiacova, Z., Girard, B., Grauby, O., Veron, A., 2019. Méthodologie pour l'étude du cuivre natif protohistorique des mines de Roua (Alpes-Maritimes), in: Laroche, M., Bruxelles, L., Galant, P., Ambert, M. (Eds.), *Paysages Pour l'Homme, Actes Du Colloque International En Hommage à Paul Ambert, Cabrières (Hérault), Du 15 Au 19 Octobre 2019*. Association Culturelle des Amis de Cabrières, pp. 279–288.
- Callewaert, M., 2010. Les couleurs des artefacts en alliage cuivreux : analyse physico-chimique des techniques de coloration utilisées du Chalcolithique au Haut Moyen Age en Europe et au Proche Orient. *Archéo-Situla* 30, 42–60.
- Candelone, J.-P., Hong, S., Pellone, C., Boutron, C.F., 1995. Post-Industrial Revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metals as documented in central Greenland snow and ice. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 100, 16605–16616. <https://doi.org/10.1029/95JD00989>
- Canovaro, C., 2015. Mining and diffusion of Alpine copper in the Bronze Age. *Scuola Dottorato Sci. Della Terra Dipartimento Geosci. Univ. Degli Studi Padova* 4.
- Canovaro, C., Angelini, I., Artioli, G., Nimis, P., Borgna, E., 2019. Metal flow in the late Bronze Age across the Friuli-Venezia Giulia plain (Italy): new insights on Cervignano and Muscoli hoards by chemical and isotopic investigations. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 11, 4829–4846. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00827-2>
- Capuzzo, G., Zanon, M., Dal Corso, M., Kirleis, W., Barceló, J.A., 2018. Highly diverse Bronze Age population dynamics in Central-Southern Europe and their response to regional climatic patterns. *PLoS ONE* 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200709>
- Caraballo, E., Dare, S., Beaudoin, G., 2022. Variation of trace elements in chalcopyrite from worldwide Ni-Cu sulfide and Reef-type PGE deposits: implications for mineral exploration. *Miner. Deposita* 57, 1293–1321. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01091-y>
- Caraglio, A., 2020. Comment réesquisser les réseaux campaniformes dans le sud-ouest de l'Europe ? *Préhistoires Méditerranéennes*. <https://doi.org/10.4000/pm.2242>
- Carey, C., Jones, A.M., Allen, M.J., Juleff, G., 2019. The social organisation of metalworking in southern England during the Beaker period and Bronze Age: absence of evidence or evidence of absence? *Internet Archaeol.* <https://doi.org/10.11141/ia.52.4>
- Caricola, I., Breglia, F., Larocca, F., Hamon, C., Lemorini, C., Giligny, F., 2020. Prehistoric exploitation of minerals resources. Experimentation and use-wear analysis of grooved stone tools from Grotta della Monaca (Calabria, Italy). *Archaeol. Anthropol. Sci.* 12, 259. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01219-7>

- Caro, J., Guerra, M.R., Lagrán, I.G.-M. de, Ortega, L., Gazolaz, J.G., Sesma, J.S., 2018. Standardisation des productions céramiques au Ve millénaire avant notre ère. Analyse des assemblages du site de Los Cascajos (Los Arcos, Navarre). Presented at the XVIII^e UISPP World Congress, Société préhistorique française, p. 21.
- Caro, T., Riccucci, C., Parisi, E.I., Faraldi, F., Caschera, D., 2013. Ancient silver extraction in the Montevecchio mine basin (Sardinia, Italy): micro-chemical study of pyrometallurgical materials. *Appl. Phys. A* 113, 945–957. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-7722-3>
- Carozza, L., Ambert, P., 1995. Origine et développement de la première métallurgie française : état de la question. *Archéologie En Languedoc* 20, 43–56.
- Carozza, L., Ambert, P., Léchelon, B., 1998. De la mine au métal au sud du Massif Central au Chalcolithique (région de Cabrières, Fayet et Villefranche de Rouergue). Presented at the L' atelier du bronzier en Europe du XX^eme au VII^eme siècle avant notre ère., pp. 59–70.
- Carozza, L., Berger, J.F., Burens-Carozza, A., Marcigny, C., 2015. Society and environment in Southern France from the 3rd millennium BC to the beginning of the 2nd millennium BC: 2200 BC a tipping point?, in: *A Climatic Breakdown as a Cause for the Collapse of the Old World?* Presented at the 7th Archaeological Conference of Central Germany, Halle (Saale), pp. 335–365.
- Carozza, L., Bourgarit, D., Mille, B., 1997. L'habitat et l'atelier de métallurgiste chalcolithique d'Al Claus: analyse et interprétation des témoins d'activité métallurgique. *Archéologie En Languedoc* 21, 147–160.
- Carozza, L., Mille, B., 2007. Chalcolithique et complexification sociale : quelle place pour le métal dans la définition du processus de mutation des sociétés de la fin du néolithique en France ?, in: Jean Guilaine. *Le chalcolithique et la construction des inégalités*, Errance. Presented at the séminaire du collège de France, pp. 153–189.
- Carozza, L., Rostan, P., Bourgarit, D., Mille, B., Coquinot, Y., Burens-Carozza, A., Escanilla Artigas, N., 2008. Un site métallurgique du Bronze ancien dans le vallon du Longet à Moline-en-Queyras (Hautes-Alpes), in: *Archéologie de La Montagne Européenne, Archéologie de l'espace Montagnard : Confrontation d'expériences Européennes*. Errance, GAP, France, pp. 203–230.
- Carvalho, D., Barriga, F.J.A.S., Munhá, J., 1997. Bimodal Siliciclastic Systems—The Case of The Iberian Pyrite Belt, in: Barrie, C.T., Hannington, M.D. (Eds.), *Volcanic Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings*. Society of Economic Geologists, p. 0. <https://doi.org/10.5382/Rev.08.16>
- Cassard, D., Bertrand, G., Billa, M., Serrano, J.-J., Tourlière, B., Angel, J.-M., Gaál, G., 2015. ProMine Mineral Databases: New Tools to Assess Primary and Secondary Mineral Resources in Europe, in: Weihed, P. (Ed.), *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe*. Springer International Publishing, Cham, pp. 9–58. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17428-0_2
- Cassidy, L.M., Martiniano, R., Murphy, E.M., Teasdale, M.D., Mallory, J., Hartwell, B., Bradley, D.G., 2016. Neolithic and Bronze Age migration to Ireland and establishment of the insular Atlantic genome. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 368–373. <https://doi.org/10.1073/pnas.1518445113>
- Castaing, J., Mille, B., Zink, A., Bourgarit, D., Ambert, P., 2005. L'abattage préhistorique au feu dans le district minier de Cabrières (Hérault) : évidences par thermoluminescence (TL), in: *Actes Du Congrès : La Première Métallurgie En France et Dans Les Pays Limitrophes*. Mémoires de la Société préhistorique française, Carcassonne, p. 306.
- Catapotis, M., Bassiakos, Y., 2007. Copper smelting at the Early Minoan site of Chrysokamino on Crete, in: Day, P.M., Doonan, R. (Eds.), *Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean*, Sheffield Studies in Aegean Archaeology. Oxford, pp. 68–83.

- Cattin, F., 2008. Modalités d’approvisionnement et modalités de consommation du cuivre dans les Alpes au 3e millénaire avant notre ère: apport des analyses métalliques à la connaissance des peuplements du Néolithique final, du Campaniforme et du Bronze ancien. University of Geneva.
- Cattin, F., Guénette-Beck, B., Curdy, P., Meisser, N., Ansermet, S., Hofmann, B., Kündig, R., Hubert, V., Wörle, M., Hametner, K., Günther, D., Wichser, A., Ulrich, A., Villa, I.M., Besse, M., 2011. Provenance of Early Bronze Age metal artefacts in Western Switzerland using elemental and lead isotopic compositions and their possible relation with copper minerals of the nearby Valais. *J. Archaeol. Sci.* 38, 1221–1233. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.12.016>
- Cattin, F., Villa, I.M., Besse, M., 2009. Copper supply during the Final Neolithic at the Saint-Blaise/Bains des Dames site (Neuchâtel, Switzerland). *Archaeol. Anthropol. Sci.* 1, 161–176. <https://doi.org/10.1007/s12520-009-0016-1>
- Cauuet, B., 2013. Les ressources métallifères du Massif central à l’âge du Fer, in: *Une Odyssée Gauloise. : Parures de Femmes à l’origine Des Premiers Échanges Entre La Grèce et La Gaule*, Archéologie de Montpellier Agglomération. Arles, pp. 74–83.
- Cauuet, B., 1991. L’exploitation de l’or en Limousin, des Gaulois aux Gallo-Romains. *Ann. Midi Rev. Archéologique Hist. Philol. Fr. Méridionale* 103, 149–181. <https://doi.org/10.3406/anami.1991.2292>
- Cauuet, B., Boussicault, M., 2014. Apport du Lidar à l’étude des mines d’étain antiques en dépôts secondaires autour d’Autun (71). Presented at the Journée d’Actualité Archéologique en Pays Eduen, Service Archéologique de la Ville d’Autun, Autun, pp. 31–33.
- Celauro, A., Maass, A., 2019. The Variation of Elastic Modulus and Changes of Structures and Mineral Phases in Rocks as Parameters for the Identification of Fire-Setting in Ancient Mines. *EXARC J.*
- Celauro, A., Schiavon, N., Brunetti, A., Manfredi, L.-I., Susanna, F., Dekayir, A., Graziani, V., Pargny, D., Ferro, D., 2014. Combining chemical data with GIS and PCA to investigate Phoenician–Punic Cu-metallurgy. *Appl. Phys. A* 114, 711–722. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8179-0>
- Cesari, J., Labaune, M., Remicourt, M., Tanda, G., Tramoni, P., Antolini, J.-P., 2017. La première métallurgie : bilan et perspective de la recherche en Corse. Presented at the 20 ans d’archéologie en Corse, Musée des Beaux-arts Ajaccio, Ajaccio, pp. 35–38.
- Ceyhan, N., 2003. Lead Isotope Geochemistry of Pb-Zn Deposits from Eastern Taurides, Turkey (Mémoire de Master). Middle East Technical University.
- Charles, J.A., 1980. Recycling Effects on the Composition of Non-Ferrous Metals. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.* 295, 57–68.
- Chaume, B., Ballmer, A., Della Casa, P., Nieszery, N., Pertlwieser, T., Reinhard, W., Schäppi, K., Urban, O., Winkler, A., 2021. Entre l’état et la chefferie simple : le complexe aristocratique de Vix/le mont Lassois, in: Brun, P., Chaume, B., Sacchetti, F. (Eds.), *Vix et Le Phénomène Princier*. Ausonius Éditions, Châtillon-sur-Seine, pp. 19–38. <https://doi.org/10.46608/dana5.9782356133823.3>
- Chauris, L., 2011. Aperçu sur les anciennes exploitations d’étain en Bretagne. *Bull Soc Géol Minéral Bretagne D.* 103–115.
- Chernych, N.E., 1978. Aibunar - a Balkan copper mine of the fourth millennium BC (Investigations of the years 1971, 1972 and 1974). *Proc. Prehist. Soc.* 44, 203–217. <https://doi.org/10.1017/S0079497X00010136>
- Chernykh, E.N., 1998. Kargaly: le plus grand ancien complexe minier et de métallurgie à la frontière de l’Europe et de l’Asie, in: *Paléométallurgie Des Cuivres*. Montagnac, pp. 71–76.
- Chernykh, E.N., 1992. *Ancient Metallurgy in the USSR: The Early Metal Age*. Cambridge University Press.

- Chernykh, E.N., 1970. O Drevneyshikh Ochagakh Metalloobrabotki Yugo-Zapada SSSR. *Kratk. Soobshcheniia Instituta Arkheologii* 123, 23–31.
- Childe, V.G., 1930. *The Bronze Age*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Chillrud, S.N., Hemming, N.G., Ross, J.M., Wallace, S., LoIacono, N., 2005. A rapid and precise procedure for Pb isotopes in whole blood by Fe co-precipitation and MC-ICPMS analysis. *Appl. Geochem.*, Selected Papers from the 5th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry, Heron Island, Great Barrier Reef, Australia, 26–30 May 2003 20, 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.11.002>
- Cintas, P., 1949. Fouilles puniques à Tipasa. *Rev. Afr.* XCII, 1–68.
- Clark, P., 2005. Shipwrights, Sailors and Society in the Middle Bronze Age of NW Europe. *J. Wetl. Archaeol.* 5, 87–96. <https://doi.org/10.1179/jwa.2005.5.1.87>
- Clark, P., Arnold, B., Baillie, M., Coates, J., Gifford, E., Gifford, J., Green, C., Kaul, F., Kristiansen, K., Kvalø, F., Maarleveld, T., Marsden, P., McGrail, S., Van de Noort, R., Parfitt, K., Pryor, F., Roberts, O., 2004. *The Dover Bronze Age Boat in Context: Society and Water Transport in Prehistoric Europe*. Oxbow Books.
- Clayton, R., 2001. Lead isotopes in cassiterite and tin metal : further data and experimental results applied to the provenance of tin in antiquity. *ArchéoSciences Rev. Archéom.* 25, 79–86. <https://doi.org/10.3406/arsci.2001.1003>
- Cline, E.H., 2015. 1177 avant J.-C. - le jour où la civilisation s'est enfoncée, Illustrated édition. ed. La Découverte, Paris.
- Clodoré-Tissot, T., 2006. *La musique aux âges de bronze et du fer en Europe (These de doctorat)*. Paris 1.
- Collet, H., Bostyn, F., 2011. Diffusion du silex de Spienne et du silex Bartonien du Bassin parisien dans le Nord de la France et en Belgique de la fin du 5e millénaire au début du 4e millénaire BC : une première approche. *Rev. Archéologique Picardie* 28, 331–348. <https://doi.org/10.3406/pica.2011.3339>
- Collin, V., 1990. *Etude des bronzes archéologiques de l'âge du Bronze provenant du site du Fort-Harrouard : analyse élémentaire et analyse isotopique du plomb, relation avec les minerais et les procédés métallurgiques*. Paris VI, Paris.
- Comendador Rey, B., Meunier, E., Figueiredo, E., Lackinger, A., Fonte, J., Fernández Fernández, C., Lima, A., Mirão, J., Ruiz, S., 2017. The tinworking landscape of Dartmoor in a European context - prehistory to 20th century: papers presented at a conference in Tavistock, Devon, 6-11 May 2016 to celebrate the 25th anniversary of the DTRG, in: Newman, P., *Celebrating the Tinworking Landscape of Dartmoor in its European Context : Prehistory to 20th Century (Conference) (Eds.)*, *The Tinworking Landscape of Dartmoor in a European Context - Prehistory to 20th Century*. Tavistock, Devon, pp. 133–153.
- Conophagos, C., 1980. *Le Laurium antique et la technique grecque de la production de l'argent*. Ekdotike hellados S.A, Athènes.
- Constantinou, G., 2007. Contribution of the geology to the early exploitation of the cupriferous sulphide deposits of the Skouriotissa mining district, in: Joan Du Plat Taylor's Excavations at the Late Bronze Age Mining Settlement at Apliki Karamallos, Cyprus, *Studies in Mediterranean Archaeology, Volume*. Paul Åströms Förlag, Sävedalen, pp. 337–345.
- Constantinou, G., 1982. Geological features and ancient exploitations of the cupriferous sulphide orebodies of Cyprus, in: Muhly, J.D., Maddin, R., Karageorghis, V. (Eds.), *Early Metallurgy in Cyprus 4000-500 BC*. Nicosia, pp. 13–24.
- Contreras Cortés, F., Moreno Onorato, A., 2011. La Minería Del Cobre En Época Prehistórica En El Alto Guadalquivir, in: *Actas Del Quinto Congreso Internacional Sobre Minería Y Metalurgia Históricas En El Suroeste Europeo*. LEÓN, pp. 185–193.

- Cook, N.J., Chiaradia, M., 1997. Sources of base metal mineralization in the Baia Borșa orefield, NW Romania: constraints from lead isotopes., in: *Mineral Deposits. Research and Exploration - Where to They Meet?* Rotterdam, pp. 813–816.
- Cooke, S.R.B., Nielsen, B.V., 1978. Slags and other metallurgical products, in: Rapp, G., Aschenbrenner, S.E. (Eds.), *Excavations at Nichoria in Southwest Greece*. University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 182–224.
- Corboud, P., Piguët, M., 2014. De l’or ? Non du bronze !... La métallurgie du bronze dans la préhistoire. Presented at the 10e Nuit de la Science, 5-6 juillet 2014, Université de Genève -, p. 5.
- Cordier, C., Chauvel, C., Hémond, C., 2016. High-precision lead isotopes and stryplu plumes: Revisiting the Society chain in French Polynesia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 189, 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.06.010>
- Cordier, G., 1963. Sur un maillet à rainure du Berry (survivance d’un type néolithique à l’Age du Fer). *Rev. Archéologique Cent. Fr.* 2, 237–241. <https://doi.org/10.3406/racf.1963.1097>
- Costa, K., Brun, P., Mille, B., 2021. Late Bronze Age new statistical and archaeometallurgical artefacts surveys from France and Switzerland (950 to 800 BCE).
- Costa, K., Tomczyk, C., Maillé, M., 2022. Campagne analytique de mobiliers base cuivre régionaux, in: *Rapport Triennal 2020-2022 Du PCR Mines et Métallurgie Protohistoriques En Occitanie*. Toulouse, pp. 421–446.
- Costantini, G., 1984. Le Néolithique et le Chalcolithique des Grands Causses - Etude archéologique. *Gall. Préhistoire* 27, 121–210. <https://doi.org/10.3406/galip.1984.1929>
- Cottiaux, R., Salanova, L., Brunet, P., Hamon, T., Langry-François, F., Maingaud, A., Martineau, R., Mille, B., Polloni, A., Renard, C., Sohn, M., 2014. Le Néolithique récent dans le Bassin parisien (3600-2900 avant notre ère) : périodisation et faciès régionaux. *Société archéologique de l’Est ; Association des amis de la Revue archéologique d’Ile-de-France*.
- Craddock, P., 2014. Production of Silver across the Ancient World. *ISIJ Int.* 54, 1085–1092. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1085>
- Craddock, P.T., 2009. Evidences for the earliest smelting processes in western Europe, in: *Archaeometallurgy in Europe: 2nd International Conference*. Presented at the Archaeometallurgy in Europe: 2nd International Conference, Associazione Italiana di Metallurgia, Aquileia, Italy, pp. 3–11.
- Craddock, P.T., 2000. From hearth to furnace : evidences for the earliest metal smelting technologies in the Eastern Mediterranean. *Paléorient* 26, 151–165. <https://doi.org/10.3406/paleo.2000.4716>
- Craddock, P.T., 1992. A short history of firesetting. *Endeavour* 16, 145–150. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(92\)90074-Y](https://doi.org/10.1016/0160-9327(92)90074-Y)
- Craddock, P.T., 1990. Copper smelting in Bronze Age Britain: Problems and Possibilities, in: Crew, P., Crew, S. (Eds.), *Early Mining in the British Isles*, Plas Tan y Bwlch Occasional Paper. Gwynedd, pp. 69–71.
- Craddock, P.T., 1989. The scientific investigation of early mining and smelting, in: Henderson, J. (Ed.), *Scientific Analysis in Archaeology and Its Interpretation*. pp. 178–212.
- Crawford, H.E.W., 1974. The Problem of Tin in Mesopotamian Bronzes. *World Archaeol.* 6, 242–247.
- Crumlin-Pedersen, O., Trakadas, A. (Eds.), 2003. *Hjortspring: a pre-roman Iron-Age warship in context, Ships and boats of the North*. The Viking Ship Museum [u.a.], Roskilde.
- Cuénod, A., Bray, P., Pollard, A.M., 2015. The “Tin Problem” in the Prehistoric Near East: Further Insights from a Study of Chemical Datasets on Copper Alloys from Iran and Mesopotamia. *J. Br. Inst. Persian Stud.* 53, 29–48. <https://doi.org/10.1080/05786967.2015.11834749>

- Cui, J., Wu, X., 2011. An Experimental Investigation on Lead Isotopic Fractionation During Metallurgical Processes. *Archaeometry* 53, 205–214. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00548.x>
- Cumming, G.L., Richards, J.R., 1975. Ore lead isotope ratios in a continuously changing Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* 28, 155–171. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90223-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90223-X)
- Cunliffe, T., 2008. *Inshore Navigation*. Fernhurst Books Limited.
- Daróczy, T.-T., 2021. Bronzization, the globalization of the Bronze Age in Afro-Eurasia, in: *Globalization and Transculturality from Antiquity to the Pre-Modern World*. Routledge, London, pp. 57–80. <https://doi.org/10.4324/9781003096269-6>
- David, D., 2001. *Matériaux: analogues archéologiques et corrosion*. ANDRA, Chatenay-Malabry, France.
- de Blas Cortina, M.A., 2005. Un Témoignage probant de l'exploitation préhistorique du cuivre dans le nord de la Péninsule Iberique: le complexe minier d'El Aramo (Asturies), in: *La Première Métallurgie En France et Dans Les Pays Limitrophes*. Presented at the La Première Métallurgie en France et dans les Pays Limitrophes, Société Préhistorique Française, Carcassonne, pp. 195–206.
- de Blas Cortina, M.Á. de B., 2014. El laboreo del cobre en la sierra del del Áramo (Asturias) como referente cardinal de la minería prehistórica en la región cantábrica. *Cuad. Prehist. Arqueol. Univ. Granada* 24, 45–84. <https://doi.org/10.30827/cpag.v24i0.4088>
- de Blas Cortina, M.A. de B., 2008. Minería prehistórica del cobre en el reborde septentrional de los picos de Europa: Las olvidadas labores de El Milagro (Onís, Asturias). *Veleia* 24, 723–753.
- de Blas Cortina, M.A. de B., 1996. La primera minería metálica del N peninsular: las indicaciones del C-14 y la cronología prehistórica de las explotaciones cupríferas del Aramo y El Milagro. *Complutum* 217–226.
- de Blas Cortina, M.A. de B., Fernandez, M.S., 2010. Utillaje faunístico inédito de las labores de cobre prehistóricas de La Profunda (León) y su datación C14 (AMS). *Zephyrus* 64, 5–18.
- De Ceuster, S., Degryse, P., 2020. A ‘match–no match’ numerical and graphical kernel density approach to interpreting lead isotope signatures of ancient artefacts. *Archaeometry* 62, 107–116. <https://doi.org/10.1111/arc.12552>
- De Jesus, P.S., 1980. The development of prehistoric mining and metallurgy in Anatolia, BAR. BAR.
- De Jesus, P.S., 1977. *The Development of Prehistoric Mining and Metallurgy in Anatolia*. University of London.
- De Marinis, R.C., 1997. Il ripostiglio della Baragalla, in: Bernabo Brea, M., Cardarelli, A., Cremaschi, M. (Eds.), *Le Terramare. La Piú Civiltá Padana, Catalogo Della Mostra Di Modena*. Milano, pp. 306–308.
- De Ryck, I., Adriaens, A., Adams, F., 2005. An overview of Mesopotamian bronze metallurgy during the 3rd millennium BC. *J. Cult. Herit.* 6, 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.04.002>
- de Becdelièvre, C., Blagojević, T., Jovanović, J., Stefanović, S., Hofmanová, Z., Porčić, M., 2022. Palaeodemography of the foraging to farming transition: insights from the Danube Gorges Mesolithic-Neolithic transformations, in: Degioanni, A., Herrscher, E., Naji, S. (Eds.), *Journey of a Committed Paleodemographer: Farewell to Jean-Pierre Bocquet-Appel, Préhistoires de La Méditerranée*. Presses universitaires de Provence, Aix-en-Provence, pp. 113–131. <https://doi.org/10.4000/books.pup.54310>
- Degryse, P., Schneider, J., Haack, U., Lauwers, V., Poblome, J., Waelkens, M., Muchez, Ph., 2006. Evidence for glass ‘recycling’ using Pb and Sr isotopic ratios and Sr-mixing lines: the case of early Byzantine Sagalassos. *J. Archaeol. Sci.* 33, 494–501. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.09.003>
- Delavault, H., Dhuime, B., Hawkesworth, C., Marschall, H.R., 2018. Laser-ablation MC-ICP-MS lead isotope microanalysis down to 10 µm: application to K-feldspar inclusions within zircon. *J. Anal. At. Spectrom.* 33, 195–204. <https://doi.org/10.1039/C7JA00276A>

- Delfino, D., 2014. Bronze recycling during the Bronze Age: some consideration about two metallurgical regions, in: *Metodologias de Trabalho Arqueológico*, Instituto Politécnico de Tomar. Centro de Pré-História, pp. 121–143.
- Delgado-Raack, S., Escanilla Artigas, N., Risch, R., 2014. Mazas Ocultas. Rastros de minería prehistórica en El Cerro Minado de Huerca-Overa (Almería). *Cuad. Prehist. Arqueol. Univ. Granada* 24, 13–44.
- Della Casa, P., Naef, L., Turck, R., 2016. Prehistoric copper pyrotechnology in the Swiss Alps: Approaches to site detection and chaîne opératoire. *Quat. Int.* 402, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.037>
- Delrieu, F., Gandois, H., Le Carlier De Veslud, C., Melin, M., 2015. Un nouvel assemblage de haches-lingots dans la vallée du Rhône : le dépôt de Loyettes (Ain). *Bull. L'Association Pour Promot. Rech. Sur L'Âge Bronze* 41–49.
- Denis, S., 2019. Inter-site Relationships at the End of the Early Neolithic in North-western Europe, Bartonian Flint Circulation and Macro-features Matching Method. *Lithic Technol.* 44, 132–152. <https://doi.org/10.1080/01977261.2019.1613009>
- Desachy, B., 2016. From observed successions to quantified time: formalizing the basic steps of chronological reasoning. *ACTA IMEKO* 5, 4–13. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v5i2.353
- Dietrich, O., 2014. Learning from ‘Scrap’ about Late Bronze Age Hoarding Practices: A Biographical Approach to Individual Acts of Dedication in Large Metal Hoards of the Carpathian Basin. *Eur. J. Archaeol.* 17, 468–486. <https://doi.org/10.1179/1461957114Y.0000000061>
- Dimić, V.B., 2019. Hammering the past: The experimental (re)construction and usage of prehistoric mining hammerstones from the Prljuša-Mali Šturac site, Rudnik Mountain. *Starinar* 85–112.
- Dimuccio, L.A., Rodrigues, N., Larocca, F., Pratas, J., Amado, A.M., Batista de Carvalho, L.A.E., 2017. Geochemical and mineralogical fingerprints to distinguish the exploited ferruginous mineralisations of Grotta della Monaca (Calabria, Italy). *Spectrochim. Acta A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 704–720. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.10.021>
- Doherty, C.L., Buckley, B.T., 2021. Translating Analytical Techniques in Geochemistry to Environmental Health. *Molecules* 26, 2821. <https://doi.org/10.3390/molecules26092821>
- Dolfini, A., 2014. Early Metallurgy in the Central Mediterranean, in: *Archaeometallurgy in Global Perspective*. Springer, New York, NY, pp. 473–506. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3_18
- Dolfini, A., 2013. The Emergence of Metallurgy in the Central Mediterranean Region: A New Model. *Eur. J. Archaeol.* 16, 21–62. <https://doi.org/10.1179/1461957112Y.0000000023>
- Domergue, C., 1990. Les Mines de la péninsule Ibérique dans l'Antiquité romaine. Collection de l'Ecole Française de Rome 127, Paris De Boccard.
- Domergue, C., 1987. Catalogue des mines et des fonderies antiques de la Péninsule Ibérique, Collection de la Casa de Velázquez.
- Drews, R., 1993. *The End of the Bronze Age: Changes in Warfare and the Catastrophe ca. 1200 B.C.* - Third Edition, 3rd ed. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvx5wbmc>
- Dubois, C., 1996. L'ouverture par le feu dans les mines : histoire, archéologie et expérimentations. *Rev. Archéom.* 20, 33–46. <https://doi.org/10.3406/arsci.1996.935>
- Dubreuil, L., 2001. Functional Studies of Prehistoric Grindingstones. *Bull. Cent. Rech. Fr. À Jérusalem* 73–87.
- Dutton, A., Fasham, P.J., Jenkins, D.A., Caseldine, A.E., Hamilton-Dyer, S., 1994. Prehistoric Copper Mining on the Great Orme, Llandudno, Gwynedd. *Proc. Prehist. Soc.* 60, 245–286. <https://doi.org/10.1017/S0079497X00003455>

- Earle, T., Ling, J., Uhnér, C., Stos-Gale, Z., Melheim, L., 2015. The Political Economy and Metal Trade in Bronze Age Europe: Understanding Regional Variability in Terms of Comparative Advantages and Articulations. *Eur. J. Archaeol.* 18, 633–657. <https://doi.org/10.1179/1461957115Y.0000000008>
- Efe, T., Fidan, M.E., 2006. Pre-Middle Bronze Age metal objects from inland Western Anatolia : A typological and chronological evaluation. *Anatolia Antiq.* 14, 15–43. <https://doi.org/10.3406/anata.2006.1062>
- Ehser, A., Borg, G., Pernicka, E., 2011. Provenance of the gold of the Early Bronze Age Nebra Sky Disk, central Germany: geochemical characterization of natural gold from Cornwall. *Eur. J. Mineral.* 23, 895–910. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2011/0023-2140>
- El Morr, Z., Cattin, F., Bourgarit, D., Lefrais, Y., Degryse, P., 2013. Copper quality and provenance in Middle Bronze Age I Byblos and Tell Arqa (Lebanon). *J. Archaeol. Sci.* 40, 4291–4305. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.05.025>
- El-Wardany, R., Jiao, J., El-Wardany, R., Jiao, J., 2023. History and Classification of Gold Mineralization in Egypt, in: *Rare Earth Elements - Emerging Advances, Technology Utilization, and Resource Procurement*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110042>
- Emami, M., Dardeniz, G., Vallcorba, O., Pourzargan, V., Tayyari, J., 2022. Towards a deeper understanding of the third millennium BC Iranian metallurgy: Use of synchrotron light for characterizing arsenic-bearing minerals in metal objects from Espidej. *Surf. Interface Anal.* 54, 642–656. <https://doi.org/10.1002/sia.7076>
- Erb-Satullo, N.L., Gilmour, B.J.J., Khakhutaishvili, N., 2015. Crucible technologies in the Late Bronze–Early Iron Age South Caucasus: copper processing, tin bronze production, and the possibility of local tin ores. *J. Archaeol. Sci.* 61, 260–276. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.05.010>
- Erol, H., 2019. Old Assyrian Metal Trade, its Volume and Interactions. *Belleten* 83, 779–806. <https://doi.org/10.37879/belleten.2019.779>
- Escanilla Artigas, N., 2016. Recursos minerales de cobre y su explotación prehistórica en el sudeste peninsular. El valle del Guadalentín (Murcia) (Ph.D. Thesis). Universitat Autònoma de Barcelona.
- Escanilla Artigas, N., Delgado-Raack, S., 2014. Minería prehistórica del cobre (3100-1550) en el levante murciano., in: *Minería y Metalurgia En El Mediterráneo y Su Periferia Oceánica*. Presented at the III Encuentros Internacionales del Mediterráneo, Phicaria, Mazarrón, pp. 78–99.
- Eshel, T., Erel, Y., Yahalom-Mack, N., Tirosh, O., Gilboa, A., 2019. Lead isotopes in silver reveal earliest Phoenician quest for metals in the west Mediterranean. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116, 6007–6012. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817951116>
- Esperou, J.-L., 2010. Les mines de cuivre préhistorique de Cabrières (Hérault). *Archéologie En Languedoc* 1, 43–74.
- Farthing, D.J., 2002. *The Mineralogy of Tin Slags* (PhD Thesis). Johns Hopkins University, Baltimore.
- Fasnacht, W., 2002. Dynamique de la production du cuivre au temps des royaumes de Chypre. *Cah. Cent. D'Études Chypr.* 32, 209–218. <https://doi.org/10.3406/chyp.2002.1414>
- Faure, G., 1986. The isotope geology of lead, in: *Principles of Isotope Geology*. JohnWiley and sons, New York, pp. 309–340.
- Faure, P., 1966. Les minerais de la Crète antique. *Rev. Archéologique* 45–78.
- Fernández-Lozano, J., Palao-Vicente, J.J., Blanco-Sánchez, J.A., Gutiérrez-Alonso, G., Remondo, J., Bonachea, J., Morellón, M., González-Díez, A., 2019. Gold-bearing Plio-Quaternary deposits: Insights from airborne LiDAR technology into the landscape evolution during the early Roman mining works in north-west Spain. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 24, 843–855. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.03.001>

- Figueiredo, E., Silva, R.J.C., Senna-Martinez, J.C., Araújo, M.F., Braz Fernandes, F.M., Inês Vaz, J.L., 2010. Smelting and recycling evidences from the Late Bronze Age habitat site of Baiões (Viseu, Portugal). *J. Archaeol. Sci.* 37, 1623–1634. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.023>
- Flohr Sørensen, T., 2012. Original copies: seriality, similarity and the simulacrum in the Early Bronze Age. *Dan. J. Archaeol.* 1, 45–61. <https://doi.org/10.1080/21662282.2012.750446>
- Fokkens, H., Harding, A., 2013. *The Oxford Handbook of the European Bronze Age*. OUP Oxford.
- Fontana, A., Vinci, G., Tasca, G., Mozzi, P., Vacchi, M., Bivi, G., Salvador, S., Rossato, S., Antonioli, F., Asioli, A., Bresolin, M., Di Mario, F., Hajdas, I., 2017. Lagoonal settlements and relative sea level during Bronze Age in Northern Adriatic: Geoarchaeological evidence and paleogeographic constraints. *Quat. Int., Quaternary coastal and marine studies in Central Mediterranean* 439, 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.12.038>
- Fonte, J., Meunier, E., Gonçalves, J.A., Dias, F., Lima, A., Gonçalves-Seco, L., Figueiredo, E., 2021. An Integrated Remote-Sensing and GIS Approach for Mapping Past Tin Mining Landscapes in Northwest Iberia. *Remote Sens.* 13, 3434. <https://doi.org/10.3390/rs13173434>
- Fontijn, D.R., 2002. Sacrificial landscapes: cultural biographies of persons, objects and “natural” places in the Bronze Age of the Southern Netherlands, C. 2300-600 BC, *Analecta praehistorica Leidensia*. University of Leiden, Leiden.
- Forbes, R.J., 1966. *Studies in ancient technology, Ancient Geology: Ancient Mining and Quarrying: Ancient Mining Techniques*. E.J. Brill, Leiden.
- Forel, B., Gabillot, M., Monna, F., Forel, S., Dommergues, C.H., Gerber, S., Petit, C., Mordant, C., Chateau, C., 2009. Morphometry of Middle Bronze Age palstaves by Discrete Cosine Transform. *J. Archaeol. Sci.* 36, 721–729. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.021>
- Förstner, U., 1985. Chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soils, in: Leschber, R., Davis, R.D., L’Hermite, P. (Eds.), *CEC*. Elsevier Science Pub. Co., Inc., New York, NY, pp. 1–30.
- Frahm, E., Carolus, C.M., 2022. Identifying the origins of obsidian artifacts in the Deh Luran Plain (Southwestern Iran) highlights community connections in the Neolithic Zagros. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 119, e2109321119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109321119>
- Frame, L., 2011. *Metal Finds from Godin Tepe, Iran: Production, Consumption, and Trade* (Thesis).
- Frank, A.G., 1993. Bronze Age World System Cycles. *Curr. Anthropol.* 34, 383–429.
- Frank, C., Pernicka, E., 2012. Copper artefacts of the Mondsee group and their possible sources, in: Midgley, M.S., Sanders, J. (Eds.), *Lake Dwellings after Robert Munro*. Presented at the Munro International Seminar: The Lake Dwellings of Europe, Sidestone Press, University of Edinburgh, pp. 113–138.
- Franke, W., Matte, P., Tait, J., 2005. Europe: Variscan orogeny. *Encycl. Geol.*, Elsevier, Oxford 2, 75–85.
- Fregni, E.G., 2014. *The Compleat Metalsmith: Craft and Technology in the British Bronze Age* (PhD Thesis). University of Sheffield.
- Freilich, S., Ringbauer, H., Los, D., Novak, M., Pavičić, D.T., Schiffels, S., Pinhasi, R., 2021. Reconstructing genetic histories and social organisation in Neolithic and Bronze Age Croatia. *Sci. Rep.* 11, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94932-9>
- Friedrich, W.L., 2013. The Minoan Eruption of Santorini around 1613 BC and its consequences. *Tagungen Landesmus. Für Vorgesch. Halle* 9, 37–48.
- Funari, P.P.A., 1998. The archaeology of ethnicity. Constructing identities in the past and present. *Rev. Antropol.* 41. <https://doi.org/10.1590/S0034-77011998000100009>

- Furon, R., 1966. *Manuel de préhistoire générale: géologie et biogéographie, évolution de l'humanité, archéologie préhistorique, les métaux et la protohistoire*. Payot, Paris, France.
- Gabillot, M., 2021. *Métallurgistes en France orientale au bronze moyen: nouvelles analyses physico-chimiques et morphométriques*, Art, archéologie & patrimoine. Éditions universitaires de Dijon, Dijon.
- Gabillot, M., 2000. Les dépôts complexes de la fin du Bronze moyen et du début du Bronze final en France du Centre-Est. Nouvelle approche. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 97, 459–476. <https://doi.org/10.3406/bspf.2000.11133>
- Gabillot, M., Colin, Q., 2023. *Métallurgie au bronze moyen dans les Alpes: production locale ou importation ?* Editions universitaires de Dijon, Dijon.
- Gachina, J., Gomez de Soto, J., Bourhis, J., Veber, C., 2008. Un dépôt de la fin de l'Âge du bronze à Meschers (Charente-Maritime). Remarques sur les bracelets et tintinnabula du type de Vaudrevange en France de l'Ouest. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 105, 159–185. <https://doi.org/10.3406/bspf.2008.13709>
- Gale, N.H., 2009. A response to the paper of A. M. Pollard: What a long, strange trip it's been: Lead isotopes and archaeology. In A. J. Shortland, I. C. Freestone, & T. Rehren, T. (eds.) *From mine to microscope: Advances in the study of ancient technology* 191–196.
- Gale, N.H., 1980. Some aspects of lead and silver mining in the Aegean, in: *Thera and the Aegean World II*. Presented at the Thera and the Aegean World, London, pp. 161–195.
- Gale, N.H., Kayafa, M., Stos-Gale, Z.A., 2009. Further evidence for Bronze Age production of copper from ores in the Lavrion ore district, Attica, Greece, in: *Proceedings of the 2nd International Conference: Archaeometallurgy in Europe*. Presented at the Archaeometallurgy in Europe II, Milan, pp. 158–76.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z., Radouncheva, A., Ivanov, I., Lilov, P., Todorov, T., Panayotov, I., 2000. Early Metallurgy in Bulgaria. *Annu. Dep. Archaeol. - NBUIAM IV–V*, 102–168.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 2000. Lead isotope analyses applied to provenance studies, in: Ciliberto, E., Spoto, G. (Eds.), *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*. Wiley-Interscience, New York, pp. 503–584.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 1991. Lead Isotopes Studies in the Aegean (The British Academy Project). *Proc. Br. Acad.* 77, 63–108.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 1989. Lead isotope studies in the Aegean (The British Academy Project), in: Allen, R.O. (Ed.), *Archaeological Chemistry IV*. American Chemical Society, Washington DC, pp. 159–198.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 1986. Oxhide Copper Ingots in Crete and Cyprus and the Bronze Age Metals Trade. *Annu. Br. Sch. Athens* 81, 81–100.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 1981. Cycladic Lead and Silver Metallurgy. *Annu. Br. Sch. Athens* 76, 169–224. <https://doi.org/10.1017/S0068245400019523>
- Galili, E., Gale, N., Rosen, B., 2013. A Late Bronze Age Shipwreck with a Metal Cargo from Hishuley Carmel, Israel. *Int. J. Naut. Archaeol.* 42, 2–23. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2012.00344.x>
- Galili, E., Shmueli, N., Artzy, M., 1986. Bronze Age ship's cargo of copper and tin. *Int. J. Naut. Archaeol.* 15, 25–37. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1986.tb00540.x>
- Gallay, A., Lahouze Davaud, M.-N., 1976. Pour une préhistoire de la métallurgie : (Europe, Proche-Orient). *Arch. Suisses Anthropol. Générale* 40, 137–200.
- Gallin, L.J., Tykot, R.H., 1993. Metallurgy at Nuraghe Santa Barbara (Bauladu), Sardinia. *J. Field Archaeol.* 20, 335–345. <https://doi.org/10.2307/530057>

- Gandois, H., Bedault, L., Penicaud, J., Prévost, C., Quesnel, L., Rime, C., 2021. Rapport d'opération de sondage archéologique sur le Domaine Public Maritime sur la plage de l'Ecuissière, île d'Oléron, Charente-Maritime (Research Report No. OA-4543). DRASSM.
- Gandois, H., Burlot, A., Mille, B., De Veslud, C.L.C., 2019. Early Bronze Age axe-ingots from Brittany: evidence for connections with south-west Ireland? *Proc. R. Ir. Acad. Archaeol. Cult. Hist. Lit.* 119C, 1–36. <https://doi.org/10.3318/priac.2019.119.04>
- Garavelli, A., Larocca, F., Levato, C., Pinto, D., 2012. Prehistoric mines of the upper Esaro valley (Calabria, Italy), in: *The Impact of Historic and Prehistoric Mining Activities on the Environment and Societies in Europe*. Presented at the 2nd Mining in European History-Conference, Innsbruck - november 7-10th 2012.
- Garbacz-Klempka, A., Kozana, J., Piękoś, M., Cieślak, W., Perek, M., Kowalski, Ł., Adamczak, K., Łoś, J., 2015. Copper and Arsenical Copper During Eneolithic in Metallographic and Mechanical Properties Examination. *Arch. Foundry Eng.* 15, 23–28.
- García de Madinabeitia, S., Gil Ibarguchi, J.I., Santos Zalduegui, J.F., 2021. IBERLID: A lead isotope database and tool for metal provenance and ore deposits research. *Ore Geol. Rev.* 137, 104279. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104279>
- García Palomero, F., García Magariño, M., Bedia Fernández, J.L., Sides, E.J., 1986. Nuevas investigaciones y trabajos de evaluación de reservas de gossan en Minas de Riotinto. *Bol. Geológico Min.* 97, 82–102.
- Garenne-Marot, L., 1984. Le Cuivre en Egypte pharaonique : sources et métallurgie. *Paléorient* 10, 97–126. <https://doi.org/10.3406/paleo.1984.4352>
- Garfinkel, Y., Klimscha, F., Shalev, S., Rosenberg, D., 2014. The Beginning of Metallurgy in the Southern Levant: A Late 6th Millennium cal BC Copper Awl from Tel Tsaf, Israel. *PLoS ONE* 9, e92591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092591>
- Garner, J., 2015. Bronze Age tin mines in central Asia, in: Andreas Hauptmann/Diana Modarressi-Tehrani (Eds.), *Archaeometallurgy in Europe III. Proceedings of the 3rd International Conference Deutsches Bergbau-Museum Bochum, June 29 – July 1, 2011*. Presented at the Proceedings of the 3rd International Conference Deutsches Bergbau-Museum Bochum June 29 – July 1, pp. 135–145.
- Gaucher, G., 1992. Les subdivisions du bronze final. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 89, 51–64. <https://doi.org/10.3406/bspf.1992.9498>
- Gauss, R., 2013. The Development of Metallurgy on the Iberian Peninsula. Technological and Social Patterns of a Long-term Innovation Process, in: *Metal Matters Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity*. Stefan Burmeister, Svend Hansen, Michael Kunst, Nils Müller-Scheeßel, pp. 209–229.
- Gauss, R., Rehren, T., Rovira Llorens, S., 2004. Almizaraque and the early copper metallurgy of Southeast Spain: New data. *Mitteilungen Dtsch. Archäologischen Inst. Abt. Madr.* 45, 33–56.
- Gavranović, M., Mehofer, M., Kapuran, A., Koledin, J., Mitrović, J., Papazovska, A., Pravidur, A., Đorđević, A., Jacanović, D., 2022. Emergence of monopoly–Copper exchange networks during the Late Bronze Age in the western and central Balkans. *PLOS ONE* 17, e0263823. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263823>
- Gebauer, A.B., Sørensen, L.V., Taube, M., Wielandt, D.K.P., 2021. First Metallurgy in Northern Europe: An Early Neolithic Crucible and a Possible Tuyère from Lønt, Denmark. *Eur. J. Archaeol.* 24, 27–47. <https://doi.org/10.1017/ea.2019.73>
- Gebhard, R., Krause, R., 2020. Critical comments on the find complex of the so-called Nebra Sky Disk. *Archäol. Informationen* 43, 325–346. <https://doi.org/10.11588/ai.2020.1.81419>

- Genz, H., 2000. The Organisation of Early Bronze Age Metalworking in the Southern Levant. *Paléorient* 26, 55–65. <https://doi.org/10.3406/paleo.2000.4698>
- Georgakopoulou, M., 2016. Mobility and Early Bronze Age Southern Aegean Metal Production, in: Kiriati, E., Knappett, C. (Eds.), *Human Mobility and Technological Transfer in the Prehistoric Mediterranean*. pp. 46–67.
- Georgakopoulou, M., 2005. Technology and organisation of early Cycladic metallurgy: copper on Seriphos and Keros, Greece. (Doctoral). University of London.
- Georgakopoulou, M., 2004. Examination of copper slags from the Early Bronze Age site of Daskaleio-Kavos on the island of Keros (Cyclades, Greece). *Inst. Archaeometall. Stud. IAMS* 24, 3–12.
- George, L.L., Cook, N.J., Crowe, B.B.P., Ciobanu, C.L., 2018. Trace elements in hydrothermal chalcopyrite. *Mineral. Mag.* 82, 59–88. <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.021>
- Ghazi, A.M., Millette, J.R., 2006. 4. Lead, in: *Environmental Forensics*. Elsevier, pp. 55–79. <https://doi.org/10.1016/B978-012507751-4/50026-4>
- Gilbert, S.E., Glorie, S., 2020. Removal of Hg interferences for common Pb correction when dating apatite and titanite by LA-ICP-MS/MS. *J. Anal. At. Spectrom.* 35, 1472–1481. <https://doi.org/10.1039/D0JA00224K>
- Gimbutas, M., 2005. *The Language of the Goddess*, 1er édition. ed. Thames & Hudson Ltd, London.
- Giot, P., Lulzac, Y., 1998. Datation à l'Âge du bronze d'une exploitation de cassitérite dans le Finistère. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 95, 598–601. <https://doi.org/10.3406/bspf.1998.10893>
- Girard, J., Munoz, M., Cauuet, B., Polve, M., Aries, S., Callegarin, L., 2010. Mines d'argent du Montaignu (Hautes-Pyrénées, France). *ArchéoSciences* 235–242.
- Giumlia-Mair, A., Albanese Procelli, R.M., Lo Schiavo, F., 2010. The Metallurgy of the Sicilian Final Bronze Age/Early Iron Age necropolis of Madonna del Piano (Catania, Sicily). *Trab. Prehist.* 67, 469–488. <https://doi.org/10.3989/tp.2010.10051>
- Giunti, I., 2011. Geochemical and isotopic tracers in copper deposits and ancient artifacts: a database for provenance. *Università degli Studi di Padova*, Padova.
- Glumac, P.D., Todd, J.A., 1990. Fifth Millennium BC Evidence for Metallurgical Processing of Copper and Copper Alloys in South-East Europe. *MRS Online Proc. Libr.* 185, 637–642. <https://doi.org/10.1557/PROC-185-637>
- Glumac, P.D., Todd, J.A., 1987. New evidence for the use of lead in prehistoric southeast Europe. *Archeomaterials* 2, 29–37.
- Goemaere, E., Challe, S., de Longueville, S., Delbey, T., Demaiffe, D., 2022. Tracking the source of lead of medieval glazed pottery of the Meuse valley (Belgium) through lead isotope analyses. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 42, 103366. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103366>
- Golden, J.M., 2010. *Dawn of the metal age: technology and society during the Levantine Chalcolithic*, Approaches to anthropological archaeology. Equinox Pub, London ; Oakville, CT.
- Goldenberg, G., 1998. L'exploitation du cuivre dans les Alpes autrichiennes à l'Âge du Bronze, in: Rychner, V. (Ed.), *L'Atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère : actes du colloque international "Bronze 96"*, Neuchâtel et Dijon, 1996 ; Tome II. (session de Dijon) : du minerai au métal, du métal à l'objet, Documents préhistoriques. Ed. du Comité des travaux historiques et scientifiques, Paris, pp. 9–24.
- Goncalves, I., 2022. Exploiting and crossing the Egyptian Eastern Desert during the Pharaonic Era, in: Durand, C., Marchand, J., Redon, B., Schneider, P. (Eds.), *Networked Spaces : The Spatiality of Networks in the*

- Red Sea and Western Indian Ocean, *Archéologie(s)*. MOM Éditions, Lyon, pp. 329–346. <https://doi.org/10.4000/books.momeditions.16431>
- Goucher, C., Teilhet, J., Wilson, K., Chow, T., 1976. Lead isotope studies of metal sources for ancient Nigerian 'Bronzes.' *Nature* 262, 130–131. <https://doi.org/10.1038/262130a0>
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J., Galieue, X., 2019. Re-assessing the European lithium resource potential – A review of hard-rock resources and metallogeny. *Ore Geol. Rev.* 109, 494–519. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.015>
- Grabner, M., Wächter, E., Nicolussi, K., Bolka, M., Sormaz, T., Steier, P., Wild, E.M., Barth, F.E., Kern, A., Rudorfer, J., Kowarik, K., Stöllner, T., Reschreiter, H., 2021. Prehistoric salt mining in Hallstatt, Austria. New chronologies out of small wooden fragments. *Dendrochronologia* 66, 125814. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125814>
- Graeser, S., Friedrich, G., 1970. Zur Frage der Altersstellung und Genese der Blei-Zink-Vorkommen der Sierra de Cartagena in Spanien. *Miner. Deposita* 5, 365–374. <https://doi.org/10.1007/BF00206733>
- Grazia Melis, M., 2014. Silver in Neolithic and Eneolithic Sardinia, in: *Metalle Der Macht – Frühes Gold Und Silber*. Presented at the 6. Mitteldeutscher Archäologentag, Halle (Saale), pp. 483–494.
- Grögler, N., Geiss, J., Grünenfelder, M., Houtermans, F.C., 1966. Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Z Naturforsch* 21, 1167–1172.
- Güder, Ü., Takaoglu, T., Özdemir, A., 2021. Middle Chalcolithic Copper Tools from Gülpınar in north-western Anatolia: An Archaeometric Approach. *Archäol. Korresp.* 51, 155–170.
- Guénette-Beck, B., Serneels, V., 2010. L'interprétation archéologique des données isotopiques de plomb. Discussion à partir d'exemples suisses. *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 289–297. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2850>
- Guilaine, J., 1991. Roquemengarde et les débuts de la métallurgie en France méditerranéenne, in: *Découverte Du Métal*, Picard. Paris, pp. 278–294.
- Guilbert, J.M., Park, C.F., 2007. *The geology of ore deposits*. Waveland Press, Long Grove, Illinois.
- Gulson, B., Kamenov, G.D., Manton, W., Rabinowitz, M., 2018. Concerns about Quadrupole ICP-MS Lead Isotopic Data and Interpretations in the Environment and Health Fields. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 723. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040723>
- Haak, W., Lazaridis, I., Patterson, N., Rohland, N., Mallick, S., Llamas, B., Brandt, G., Nordenfelt, S., Harney, E., Stewardson, K., Fu, Q., Mittnik, A., Bánffy, E., Economou, C., Francken, M., Friederich, S., Pena, R.G., Hallgren, F., Khartanovich, V., Khokhlov, A., Kunst, M., Kuznetsov, P., Meller, H., Mochalov, O., Moiseyev, V., Nicklisch, N., Pichler, S.L., Risch, R., Rojo Guerra, M.A., Roth, C., Szécsényi-Nagy, A., Wahl, J., Meyer, M., Krause, J., Brown, D., Anthony, D., Cooper, A., Alt, K.W., Reich, D., 2015. Massive migration from the steppe was a source for Indo-European languages in Europe. *Nature* 522, 207–211. <https://doi.org/10.1038/nature14317>
- Hadjisavvas, S., 2002. The contribution of the Late Cypriote economy to the emergence of kingship in Cyprus. *Cah. Cent. D'Études Chypr.* 32, 53–58. <https://doi.org/10.3406/cchyp.2002.1403>
- Hamon, C., 2016. Salt mining tools and techniques from Duzdaği (Nakhchivan, Azerbaijan) in the 5th to 3rd millennium B.C. *J. Field Archaeol.* 41, 510–528. <https://doi.org/10.1080/00934690.2016.1201615>
- Hanks, B., Doonan, R., 2009. From Scale to Practice: A New Agenda for the Study of Early Metallurgy on the Eurasian Steppe. *J. World Prehistory* 22, 329–356. <https://doi.org/10.1007/s10963-009-9031-5>
- Hanning, E., Gauß, R., Goldenberg, G., 2010. Metal for Zambujal: experimentally reconstructing a 5000-year-old technology. *Trab. Prehist.* 67, 287–304. <https://doi.org/10.3989/tp.2010.10040>

- Hansen, S., 2013. Innovative metals: copper, gold and silver in the Black Sea region and the Carpathian Basin during the 5th and 4th Millennium BC, in: Burmeister, S., Hansen, Sven, Kunst, M., Müller-Scheeßel, N. (Eds.), *Metal Matters. Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity*. Studien aus den Forschungsclustern des Deutschen Archäologischen Instituts, Rahden/Westfalen, pp. 137–167.
- Harbottle, G., 1976. Activation analysis in archaeology. *Radiochem. Lond.* 3, 33–72.
- Harding, A., 2000. *European societies in the Bronze Age*, Cambridge world archaeology. Cambridge University press, Cambridge.
- Haubner, R., Strobl, S., 2023. Considerations on Copper Smelting from Fahlores and the Metallurgy of Cu-As Bronzes. *BHM Berg- Hüttenmänn. Monatshefte* 168, 434–444. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01230-6>
- Haubner, R., Strobl, S., 2022. Considerations on Copper Smelting from Fahlores and the Metallurgy of Cu-As Bronzes. *BHM Berg- Hüttenmänn. Monatshefte*. <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01230-6>
- Haubner, R., Strobl, S., Trebsche, P., 2023. Materialographic investigations of plate slags from the Late Bronze Age copper production site of Priggglitz-Gasteil (Lower Austria). *J. Archaeol. Sci. Rep.* 48, 103838. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103838>
- Hauptmann, A., 2021. *Archaeometallurgy – Materials Science Aspects*, 1st ed. 2020 édition. ed. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland.
- Hauptmann, A., 2007. *The Archaeometallurgy of Copper: Evidence from Faynan, Jordan*, Natural Science in Archaeology. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72238-0>
- Hauptmann, A., 2003. Rationales of liquefaction and metal separation in earliest copper smelting: basics for reconstructing Chalcolithic and Early Bronze Age smelting processes, in: *Archaeometallurgy in Europe I*. Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, pp. 459–468.
- Hauptmann, A., Begemann, F., Heitkemper, E., Pernicka, E., Schmitt-Strecker, S., 1992. Early Copper Produced at Feinan, Wadi Araba, Jordan: The Composition of Ores and Copper. *Archéomatériaux* 6, 1–33.
- Hauptmann, A., Klein, S., 2009. Bronze Age gold in Southern Georgia. *ArcheoSciences Rev. Archéom.* 75–82. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.2037>
- Hauptmann, A., Maddin, R., Prange, M., 2002. On the Structure and Composition of Copper and Tin Ingots Excavated from the Shipwreck of Uluburun. *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 1–30. <https://doi.org/10.2307/1357777>
- Hauptmann, A., Schmitt-Strecker, S., Levy, T., Begemann, F., 2015. On Early Bronze Age Copper Bar Ingots from the Southern Levant. *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 373, 1–24. <https://doi.org/10.5615/bullamerschoorie.373.0001>
- Haustein, M., Gillis, C., Pernicka, E., 2010. Tin Isotopy—A New Method for Solving Old Questions. *Archaeometry* 52, 816–832. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2010.00515.x>
- Havlíček, F., Kuča, M., 2017. Waste Management in Bronze Age Europe. *J. Landsc. Ecol.* 10, 35–43. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0008>
- Heiss, A.G., Jakobitsch, T., Wiesinger, S., Trebsche, P., 2021. Dig out, Dig in! Plant-based diet at the Late Bronze Age copper production site of Priggglitz-Gasteil (Lower Austria) and the relevance of processed foodstuffs for the supply of Alpine Bronze Age miners. *PLOS ONE* 16, e0248287. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248287>
- Heiss, A.G., Oeggli, K., 2008. Analysis of the fuel wood used in Late Bronze Age and Early Iron Age copper mining sites of the Schwaz and Brixlegg area (Tyrol, Austria). *Veg. Hist. Archaeobotany* 17, 211–221. <https://doi.org/10.1007/s00334-007-0096-8>

- Hellbing, L., 1979. *Alasia Problems* (PhD Thesis). Göteborg University.
- Henderson, J., Evans, J.A., Sloane, H.J., Leng, M.J., Doherty, C., 2005. The use of oxygen, strontium and lead isotopes to provenance ancient glasses in the Middle East. *J. Archaeol. Sci.* 32, 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.05.008>
- Hinz, M., Heitz, C., 2022. Unsupervised Classification of Neolithic Pottery From the Northern Alpine Space Using t-SNE and HDBSCAN. *Open Archaeol.* 8, 1183–1217. <https://doi.org/10.1515/opar-2022-0274>
- Hinz, M., Schirmacher, J., Kneisel, J., Rinne, C., Weinelt, M., 2019. The Chalcolithic–Bronze Age transition in southern Iberia under the influence of the 4.2 kyr event? A correlation of climatological and demographic proxies. *J. Neolit. Archaeol.* 1-26 Pages. <https://doi.org/10.12766/JNA.2019.1>
- Hitzman, M.W., Selley, D., Bull, S., 2010. Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History. *Econ. Geol.* 105, 627–639. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.627>
- Hoffmann, B.C., Miller, H.M.-L., 2014. Production and Consumption of Copper-Base Metals in the Indus Civilization, in: *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*. Springer-Verlag, New York, pp. 697–727.
- Holmes, A., 1946. An estimate of the age of the Earth. *Nature* 157, 680–684. <https://doi.org/10.1038/157680a0>
- Holmqvist, E., Wessman, A., Mänttari, I., Lahaye, Y., 2019. Lead isotope and geochemical analyses of copper-based metal artefacts from the Iron Age water burial in Levänluhta, Western Finland. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 26, 101854. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.05.019>
- Hopper, R.J., 1968. The Laurion Mines: A Reconsideration. *Annu. Br. Sch. Athens* 63, 293–326. <https://doi.org/10.1017/S006824540001443X>
- Höppner, B., Bartelheim, M., Huijsmans, M., Krauss, R., MARTINEK, K.-P., Pernicka, E., Schwab, R., 2005. Prehistoric copper production in the Inn Valley (Austria), and the earliest copper in central Europe. *Archaeometry* 47, 293–315.
- Horne, L., 1982. Fuel for the metal worker: the role of Charcoal and Charcoal Production in Ancient Metallurgy. *Exped. Mag., Penn Museum* 25, 6–13.
- Houtermans, F.G., 1946. Die Isotopenhäufigkeiten im natürlichen Blei und das Alter des Urans. *Naturwissenschaften* 33, 185–186. <https://doi.org/10.1007/BF00585229>
- Hsu, Y.-K., Rawson, J., Pollard, A.M., Ma, Q., Luo, F., Yao, P.-H., Shen, C.-C., 2018. Application of Kernel Density Estimates to Lead Isotope Compositions of Bronzes from Ningxia, North-West China. *Archaeometry* 60, 128–143. <https://doi.org/10.1111/arcm.12347>
- Hsu, Y.-K., Sabatini, B.J., 2019. A geochemical characterization of lead ores in China: An isotope database for provenancing archaeological materials. *PLoS ONE* 14, e0215973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215973>
- Hudson, M.J., Bausch, I.R., Robbeets, M., Li, T., White, J.A., Gilaizeau, L., 2021. Bronze Age Globalisation and Eurasian Impacts on Later Jōmon Social Change. *J. World Prehistory* 34, 121–158. <https://doi.org/10.1007/s10963-021-09156-6>
- Huelga-Suarez, G., Moldovan, M., Fernández, M.S., de Blas Cortina, M.Á., Alonso, J.I.G., 2014. Isotopic Composition of Lead in Copper Ores and a Copper Artefact from the La Profunda Mine (León, Spain). *Archaeometry* 56, 651–664. <https://doi.org/10.1111/arcm.12040>
- Huelga-Suarez G., Moldovan M., Suárez Fernández M., Ángel De Blas Cortina M., Ignacio García Alonso J., 2012. Defining the Lead Isotopic Fingerprint of Copper Ores from North-West Spain: The El Milagro Mine (Asturias). *Archaeometry* 56, 88–101. <https://doi.org/10.1111/arcm.12005>

- Hunt Ortiz, M.A., 2005. La explotación de los recursos minerales en Europa y la Península Ibérica durante la Prehistoria, in: *Bocamina - Patrimonio Minero de La Region de Murcia*. Musei de la Ciencia y el Agua, pp. 3–18.
- Hunt Ortiz, M.A., 2003. Prehistoric mining and metallurgy in south west Iberian Peninsula. *Archaeopress*.
- Hunt Ortiz, M.A., Contreras Cortés, F., Arboledas Martínez, L., 2011. La procedencia de los recursos minerales metálicos en el poblado de la Edad de Bronce de Peñalosa (Baños de la Encina, Jaén), in: *Actas Del Quinto Congreso Internacional Sobre Minería y Metalurgia Históricas En El SE Europeo (León, 2008) : Libro En Homenaje a Claude Domergue*. SEDPGYM, Madrid, pp. 197–208.
- Hunt Ortiz, M.A.H., Estarellas, B.L., Mateo, L.P., Simonet, B.S., 2014. Aprovechamiento de recursos cupríferos en la edad del bronce de Menorca: la mina de sa mitja lluna (Illa den Colom). *Cuad. Prehist. Arqueol. Univ. Granada* 85–109.
- Huston, D., Relvas, J., Gemmell, B., Driberg, S., 2011. The role of granites in volcanic-hosted massive sulphide ore-forming systems: An assessment of magmatic-hydrothermal contributions. *Miner. Deposita* 46, 473–507. <https://doi.org/10.1007/s00126-010-0322-7>
- Huth, C., 2000. Quality and quantity in Late Bronze and Early Iron Age exchange systems, in: Giunlia-Mair, A. (Ed.), *Ancient Metallurgy between Oriental Alps and Pannonian Plain*. Aquileia, Trieste, pp. 25–39.
- Ialongo, N., Hermann, R., Rahmstorf, L., 2021. Bronze Age weight systems as a measure of market integration in Western Eurasia. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2105873118>
- Ibáñez, J.J., Ortega, D., Campos, D., Khalidi, L., Méndez, V., Teira, L., 2016. Developing a complex network model of obsidian exchange in the Neolithic Near East: Linear regressions, ethnographic models and archaeological data. *Paléorient* 42, 9–32. <https://doi.org/10.3406/paleo.2016.5718>
- Inacio Alves, M., Robert, I., Tavares, A.D., Pessoa, I., Alves Martins, M.V., Saar de Almeida, B., Geraldes, M.C., 2019. Evaluation by LA-MC-ICP-MS of NIST 612 Pb isotopic composition as external reference material and a new proxy for environmental characterization using (carbonatic) bivalves shells. *Int. J. Mass Spectrom.* 446, 116196. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2019.116196>
- Irrgeher, J., Berger, T., Tchaikovsky, A., Tschegg, C., Gouya, G., Lechner, P., Retzmann, A., Opper, C., Firbas, C., Freissmuth, M., Peschel-Credner, K., Anderle, K., Meisslitzer, C., Wolzt, M., Prohaska, T., 2023. Enriched stable ^{204}Pb as tracer at ultra-low levels in clinical investigations. *Anal. Bioanal. Chem.* 415, 255–268. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04311-0>
- Iversen, R., 2017. Big-Men and Small Chiefs: The Creation of Bronze Age Societies. *Open Archaeol.* 3. <https://doi.org/10.1515/opar-2017-0023>
- Ixer, R.A., 1999. The Role of Ore Geology and Ores in the Archaeological Provenancing of Metals, in: *Metals in Antiquity*, BAR International Series. Archaeopress, Oxford.
- Ixer, R.A., Budd, P., 1998. The Mineralogy of Bronze Age Copper Ores from the British Isles: Implications for the Composition of Early Metalwork. *Oxf. J. Archaeol.* 17, 15–41. <https://doi.org/10.1111/1468-0092.00049>
- Ixer, R.A., Patrick, R., 2003. Copper-arsenic ores and Bronze Age mining and metallurgy with special reference to the British Isles. *Min. Met. Prod. Ages* 9–20.
- Ixer, R.A., Patrick, R.A.D., 1995. Cu-Pb-Zn-Co-Ag Mineralization at Ross Island-Muckcross Mine, Killarney, Ireland. *Abstr. Miner. Depos. Study Group Meet. Manch.*
- Jackson, J., 1984. The Age of Primitive Copper Mines on Mount Gabriel, West County Cork. *J. Ir. Archaeol.* 2, 41–50. <https://doi.org/10.2307/30001581>

- Jahn, B., Cuvellier, H., 1994. Pb-Pb and U-Pb geochronology of carbonate rocks: an assessment. *Chem. Geol.* 115, 125–151. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90149-X)
- Jambon, A., 2017. Bronze Age iron: Meteoritic or not? A chemical strategy. *J. Archaeol. Sci.* 88, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.008>
- Jansen, M., Hauptmann, A., Klein, S., Gambashidze, I., Jalilov, B., 2021. Geochemistry of gold from the prehistoric mine of Sakdrisi and Transcaucasian gold artefacts between the 4th and 2nd millennia BC, in: Marro, C., Stöllner, T. (Eds.), *On Salt, Copper and Gold: The Origins of Early Mining and Metallurgy in the Caucasus*, Archéologie(s). MOM Éditions, Lyon, pp. 181–200. <https://doi.org/10.4000/books.momeditions.12542>
- Jansen, M., Hauptmann, A., Klein, S., Seitz, H.-M., 2018. The potential of stable Cu isotopes for the identification of Bronze Age ore mineral sources from Cyprus and Faynan: results from Uluburun and Khirbat Hamra Ifdan. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 10, 1485–1502. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0465-x>
- Jantzen, D., Brinker, U., Orschiedt, J., Heinemeier, J., Piek, J., Hauenstein, K., Krüger, J., Lidke, G., Lübke, H., Lampe, R., Lorenz, S., Schult, M., Terberger, T., 2011. A Bronze Age battlefield? Weapons and trauma in the Tollense Valley, north-eastern Germany. *Antiquity* 85, 417–433. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00067843>
- Jébrak, M., Marcoux, E., 2008. Géologie des ressources minérales. *Ressources Minérales et Faune du Québec*.
- Jenkins, D.A., Timberlake, S., Davidson, A., Mal, K., Marshall, P., Mighall, T., O'Brien, C., Smith, D.N., 2021. Copper Mining in the Bronze Age at Mynydd Parys, Anglesey, Wales. *Proc. Prehist. Soc.* 87, 261–291. <https://doi.org/10.1017/ppr.2021.4>
- Jennings, B., 2016. Exploring Late Bronze Age systems of bronzework production in Switzerland through Network Science. *STAR Sci. Technol. Archaeol. Res.* 2, 90–112. <https://doi.org/10.1080/20548923.2016.1183940>
- Jennings, B., 2014. Repair, Recycle or Re-use? Creating Mnemonic Devices Through the Modification of Object Biographies During the Late Bronze Age in Switzerland. *Camb. Archaeol. J.* 24, 163–176. <https://doi.org/10.1017/S0959774314000055>
- Jeunesse, C., 2016. Biens précieux et biens exceptionnels dans la Préhistoire récente de l'Europe. Le système du dépôt et de la tombe élitaire et la naissance de l'Europe barbare. *Préhistoires Méditerranéennes*. <https://doi.org/10.4000/pm.1299>
- Jochum, K.P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Jacob, D.E., Stracke, A., Birbaum, K., Frick, D.A., Günther, D., Enzweiler, J., 2011. Determination of Reference Values for NIST SRM 610–617 Glasses Following ISO Guidelines. *Geostand. Geoanalytical Res.* 35, 397–429. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2011.00120.x>
- Johannsen, J.W., 2016. Heavy Metal – lead in Bronze Age Scandinavia. *Fornvännen* 111, 153–161.
- John, J., Bankoff, H.A., Powell, W., Tisucka, M., 2019. Unearthing Europe's Bronze Age Mining Heritage with Tin Isotopes: A Case Study from Central Europe. *Eur. Geol. J.* 48, 58–62.
- Johnson, A.W., Earle, T.K., 1987. *The evolution of human societies: from foraging group to agrarian state*, 2nd ed. ed. Stanford University Press, Stanford, Calif.
- Jones, A.M., Gossip, J., Quinnell, H., 2016. Meet the smiths. *Br. Archaeol.* 146, 24–29.
- Jones, A.M., Quinnell, H., 2011. The Neolithic and Bronze Age in Cornwall, c 4000 cal BC to c 1000 cal BC: an overview of recent developments. *Corn. Archaeol.* 50, 197–229.
- Jones, J.E., 1982. The Laurion Silver Mines: A Review of Recent Researches and Results. *Greece Rome* 29, 169–183.

- Jones, M.R., 2007. Oxhide ingots, copper production, and the mediterranean trade in copper and other metals in the bronze age (PhD Thesis). Texas A&M University.
- Jouffroy-Bapicot, I., Forel, B., Monna, F., Petit, C., 2008. Paléoméallurgie dans le Morvan : l'apport des analyses polliniques et géochimiques, in: *Le Peuplement de l'arc Alpin*. CTHS, Paris, pp. 323–334.
- Jouffroy-Bapicot, I., Pulido, M., Baron, S., Galop, D., Monna, F., Lavoie, M., Ploquin, A., Petit, C., De Beaulieu, J.-L., Richard, H., 2007. Environmental impact of early palaeometallurgy: pollen and geochemical analysis. *Veg. Hist. Archaeobotany* 16, 251–258.
- Jovanovic, B., 2009. Beginning of the metal age in the central Balkans according to the results of the archeometallurgy. *J. Min. Metall. Sect. B Metall.* 45, 143–148. <https://doi.org/10.2298/JMMB0902143J>
- Jovanovic, B., 1990. Ancient copper mines in the Balkans. *Sci. Eur. Res. Technol.* 20 Ctries. 140–144.
- Jovanović, B., 1985. Smelting of Copper in the Eneolithic Period of the Balkans. *Furn. Smelt. Technol. Antiq.* 76–85.
- Jovanović, B., 1978. The Oldest Copper Metallurgy in the Balkans - a Study of the Diffusion of Copper from Asia Minor to Southeastern Europe. *Exped. Mag., Penn Museum* 21, 9–17.
- Jullian, C., 1910. L'avènement du métal, Leçon d'ouverture du cours d'Histoire et d'Antiquités nationales.
- Jung, R., Mehofer, M., 2013. Mycenaean Greece and Bronze Age Italy: cooperation, trade or war? *Archäol. Korresp.* 43, 175–192.
- Junghans, S., Sangmeister, E., Schröder, M., 1968. Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas, Studien zu den Anfängen der Metallurgie. Gebr. Mann, Berlin.
- Junghans, S., Sangmeister, E., Schröder, M., 1960. Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa, Studien zu den Anfängen der Metallurgie. Römisch-germanisches Zentralmuseum.
- Junk, M., Krause, R., Pernicka, E., 2001. Ösenringbarren and the classical Ösenring Copper, in: Metz, W., Beek, B., van Steegstra, H. (Eds.), *Patina: Essays Presented to Jay Jordan Butler on the Occasion of His 80th Birthday*. Groningen/Amsterdam, pp. 353–366.
- Juras, A., Makarowicz, P., Chyleński, M., Ehler, E., Malmström, H., Krzewińska, M., Pospieszny, Ł., Górski, J., Taras, H., Szczepanek, A., Polańska, M., Włodarczyk, P., Szyc, A., Lasota-Kuś, A., Wójcik, I., Jakobsson, M., Dabert, M., 2020. Mitochondrial genomes from Bronze Age Poland reveal genetic continuity from the Late Neolithic and additional genetic affinities with the steppe populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* 172, 176–188. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24057>
- Kadrow, S., 2022. Brześć Kujawski Culture in the network of Aeneolithic globalization processes, in: Grygiel, M., Obst, P. (Eds.), *Walking among Ancient Trees*. Muzeum Archeologiczne i Etnograficzne w Łodzi, Łódź, pp. 349–361.
- Kaiser, A., 2013. Copper Oxhide Ingot Marks: A Database And Comparative Analysis (Master thesis). Cornell University.
- Kamilli, R.J., Kimball, B.E., Carlin Jr., J.F., 2017. Tin (USGS Numbered Series No. 1802- S), Tin, Professional Paper. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/pp1802S>
- Kaňáková Hladíková, L., 2018. Crystallization of warrior elites on the threshold of the Bronze Age : Multifocal analysis of lithic, bone and antler industry in its social roles, life cycles, use wear and symbolics.
- Kang, J., Wille, M., Hofmann, B.A., Strauss, H., Villa, I.M., 2020. Heterogeneous lead isotopic compositions of sulfide minerals from a hydrothermal replacement deposit (Janggum mine, South Korea). *Ore Geol. Rev.* 122, 103527. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103527>

- Karageorghis, V., Kassianidou, V., 1999. Metalworking and Recycling in Late Bronze Age Cyprus – the Evidence from Kition. *Oxf. J. Archaeol.* 18, 171–188. <https://doi.org/10.1111/1468-0092.00078>
- Kassianidou, V., 2015. Cypriot copper for the Iron Age world of the Eastern Mediterranean. *Mediterr. Archaeol., Structure, Measurement and Meaning: Insights into the Prehistory of Cyprus. Studies on Prehistoric Cyprus in Honour of David Frankel* 143, 261–271.
- Kassianidou, V., 2013a. Mining Landscapes of Prehistoric Cyprus. *Metalla* 20, 36–45.
- Kassianidou, V., 2013b. Ancient and modern copper production at Skouriotissa Vouppes, in: *The Troodos Archaeological & Environmental Survey Project, Cyprus, The TAESP Landscape*. pp. 114–138.
- Kassianidou, V., 2013c. The Production and Trade of Cypriot Copper in the Late Bronze Age. *An Analysis of the Evidence. Pasiphae VII*, 133–146.
- Kassianidou, V., 2001. Cypriot copper in Sardinia. Yet another case of bringing coals to Newcastle?, in: *Italy and Cyprus in Antiquity, 1500-450 BC. Columbia Universtiy*, pp. 97–119.
- Kassianidou, V., Knapp, A.B., 2008. Archaeometallurgy in the Mediterranean: The Social Context of Mining, Technology, and Trade, in: *The Archaeology of Mediterranean Prehistory*. Wiley-Blackwell, pp. 215–251. <https://doi.org/10.1002/9780470773536.ch9>
- Kassianidou, V., Knapp, B., 2005. Archaeometallurgy in the Mediterranean: the social context of mining, technology and trade, in: *Blake, E., Knapp, A.B. (Eds.), The Archaeology of Mediterranean Prehistory*. Blackwell Publishing, Malden, Mass, pp. 21–68.
- Kern, O.A., Koutsodendris, A., Sufke, F., Gutjahr, M., Mächtle, B., Pross, J., 2021. Persistent, multi-sourced lead contamination in Central Europe since the Bronze Age recorded in the Füramoos peat bog, Germany. *Anthropocene* 36, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100310>
- Kerner, S., 2008. The Transition between the Late Chalcolithic and the Early Bronze Age in the Southern Levant, in: *Kühne, H., Czichon, R.M., Kreppner, F.J. (Eds.), Proceedings of the 4th International Congress of the Archaeology of the Ancient Near East. Presented at the The reconstruction of environment : natural resources and human interrelations through time ; art history : visual communication, Otto Harrassowitz Verlag, Freie Universität Berlin*, pp. 155–165.
- Keswani, P.S., 1993. Models of Local Exchange in Late Bronze Age Cyprus. *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 73–83. <https://doi.org/10.2307/1357249>
- Khalidi, L., Lewis, K., Gratuze, B., 2012. New perspectives on regional and interregional obsidian circulation in prehistoric and early historic Arabia. *Proc. Semin. Arab. Stud.* 42, 143–164.
- Kienlin, T.L., 2013. Copper and Bronze: Bronze Age Metalworking in Context, in: *The Oxford Handbook of the European Bronze Age*. OUP Oxford, pp. 414–436.
- Killick, D., 2014. From Ores to Metals, in: *Roberts, B.W., Thornton, C.P. (Eds.), Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*. Springer, New York, NY, pp. 11–45. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3_2
- Killick, D.J., Stephens, J.A., Fenn, T.R., 2020. Geological constraints on the use of lead isotopes for provenance in archaeometallurgy. *Archaeometry* 62, 86–105. <https://doi.org/10.1111/arc.12573>
- Klassen, L., Gandois, H., Pétrequin, P., Villes, A., Pernicka, E., 2017. Outils en cuivre du sud-est de l'Europe des V e et IV e millénaires dans les collections françaises, in: *Atlas Des Grandes Haches En Europe, Objets-Signes et Interprétations Sociales Des Jades Alpains Dans l'Europe Néolithique*. pp. 932–949.
- Klassen, L., Stürup, S., 2009. Decoding the Riesebusch-copper:Lead-Isotope Analysis applied to Early Neolithic Copper Finds from South Scandinavia. *Praehistorische Z.* 76, 55–73. <https://doi.org/10.1515/prhz.2001.76.1.55>

- Klein, S., Domergue, C., Lahaye, Y., Brey, G., Von Kaenel, H., 2009. The lead and copper isotopic composition of copper ores from the Sierra Morena (Spain). *J. Iber. Geol.* 35, 59–68.
- Klein, S., Rose, T., 2020. Evaluating copper isotope fractionation in the metallurgical operational chain: An experimental approach. *Archaeometry* 62, 134–155. <https://doi.org/10.1111/arc.12564>
- Klein, S., Rose, T., Westner, K.J., Hsu, Y., 2022. From OXALID to GlobaLID: Introducing a modern and FAIR lead isotope database with an interactive application. *Archaeometry* arc.12762. <https://doi.org/10.1111/arc.12762>
- Knapp, A.B., 2003. The Archaeology of Community on Bronze Age Cyprus: Politiko “Phorades” in Context. *Am. J. Archaeol.* 107, 559–580.
- Knapp, A.B., 1986. Production, Exchange, and Socio-Political Complexity on Bronze Age Cyprus. *Oxf. J. Archaeol.* 5, 35–60. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.1986.tb00129.x>
- Knapp, A.B., Bouzek, J., Frankel, D., Held, S.O., Peltenburg, E., Simmons, A.H., 1990. Production, Location, and Integration in Bronze Age Cyprus. *Curr. Anthropol.* 31, 147–176.
- Knapp, A.B., Kassianidou, V., Donnelly, M., 2001. Copper Smelting in Late Bronze Age Cyprus: The Excavations at Politiko Phorades. *East. Archaeol.* 64, 204–210. <https://doi.org/10.2307/3210830>
- Kneisel, J., Dörfler, W., Dreibrodt, S., Schaefer-Di Maida, S., Feeser, I., 2019. Cultural change and population dynamics during the Bronze Age: Integrating archaeological and palaeoenvironmental evidence for Schleswig-Holstein, Northern Germany. *The Holocene* 29, 1607–1621. <https://doi.org/10.1177/0959683619857237>
- Knipper, C., Mittnik, A., Massy, K., Kociumaka, C., Kucukkalipci, I., Maus, M., Wittenborn, F., Metz, S.E., Staskiewicz, A., Krause, J., Stockhammer, P.W., 2017. Female exogamy and gene pool diversification at the transition from the Final Neolithic to the Early Bronze Age in central Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 10083–10088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706355114>
- Knoll, F., Meller, H., 2016. Die Ösenkopfnadel – Ein “Klassen”-verbindendes Trachtelement der Aunjetitzer Kultur. Ein Beitrag zu Kontext, Interpretation und Typochronologie der mitteldeutschen Exemplare., in: *Arm Und Reich – Zur Ressourcenverteilung Inprähistorischen Gesellschaften*. Presented at the Mitteldeutscher Archäologentag, Tagungen des Landesmuseums, Halle (Saale), pp. 283–370.
- Koch Waldner, T., 2019. Bronze Age copper production in Kitzbühel, Tyrol, in: *Alpine Copper II - Alpengkupfer II - Rame delle Alpi II - Cuivre des Alpes II: New Results and Perspectives on Prehistoric Copper Production*. VML Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen, pp. 31–45.
- Konopelko, D.L., Cherny, R.I., Petrov, S.V., Strekopytov, S., Seltmann, R., Vlasenko, N.S., Strekopytov, V.V., Mamadjanov, Y.M., Wang, X.-S., Plotinskaya, O.Yu., Andreeva, E.M., 2022. The Mushiston Sn deposit in Tajik Tien Shan as the type locality for stannite-cassiterite-hydrostannate mineralization: New mineral chemistry data and genetic constraints. *J. Geochem. Explor.* 239, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107017>
- Koukouli-Chrysanthaki, C., Papadopoulos, S., 2018. Chapter 18. The island of Thasos from the Neolithic to the Early Bronze Age. Excavation data and absolute dates, in: Tsirtsoni, Z. (Ed.), *The Human Face of Radiocarbon : Reassessing Chronology in Prehistoric Greece and Bulgaria, 5000-3000 Cal BC*, *Travaux de La Maison de l’Orient et de La Méditerranée*. MOM Éditions, Lyon, pp. 339–358.
- Krause, P.D.R., 2021. Critical comments on the find complex of the so-called Nebra Sky Disk. *Archäol. Informationen* 43, 1–22.
- Krause, R., 2003. *Studien zur kupfer- und frühbronzezeitlichen Metallurgie zwischen Karpatenbecken und Ostsee*. Leidorf.

- Kreimerman, I., 2017. 9. A Typology for Destruction Layers : The Late Bronze Age Southern Levant as a Case Study, in: Cunningham, T., Driessen, J. (Eds.), *Crisis to Collapse: The Archaeology of Social Breakdown*, AEGIS. Presses universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve, pp. 173–203.
- Kristiansen, K., 1987. Centre and Periphery In Bronze Age Scandinavia, in: Rowlands, M., Larsen, M.T., Kristiansen, K. (Eds.), *Centre and Periphery in the Ancient World. New Directions in Archaeology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 74–86.
- Kristiansen, K., Suchowska-Ducke, P., 2015. Connected Histories: the Dynamics of Bronze Age Interaction and Trade 1500–1100. *Proc. Prehist. Soc.* 81, 361–392. <https://doi.org/10.1017/ppr.2015.17>
- Kuijpers, M., 2012. Towards a deeper understanding of metalworking technology, in: *Beyond Elites - Alternatives to Hierarchical Systems in Modelling Social Formations. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie*, Ruhr Universität Bochum, pp. 413–421.
- Kuijpers, M.H.G., 2008. Bronze age metalworking in the Netherlands (c.2000-800BC): a research into the preservation of metallurgy related artefacts and the social position of the smith. Sidestone press, Leiden.
- Kuijpers, M.H.G., Popa, C.N., 2021. The origins of money: Calculation of similarity indexes demonstrates the earliest development of commodity money in prehistoric Central Europe. *PLOS ONE* 16, e0240462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240462>
- Kunst, M., 2013. The Innovation of Copper Metallurgy on the Iberian Peninsula: Its Significance for the Development of Social Complexity in the 3rd Millennium BC, in: *Metal Matters: Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity, Menschen - Kulturen - Traditionen. VML Leidorf, Rahden/Westf*, pp. 181–208.
- Küttner, A., Mighall, T.M., De Vleeschouwer, F., Mauquoy, D., Martínez Cortizas, A., Foster, I.D.L., Krupp, E., 2014. A 3300-year atmospheric metal contamination record from Raeburn Flow raised bog, south west Scotland. *J. Archaeol. Sci.* 44, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.01.011>
- La Duc, E., Montero-Ruiz, I., Freestone, I.C., Fanlo Loras, J., Jabalquinto Expósito, I.M., Martín de la Cruz, J.C., Pérez-Lambán, F., Picazo Millán, J.V., Martínón-Torres, M., 2022. Diverse strategies for copper production in Chalcolithic Iberia. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 46, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103683>
- Labaune, M., 2016. *Le métal et la métallurgie du Campaniforme en Europe occidentale : Usage et circulation dans la 2ème moitié du IIIème millénaire av. n.è (thèse)*. Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon.
- Lachenal, T., 2022. Enter the matrix. Late Bronze Age casting moulds from "La Motte" (Agde, France) in their context. *Archäol. Korresp.* 52, 65–90.
- Lagarde-Cardona, C., 2022. Production métallique en Aquitaine à l'âge du Bronze, in: Fourment, N., Rolland, P. (Eds.), *Oxydes, couleurs et métaux: exposition, Les Eyzies, Musée national de préhistoire, 8 octobre 2022-8 mai 2023*. Musée national de préhistoire, Les Eyzies, pp. 203–210.
- Lagarde-Cardona, C., 2008. *Production métallique en Aquitaine à l'âge du Bronze moyen : Techniques, usages et circulation (Thèse de doctorat)*. <http://www.theses.fr>. Bordeaux 3, Bordeaux.
- Laporte, L., Gomez de Soto, J., 2008. Du Néolithique final au tout premier Bronze ancien dans le Centre-Ouest de la France et plus généralement sur sa façade atlantique ; des données encore très lacunaires pour la seconde moitié du IIIe millénaire av. J.-C. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 105, 555–576. <https://doi.org/10.3406/bspf.2008.13760>
- Larocca, F., 2010. Grotta della Monaca: A Prehistoric Copper and Iron Mine in the Calabria Region (Italy), in: *Ining in European History and Its Impact on Environment and Human Societies. Presented at the 1st Mining in European History, Conference of the SFB-HIMAT, Innsbruck University Press, Innsbruck, 12-15 November 2009*, pp. 267–270.

- Larocca, F., Breglia, F., 2016. Grooved stone tools from Calabria region (Italy): Archaeological evidence and research perspectives. *J. Lithic Stud.* 3, 301–312.
- Larson, P.B., Maher, K., Ramos, F.C., Chang, Z., Gaspar, M., Meinert, L.D., 2003. Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.* 201, 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.08.006>
- Law, R.W., 2011. Inter-regional interaction and urbanism in the ancient Indus valley: a geologic provenience study of Harappa's rock and mineral assemblage, Rihh-Manohar project series. Manohar, New Delhi.
- Lazarovici, G., Lazarovici, C.-M., 2013. Etapa veche din atelierul de bijuterii de la Cheile Turzii-"Peștera Ungurească"., in: *Arhevest. JATEPress Kiado, Timisoara*, pp. 55–90.
- Le Carlier de Veslud, C., Siepi, C., Le Carlier De Veslud, C., 2017. Tin production in Brittany (France) : a rich area exploited since Bronze Age, in: Ignacio Montero Ruiz, A.P. (eds) (Ed.), *Archaeometallurgy in Europe IV*, Biblioteca Praehistorica Hispana. Presented at the Archaeometallurgy in Europe IV, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, pp. 91–103.
- Leblanc, M., Morales, J., Borrego, J., Elbaz-Poulichet, F., 2000. 4500 year old mining pollution in southwestern Spain: long-term implication for modern mining pollution. *Econ. Geol.* 95, 655–662. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.95.3.655>
- Léchelon, B., 1997. La mine d'argent médiévale de Bouco-Payrol (Aveyron). *Archéologie En Languedoc* 21, 167–182.
- Léchelon, B., 1994. *Archéologie minière du Canton de Camarès - Secteur de Fayet (Rapport de prospection)*.
- Lechtman, H., 1996. Arsenic Bronze: Dirty Copper or Chosen Alloy? A View from the Americas. *J. Field Archaeol.* 23, 477–514. <https://doi.org/10.2307/530550>
- Lechtman, H., Klein, S., 1999. The Production of Copper–Arsenic Alloys (Arsenic Bronze) by Cosmelting: Modern Experiment, Ancient Practice. *J. Archaeol. Sci.* 26, 497–526. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0324>
- Lee, C.H., Lee, H.K., Kim, S.J., 1998. Geochemistry and mineralization age of magnesian skarn-type iron deposits of the Janggun mine, Republic of Korea. *Miner. Deposita* 33, 379–390. <https://doi.org/10.1007/s001260050156>
- Lefranc, P., 2015. Creuset et lingot en cuivre du IV^e millénaire avant notre ère à Eckwersheim : premiers témoins d'une activité métallurgique néolithique dans le sud de la plaine du Rhin supérieur (Catalogue d'exposition, Musée archéologique), Brumath-Brocomagus, capitale de la cité des Triboques.
- Legarra Herrero, B., 2021. From systems of power to networks of knowledge: the nature of El Argar culture (southeastern Iberia, c. 2200–1500 BC), in: Foxhall, L. (Ed.), In: Foxhall, L. (Ed.) *Interrogating Networks: Investigating Networks of Knowledge in Antiquity*. Oxbow Books: London, UK. (2021). Oxbow Books, London, UK, pp. 47–67.
- Lehmann, B., 2021. Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 9th Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks 402–403, 105756. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105756>
- Lehoërff, A., 2011. L'Âge du bronze est-il une période historique ?, in: Garcia, D., Garcia, D (Eds.), *L'Âge Du Bronze En Méditerranée: Recherches Récentes*, Collection Les Hespérides. Errance, Paris, pp. 13–26.
- Leistel, J.M., Marcoux, E., Thiéblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G.R., Pascual, E., Sáez, R., 1997. The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt Review and preface to the Thematic Issue. *Miner. Deposita* 33, 2–30. <https://doi.org/10.1007/s001260050130>
- Lemercier, O., 2018. Chapitre 12. La question campaniforme, in: *La protohistoire de la France, Histoire et Archéologie*. Hermann, Paris, pp. 205–217. <https://doi.org/10.3917/herm.garci.2018.01.0206>

- Lemercier, O., 2006. Le Campaniforme et l'Europe à la fin du Néolithique, in: *La Préhistoire de l'Europe Occidentale. Bilan Des Connaissances à l'aube Du Troisième Millénaire*. Toulon, pp. 80–94.
- Lemonnier, P., 2010. L'Étude des systèmes techniques: Une urgence en technologie culturelle. *Tech. Cult.* 46–67. <https://doi.org/10.4000/tc.4989>
- Levato, C., Larocca, F., 2016. The Prehistoric Iron Mine of Grotta della Monaca (Calabria, Italy). *Anthropol. Praehist.* 126, 25–37.
- Lewis, A., 1996. *Prehistoric Mining at the Great Orme: Criteria for the identification of early mining*. University of Wales – Bangor.
- Lewis, A., 1990. Underground Exploration of the Great Orme Copper Mines, in: *Early Mining in the British Isles. Presented at the Early Mining Workshop, Plas Tan y Bwlch Snowdonia National Park Study Centre*, pp. 5–10.
- Liard, F., 2010. Le cuivre chypriote et la Crète. *Rev. Archéologique* 47–65. <https://doi.org/10.3917/arch.101.0047>
- Lichardus, J., Echt, R., Iliev, I.K., Christov, C.J., 2002. Die Spätbronzezeit an der unteren Tundza und die ostägäischen Verbindungen in Südostbulgarien. *Eurasia Antiq.* 8, 135–184.
- Lidke, G., Lorenz, S., 2019. The Bronze Age battlefield in the Tollense Valley – conflict archaeology and Holocene landscape reconstruction. *DEUQUA Spec. Publ.* 2, 69–75. <https://doi.org/10.5194/deuquasp-2-69-2019>
- Ling, J., Chacon, R., Chacon, Y., 2018. Rock Art, Secret Societies, Long-Distance Exchange, and Warfare in Bronze Age Scandinavia, in: Dolfini, A., Crellin, R.J., Horn, C., Uckelmann, M. (Eds.), *Prehistoric Warfare and Violence: Quantitative and Qualitative Approaches, Quantitative Methods in the Humanities and Social Sciences*. Springer International Publishing, Cham, pp. 149–174. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78828-9_8
- Ling, J., Hjärthner-Holdar, E., Grandin, L., Billström, K., Persson, P.-O., 2013. Moving metals or indigenous mining? Provenancing Scandinavian Bronze Age artefacts by lead isotopes and trace elements. *J. Archaeol. Sci.* 40, 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.05.040>
- Ling, J., Hjärthner-Holdar, E., Grandin, L., Stos-Gale, Z., Kristiansen, K., Melheim, A.L., Artioli, G., Angelini, I., Krause, R., Canovaro, C., 2019. Moving metals IV: Swords, metal sources and trade networks in Bronze Age Europe. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 26, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.05.002>
- Ling, J., Stos-Gale, Z., 2015. Representations of oxhide ingots in Scandinavian rock art: the sketchbook of a Bronze Age traveller? *Antiquity* 89, 191–209. <https://doi.org/10.15184/aqy.2014.1>
- Ling, J., Stos-Gale, Z., Grandin, L., Billström, K., Hjärthner-Holdar, E., Persson, P.-O., 2014. Moving metals II: provenancing Scandinavian Bronze Age artefacts by lead isotope and elemental analyses. *J. Archaeol. Sci.* 41, 106–132. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.07.018>
- Liritzis Maxwell, V., Taylor, J.W., 1987. Yugoslavian tin deposits and the early Bronze Age industries of the Aegean region. *Oxf. J. Archaeol.* 6, 287–300. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.1987.tb00158.x>
- Liu, R., Pollard, A.M., 2022. Asking different questions: highly radiogenic lead, mixing and recycling of metal and social status in the Chinese Bronze Age. *Mineral. Mag.* 86, 677–687. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.32>
- Liu, R., Pollard, A.M., Cao, Q., Liu, C., Sainsbury, V., Howarth, P., Bray, P., Huan, L., Yao, B., Fu, Y., Tang, J., 2020. Social hierarchy and the choice of metal recycling at Anyang, the last capital of Bronze Age Shang China. *Sci. Rep.* 10, 18794. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75920-x>

- Liu, S., Chen, K.L., Rehren, T., Mei, J.J., Chen, J.L., Liu, Y., Killick, D., 2018. Did China Import Metals from Africa in the Bronze Age? *Archaeometry* 60, 105–117. <https://doi-org.ezproxy.univ-paris1.fr/10.1111/arc.12352>
- Liversage, D., 2000. Interpreting impurity patterns in ancient bronze: Denmark, *Nordiske fortidsminder. Serie C. Der Kongelige Nordiske Oldskriftselskab, Copenhagen*.
- Lliev, I., Dimitrov, K., Kuleff, I., Pernicka, E., 2007. Archaeometallurgical Studies on Eneolithic Copper Artifacts from Northeast Bulgaria, in: 2nd International Conference Archaeometallurgy in Europe, Aquilea, Italy, 2007. Presented at the 2nd International Conference Archaeometallurgy in Europe Archaeometallurgy in Europe 2007, Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, pp. 1–14.
- Lo Schiavo, F., Atzeni, C., Consiglio nazionale delle ricerche (Italy), Università di Cagliari (Eds.), 2005. *Archaeometallurgy in Sardinia: from the origins to the beginning of the early iron age, Monographies instrumentum. Éditions M. Mergoïl, Montagnac*.
- Lo Schiavo, F., Macnamara, E., Vagnetti, L., 1985. Late Cypriot imports to Italy and their influence on local bronze. *Pap. Br. Sch. Rome* 53, 1–71.
- Longman, J., Veres, D., Ersek, V., Phillips, D.L., Chauvel, C., Tamas, C.G., 2018. Quantitative assessment of Pb sources in isotopic mixtures using a Bayesian mixing model. *Sci. Rep.* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24474-0>
- Lull, V., Micó Pérez, R., Rihuete Herrada, C., Risch, R., 2010. Metal and social relations of production in the 3rd and 2nd millennia BCE in the Southeast of the Iberian Peninsula. *Trab. Prehist.* 67, 323–347. <https://doi.org/10.3989/tp.2010.10042>
- Lull, V., Micó, R., Rihuete, C., Risch, R., 2014. Social value of silver in El Agar, in: *Metalle Der Macht –Frühes Gold Und Silber*. Presented at the 6 Mitteldeutscher Archäologentag, Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle (Saale), pp. 557–575.
- Lull, V., Micó, R., Rihuete Herrada, C., Risch, R., 2013. Political collapse and social change at the end of El Argar, in: Meller, H., Bertemes, F., Bork, H.-R., Risch, Robby (Eds.), *1600 - Kultureller Umbruch Im Schatten Des Thera-Ausbruchs? / 1600 – Cultural Change in the Shadow Of The Thera-Eruption?* Landesamt f. Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle (Saale), pp. 283–302.
- Lull, V., Rihuete-Herrada, C., Risch, R., Bonora, B., Celdrán-Beltrán, E., Fregeiro, M.I., Molero, C., Moreno, A., Oliart, C., Velasco-Felipe, C., Andúgar, L., Haak, W., Villalba-Mouco, V., Micó, R., 2021. Emblems and spaces of power during the Argaric Bronze Age at La Almoloya, Murcia. *Antiquity* 95, 329–348. <https://doi.org/10.15184/aqy.2021.8>
- Luria, D., 2021. Copper technology in the Arabah during the Iron Age and the role of the indigenous population in the industry. *PLoS ONE* 16, e0260518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260518>
- Lutz, J., Pernicka, E., 2013. Prehistoric copper from the Eastern Alps. *Open J. Archaeom.* 1, 122–127. <https://doi.org/10.4081/arc.2013.e25>
- Macías, J.A.P., 2015. Los primeros mineros del Andévalo. *Aestuaría Rev. Investig.* 12, 33–57.
- Maddin, R., Wheeler, T.S., Muhly, J.D., 1980. Distinguishing artifacts made of native copper. *J. Archaeol. Sci.* 7, 211–225. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(80\)80025-2](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(80)80025-2)
- Maggetti, M., Baumgartner, D., Galetti, G., 1990. Mineralogical and chemical studies on Swiss Neolithic crucibles. *Archaeometry* 90, 95–104.
- Maggi, R., Pearce, M., 2010. Changing subsistence structures and the origins of mining in the Ligurian Apennine Mountains., in: *Mining in European History and Its Impact on Environment and Human Societies*, University of Innsbruck. Presented at the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT, Innsbruck, pp. 283–87.

- Maggi, R., Pearce, M., 2005. Mid fourth-millennium copper mining in Liguria, north-west Italy: The earliest known copper mines in Western Europe. *Antiquity* 79, 66–77. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00113705>
- Maillé, M., Costa, K., Bernat, A., Boscus, S., Dransart, E., Maintenant, J., Poujol, J., Tomczyk, C., Şah, M., Vaquer, J., 2019. Programme collectif de recherches Mines et métallurgies pré et protohistoriques en Occitanie. Rapport 2019 (report). Programme Commun de Recherche.
- Makky, J., 1995. The Rise and Fall of Gold Metallurgy in the Copper Age of the Carpathian Basin: The Background of the Change, in: Morteani, G., Northover, J.P. (Eds.), *Prehistoric Gold in Europe: Mines, Metallurgy and Manufacture*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 65–76. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1292-3_7
- Manning, S.W., 1993. Prestige, Distinction, and Competition: The Anatomy of Socioeconomic Complexity in Fourth to Second Millennium B. C. E. *Bull. Am. Sch. Orient. Res.* 292, 35–58. <https://doi.org/10.2307/1357247>
- Maran, J., 2021. Attica and the Origins of Silver Metallurgy in the Aegean and the Carpatho-Balkan Zone. *Sidelights OnGreek Antiq.* 197–225. <https://doi.org/10.1515/9783110699326-010>
- Marcigny, C., Lachenal, T., Milcent, P.-Y., Mordant, C., Peake, R., Talon, M., 2022. Mesurer le temps de l'âge du Bronze. *Bull. Assoc. Pour Promot. Rech. Sur L'Âge Bronze Supplément n° 8*, 220.
- Marcigny, C., Talon, M., 2009. Sur les rives de la Manche. Qu'en est-il du passage de l'âge du Bronze à l'âge du Fer à partir des découvertes récentes ?, in: Gaillard de Sémainville, H. (Ed.), *De l'âge du Bronze à l'âge du Fer en France et en Europe occidentale (Xe-VIIe siècle av. J.-C.) : La moyenne vallée du Rhône aux âges du Fer*, Suppléments à la Revue archéologique de l'Est. ARTEHIS Éditions, Dijon, pp. 385–403. <https://doi.org/10.4000/books.artehis.18261>
- Marcoux, É., 1986. Isotopes du plomb et paragenèses métalliques, traceurs de l'histoire des gîtes minéraux : illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français : applications en recherche minière (Documents du BRGM n°117). Université Clermont Ferrand II.
- Marcoux, É., Moelo, Y., 1991. Lead isotope geochemistry and paragenetic study of inheritance phenomena in metallogenesis; examples from base metal sulfide deposits in France. *Econ. Geol.* 86, 106–120. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.1.106>
- Marfin, A.E., Ivanov, A.V., Abramova, V.D., Anziferova, T.N., Radomskaya, T.A., Yakich, T.Y., Bestemianova, K.V., 2020. A Trace Element Classification Tree for Chalcopyrite from Oktyabrsk Deposit, Norilsk–Talnakh Ore District, Russia: LA-ICPMS Study. *Minerals* 10, 716. <https://doi.org/10.3390/min10080716>
- Maric, M., 2015. Modelling obsidian trade routes during late Neolithic in the south-east Banat region of Vrsac using GIS. *Starinar* 37–52. <https://doi.org/10.2298/STA1565037M>
- Markl, G., Lahaye, Y., Schwinn, G., 2006. Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 4215–4228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1369>
- Marro, C., Stöllner, T., 2021. On salt, copper and gold : The story behind shepherds, metallurgists and miners in the first mining enterprises of the Caucasus, in: *On Salt, Copper and Gold : The Origins of Early Mining and Metallurgy in the Caucasus*, Archéologie(s). MOM Éditions, Lyon, pp. 13–26. <https://doi.org/10.4000/books.momeditions.12402>
- Martin, A.J., Keith, M., McDonald, I., Haase, K.M., McFall, K.A., Klemd, R., MacLeod, C.J., 2019. Trace element systematics and ore-forming processes in mafic VMS deposits: Evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Ore Geol. Rev.* 106, 205–225. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.024>
- Martin, S., 2017. Environmental and health effects of early copper metallurgy and mining in the Bronze Age. *Hum. Voyage Undergrad. Res. Biol. Anthropol.* 1, 45–61. <https://doi.org/10.22459/HV.01.2017.04>

- Martínez Cortizas, A., López-Merino, L., Bindler, R., Mighall, T., Kylander, M.E., 2016. Early atmospheric metal pollution provides evidence for Chalcolithic/Bronze Age mining and metallurgy in Southwestern Europe. *Sci. Total Environ.* 545, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.078>
- Martínez, L.A., Cortés, F.C., Onorato, A.M., 2014. La explotación minera antigua en Sierra Morena oriental y su vinculación con el territorio. *Cuad. Prehist. Arqueol. Univ. Granada* 24, 111–145.
- Martin-Izard, A., Arias, D., Arias, M., Gumiel, P., Sanderson, D.J., Castañon, C., Sanchez, J., 2016. Ore deposit types and tectonic evolution of the Iberian Pyrite Belt: From transtensional basins and magmatism to transpression and inversion tectonics. *Ore Geol. Rev.* 79, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.011>
- Massa, M., 2018. Metallurgical technology and metal exchange networks: a case study from the western Anatolian Late Chalcolithic and Bronze Ages. *Herit. Turk.* 8, 39–40. <https://doi.org/10.18866/biaa2018.19>
- Matta, V., Vandkilde, H., 2023. The State of the Debate: Nuragic Metal Trade in the Bronze Age and Early Iron Age. *Open Archaeol.* 9. <https://doi.org/10.1515/opar-2022-0280>
- Matta, V., Vandkilde, H., 2022. Nuragic Warrior Imagery: Transcultural Perspectives on Bronze Age Weaponry, in: Cardarelli, A. (Ed.), *ORIGINI Prehistory and Protohistory of Ancient Civilizations*. Thompson Reuters, Roma.
- Matte, P., 1991. Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics* 196, 309–337. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90328-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90328-P)
- McConnell, J.R., Wilson, A.I., Stohl, A., Arienzo, M.M., Chellman, N.J., Eckhardt, S., Thompson, E.M., Pollard, A.M., Steffensen, J.P., 2018. Lead pollution recorded in Greenland ice indicates European emissions tracked plagues, wars, and imperial expansion during antiquity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 5726–5731. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721818115>
- McFarlane, C.R.M., Soltani Dehnavi, A., Lentz, D.R., 2016. Pb-Isotopic Study of Galena by LA-Q-ICP-MS: Testing a New Methodology with Applications to Base-Metal Sulphide Deposits. *Minerals* 6, 96. <https://doi.org/10.3390/min6030096>
- McGrail, S., 1993. Medieval boat and ship timbers from Dublin, Medieval Dublin excavations, 1962-81. Ser. B. Royal Irish Academy, Dublin.
- McKerrell, H., Tylecote, R.F., 1972. The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect on the determination of provenance. *Proc. Prehist. Soc.* 38, 209–218. <https://doi.org/10.1017/S0079497X00012111>
- McKinley, J.I., Schuster, J., Millard, A., 2013. Dead-Sea Connections. A Bronze Age and Iron Age Ritual Site on the Isle of Thanet., in: Koch, W.T., Cunliffe, B. (Eds.), *Celtic from the West 2. Rethinking the Bronze Age and the Arrival of the Indo-European in Atlantic Europe*. Oxford, pp. 157–183.
- Mehofer, M., Gavranović, M., Kapuran, A., Mitrović, J., Putica, A., 2021. Copper production and supra-regional exchange networks – Cu-matte smelting in the Balkans between 2000 and 1500 BC. *J. Archaeol. Sci.* 129, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105378>
- Melheim, L., Grandin, L., Persson, P.-O., Billström, K., Stos-Gale, Z., Ling, J., Williams, A., Angelini, I., Canovaro, C., Hjärthner-Holdar, E., Kristiansen, K., 2018. Moving metals III: Possible origins for copper in Bronze Age Denmark based on lead isotopes and geochemistry. *J. Archaeol. Sci.* 96, 85–105. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.04.003>
- Melheim, L., Prescott, C., Anfinset, N., 2016. Bronze casting and cultural connections: Bronze Age workshops at Hunn, Norway. *Praehistorische Z.* 91. <https://doi.org/10.1515/pz-2016-0003>
- Meller, H., 2017. Armies in the Early Bronze Age? An alternative interpretation of Únětice Culture axe hoards. *Antiquity* 91, 1529–1545. <https://doi.org/10.15184/aqy.2017.180>

- Meller, H., Bertemes, F., Borg, H.-R., Risch, R., 2013. Wandel und Kontinuität in Europa und im Mittelmeerraum um 1600 v. Chr., in: 1600 Cultural Change in the Shadow of the Thera-Eruption?, Tagungen Des Landesmuseums Für Vorgeschichte Halle. Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Halle (DE), pp. 597–613.
- Merkel, J., 1983. Summary of experimental results for Late Bronze Age copper smelting and refining. *Mus. Appl. Sci. Cent. J.* 2, 173–179.
- Merkel, M., 2010. Bell Beaker Metallurgy and the Emergence of Fahlore-copper Use in Central Europe. *Interdiscip. Archaeol. - Nat. Sci. Archaeol. I*, 19–27. <https://doi.org/10.24916/iansa.2010.1-2.2>
- Merrillees, R.S., 1974. Trade and transcendence in the bronze age Levant: Three studies, *Studies in Mediterranean Archaeology. P. Åström [S. vägen 61], Göteborg.*
- Meyer, C., Earl, B., Omar, M., Smither, R.K., 2003. Ancient Gold Extraction at Bir Umm Fawakhir. *J. Am. Res. Cent. Egypt* 40, 13–53. <https://doi.org/10.2307/40000289>
- Middleton, G.D., 2020. Mycenaean collapse(s) c. 1200 BC, in: Middleton, G.D. (Ed.), *Collapse and Transformation: The Late Bronze Age to Early Iron Age in the Aegean.* Oxbow Books, Philadelphia, pp. 9–22.
- Mighall, T., Martínez Cortizas, A., Silva Sanchez, N., Foster, I.D., Singh, S., Bateman, M., Pickin, J., 2014. Identifying evidence for past mining and metallurgy from a record of metal contamination preserved in an ombrotrophic mire near Leadhills, SW Scotland, UK. *The Holocene* 24, 1719–1730.
- Mighall, T.M., Timberlake, S., Foster, I.D.L., Krupp, E., Singh, S., 2009. Ancient copper and lead pollution records from a raised bog complex in Central Wales, UK. *J. Archaeol. Sci.* 36, 1504–1515. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.03.005>
- Milesi, J., 1982. Inventaire gîtologique (préliminaire) des principaux indices de Pb-Zn des Monts Est de Lacaune (No. 82- SGN-675- GMX). BRGM.
- Milevski, I., 2013. The Transition from the Chalcolithic to the Early Bronze Age of the Southern Levant in socioeconomic context. *Paléorient* 39, 193–208. <https://doi.org/10.3406/paleo.2013.5495>
- Mille, B., 2022. Origine et développement de la métallurgie du cuivre : le cas e la France, in: Fourment, N., Rolland, P. (Eds.), *Oxydes, couleurs et métaux: exposition, Les Eyzies, Musée national de préhistoire, 8 octobre 2022-8 mai 2023.* Musée national de préhistoire, Les Eyzies, pp. 169–178.
- Miniaci, G., 2020. At the dawn of the Late Bronze Age “globalization”: the (re)-circulation of Egyptian artefacts in Nubia and the Northern Levant in the MB II–mid MB III (c. 1710 – 1550 BC).
- Mittnik, A., Massy, K., Knipper, C., Wittenborn, F., Friedrich, R., Pfrengle, S., Burri, M., Carlich-Witjes, N., Deeg, H., Furtwängler, A., Harbeck, M., von Heyking, K., Kociumaka, C., Kucukkalipci, I., Lindauer, S., Metz, S., Staskiewicz, A., Thiel, A., Wahl, J., Haak, W., Pernicka, E., Schiffels, S., Stockhammer, P.W., Krause, J., 2019. Kinship-based social inequality in Bronze Age Europe. *Science* 366, 731–734. <https://doi.org/10.1126/science.aax6219>
- Modi, A., Nesheva, D., Sarno, S., Vai, S., Karachanak-Yankova, S., Luiselli, D., Pilli, E., Lari, M., Vergata, C., Yordanov, Y., Dimitrova, D., Kalcev, P., Staneva, R., Antonova, O., Hadjidekova, S., Galabov, A., Toncheva, D., Caramelli, D., 2019. Ancient human mitochondrial genomes from Bronze Age Bulgaria: new insights into the genetic history of Thracians. *Sci. Rep.* 9, 5412. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41945-0>
- Modi, A., Vizzari, M.T., Vai, S., Lari, M., Vergata, C., Fedi, M., Nigro, L., Sineo, L., Caramelli, D., Ghirotto, S., 2022. Genetic structure and differentiation from early bronze age in the mediterranean island of sicily: Insights from ancient mitochondrial genomes. *Front. Genet.* 13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.945227>

- Modl, D., 2019. Recording plano-convex ingots (Gusskuchen) from Late Bronze Age Styria and Upper Austria. *Anschnitt Beih.* 42, 373–398.
- Mödlinger, M., Kuijpers, M.H.G., Braekmans, D., Berger, D., 2017. Quantitative comparisons of the color of CuAs, CuSn, CuNi, and CuSb alloys. *J. Archaeol. Sci.* 88, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.001>
- Mödlinger, M., Trebsche, P., Sabatini, B., 2021. Melting, smelting, and recycling: A regional study around the Late Bronze Age mining site of Priggwitz-Gasteil, Lower Austria. *PLOS ONE* 16, e0254096. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254096>
- Mohen, J.-P., Aufaure, C., Bouet, B., Collin, V., Courty-Fedoroff, M.-A., Eluère, C., Maillard, C., Marguerie, D., Menu, M., Queixalos, I., Robbiola, L., Verney, A., Walter, P., 1989. Ateliers métallurgiques dans l’habitat protohistorique du Fort-Harrouard. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 86, 404–408. <https://doi.org/10.3406/bspf.1989.9900>
- Mohen, J.-P., 1990. *Métallurgie préhistorique: introduction à la paléoméallurgie*, Collection Préhistoire. Masson, Paris.
- Molofsky, L.J., Killick, D., Ducea, M.N., Macovei, M., Chesley, J.T., Ruiz, J., Thibodeau, A., Popescu, G.C., 2014. A novel approach to lead isotope provenance studies of tin and bronze: Applications to South African, Botswanan and Romanian artifacts. *J. Archaeol. Sci.* 50, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.08.006>
- Monna, F., Jebrane, A., Gabillot, M., Laffont, R., Specht, M., Bohard, B., Camizuli, E., Petit, C., Chateau, C., Alibert, P., 2013. Morphometry of Middle Bronze Age palstaves. Part II – spatial distribution of shapes in two typological groups, implications for production and exportation. *J. Archaeol. Sci.* 40, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.06.029>
- Montero Ruiz, I., Murillo Barroso, M., Aguilera, G., Rovira, S., 2017. Small scale Bronze Age metallurgy: new data from Santa Lúcia (Alcossebre, Castellón, Spain), in: *Achaeometallurgy in Europe IV*. Madrid, pp. 79–89.
- Montero Ruiz, I., Rodríguez de la Esperanza, M.J., 2008. Un pequeño campamento minero de la Edad del Bronce: La Loma de la Tejería (Albarracín, Teruel). *Trab. Prehist.* 65, 155–168.
- Montero Ruiz, I., Rovira Llorens, S., Delibes, G., Fernández-Manzano, J., Herrán, J., Fernández-Posse, M., Martín, C., Maicas, R., 2003. High leaded bronze in the Late Bronze Age metallurgy of the Iberian Peninsula. Presented at the *Archaeometallurgy in Europe*, Milan.
- Moorey, P.R.S., 1982. Archaeology and Pre-Achaemenid Metalworking in Iran: A Fifteen Year Retrospective. *Iran* 20, 81–101. <https://doi.org/10.2307/4299723>
- Mordant, C., 2022. Circulation et échanges des productions métalliques à l’âge du Bronze en Europe occidentale (XXIIIe-IXe siècle avant notre ère), in: Fourment, N., Rolland, P. (Eds.), *Oxydes, couleurs et métaux: exposition*, Les Eyzies, Musée national de préhistoire, 8 octobre 2022-8 mai 2023. Musée national de préhistoire, Les Eyzies, pp. 189–202.
- Mordant, C., Gabillot, M., Saligny, L., Krolkowski, F., 2004. Approches de la notion de flux de métal et de recyclage au sein des sociétés européennes de l’âge du bronze. *Publ. L’École Fr. Rome* 332, 263–285.
- Mordant, C., Wirth, S., 2017. Normes et variabilité au sein de la culture matérielle des sociétés de l’âge du Bronze, in: Wirth, S., Mordant, C. (Eds.), *Normes et variabilités au sein de la culture matérielle des sociétés de l’Âge du Bronze*. Presented at the *Journée thématique de la Société préhistorique française* ; Dijon, 15 juin 2013, séances de la Société préhistorique française, Paris, pp. 7–18.
- Morin, D., Tizzoni, M., 2009. Aux origines des techniques minières. L’exploitation d’un gisement filonien au Premier Âge du fer. Les mines de Silter di Campolungo et de Baita Cludona di Fondo (Val Camonica,

- Alpes lombardes, Italie). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 106, 109–141. <https://doi.org/10.3406/bspf.2009.13832>
- Morteani, G., Northover, J.P., 2013. Prehistoric Gold in Europe: Mines, Metallurgy and Manufacture. NATO ASI Series.
- Moulin, B., Eric, T., Vital, J., 2010. Quatre années de prospection sur les extractions de cuivre de l'âge du Bronze ancien dans le massif des Rousses en Oisans (Isère et Savoie, France). *Dyn. Rythm. Évolutifs Sociétés Préhistoire Récente Actual. Rech. Actes 9e Rencontres Méridionales Préhistoire Récente* 341–369.
- Muhly, J.D., 2006. Chrysokamino in the History of Early Metallurgy. *Hesperia Suppl.* 36, 155–177.
- Muhly, J.D., 1997. Gebel El-Zeit, 1: Les Mines de galene. *J. Am. Orient. Soc.* 117, 211–213.
- Muhly, J.D., 1993. Early Bronze Age Tin and the Taurus. *Am. J. Archaeol.* 97, 239–253. <https://doi.org/10.2307/505658>
- Muhly, J.D., 1985. Sources of Tin and the Beginnings of Bronze Metallurgy. *Am. J. Archaeol.* 89, 275–291.
- Muhly, J.D., 1973. Copper and tin. the distribution of mineral resources and the nature of the metals trade in the Bronze Age, in: *Transactions. Connecticut Academy of Arts and Sciences, Hamden*, pp. 155–535.
- Müller, R., Rehren, T., Rovira Llorens, S., 2006. The question of early copper production at Almizaraque, SE Spain, in: *34th International Symposium. Zaragoza*, pp. 209–215.
- Muriel, M., Marilou, N., 2019. Entre influences armoricaines et normandes : le dépôt du Bronze moyen atlantique 2 de Bais (Mayenne). *Gall. Préhistoire* 151–180. <https://doi.org/10.4000/galliap.1627>
- Murillo-Barroso, M., Montero Ruiz, I., Bartelheim, M., 2014. Native silver resources in Iberia. *Tagungen Landesmus. Für Vorgesch. Halle* 12, 1–11.
- Murillo-Barroso, M., Montero-Ruiz, I., Nieto, J.M., Camalich Massieu, M.D., Martín Socas, D., Martínón-Torres, M., 2019. Trace elements and lead isotopic composition of copper deposits from the eastern part of the Internal Zone of the Betic Cordillera (SE Iberia): application to provenance of archaeological materials. *J. Iber. Geol.* 45, 585–608. <https://doi.org/10.1007/s41513-019-00111-1>
- Murillo-Barroso, M., Montero-Ruiz, I., Rafel, N., Ortiz, M.A.H., Armada, X.-L., 2016. The Macro-Regional Scale of Silver Production in Iberia During the First Millennium BC in the Context of Mediterranean Contacts. *Oxf. J. Archaeol.* 35, 75–100. <https://doi.org/10.1111/ojoa.12079>
- Murray, G.W., 1941. The gold-mine of the Turin papyrus (avec 4 planches). *Bull. L'institut D'Égypte* 24, 81–86. <https://doi.org/10.3406/bie.1941.3629>
- Murray, S.C., 2023. Eastern Mediterranean Bronze Age Trade in Archaeological Perspective: A Review of Interpretative and Empirical Developments. *J. Archaeol. Res.* 31, 395–447. <https://doi.org/10.1007/s10814-022-09177-5>
- Mussche, H.F., 2006. More about the Silver-Rich Lead of Ancient Laurion. *Antiq. Class.* 75, 225–230. <https://doi.org/10.3406/antiq.2006.2607>
- Naitza, S., Casini, L., Cocco, F., Deidda, M.L., Funedda, A., Loi, A., Oggiano, G., Secchi, F., 2024. Post-Collisional Tectonomagmatic Evolution, Crustal Reworking and Ore Genesis along a Section of the Southern Variscan Belt: The Variscan Mineral System of Sardinia (Italy). *Minerals* 14, 65. <https://doi.org/10.3390/min14010065>
- Needham, S.P., 2018. *The Classification of Chalcolithic and Early Bronze Age Copper and Bronze Axe-heads from Southern Britain*, 1st edition. ed. Archaeopress Access Archaeology, Oxford.
- Needham, S.P., 1996. Chronology and periodisation in the British Bronze Age, in: Randsborg, K. (Ed.), *Absolute Chronology. Archaeological Europe 2500–500 BC*. Presented at the Absolute Chronology. Archaeological Europe 2500-500 BC. Conference, Acta archaeologica, Copenhagen, pp. 121–140.

- Needham, S.P., 1998. Modeling the flow of metal in the Bronze Age, in: Mordant, C., Pernot, M., Rychner, V. (Eds.), *L'atelier Du Bronziste En Europe Du XXe Au VIIIe Siècle Avant Notre Ère*. Éd. du Comité des travaux historiques et scientifiques Centre de recherches sur les techniques gréco-romaines de l'Université de Bourgogne, Dijon, pp. 285–308.
- Needham, S.P., Leese, M.N., Hook, D.R., Hughes, M.J., 1989. Developments in the Early Bronze Age Metallurgy of Southern Britain. *World Archaeol.* 20, 383–402.
- Needham, S.P., Parham, D., Frieman, C.J., 2013. Claimed by the Sea: Salcombe, Langdon Bay, and other marine finds of the Bronze Age. Council for British Archaeology, York (GB).
- Negueruela, I., Gonzalez Gallero, R., San Claudio, M., Mendez Sanmartin, A., Presa, M., Marín, C., 2004. Mazarrón-2: el barco fenicio del siglo VII a.C. Campaña de noviembre-1999/marzo 2000, in: *El Mundo Púnico: Religión, Antropología y Cultura Material*. Presented at the Actas II Congreso Internacional del Mundo Púnico, Estudios Orientales, Cartagena, pp. 453–483.
- Nerantzis, N., 2012. Shaping bronze by heat and hammer: An experimental reproduction of Minoan Copper alloy forming techniques. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* 237–247.
- Nerantzis, N., Bassiakos, Y., Papadopoulos, S., 2016. Copper metallurgy of the Early Bronze Age in Thassos, north Aegean. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 7, 574–580. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.08.008>
- Nessel, B., Uhnér, C., 2019. Transportation in Bronze Age Europe, in: *Digging in the Past of Old Europe*. Editura Istros a Muzeului Braileil, Brailia, pp. 255–278.
- Nezafati, N., Pernicka, E., Helwing, B., Kirchner, D., 2021. Reassessment of the prehistoric metallurgy at Arisman, Central Iran, in: Marro, C., Stöllner, T. (Eds.), *On Salt, Copper and Gold: The Origins of Early Mining and Metallurgy in the Caucasus*, Archéologie(s). MOM Éditions, Lyon, pp. 231–260. <https://doi.org/10.4000/books.momeditions.12577>
- Nezafati, N., Pernicka, E., Malek Shahmirzadi, S., 2008. Evidence on the Ancient Mining and Metallurgy at Tappeh Sialk (Central Iran). *Anc. Min. Turk. East. Mediterr.* 329–350.
- Nezafati, N., Pernicka, E., Momenzadeh, M., 2009. Introduction of the Deh Hosein ancient tin-copper mine, western Iran: Evidence from geology, archaeology, geochemistry and lead isotope data. *TUBA-AR* 12, 223–236.
- Nezafati, N., Pernicka, E., Momenzadeh, M., 2007. Deh Hosein ancient Sn-Cu mine: a major source of tin in the ancient world. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1335.1761>
- Nicolussi, K., Pichler, T., Thurner, A., 2015. Dendro-Daten zum prähistorischen Kupferbergbau in Westösterreich. *Bergauf Bergab* 10, 2015–2024.
- Niederschlag, E., Pernicka, E., Seifert, Th., Bartelheim, M., 2003. The Determination of Lead Isotope Ratios by Multiple Collector Icp-MS: A Case Study of Early Bronze Age Artefacts and their Possible Relation With Ore Deposits of the Erzgebirge. *Archaeometry* 45, 61–100. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00097>
- Nillesse, O., Watteaux, M., 2020. Le massif forestier de Mervent-Vouvant (Vendée) de la Protohistoire à nos jours : premiers éléments d'une enquête archéologique et archéogéographique. *ISTE OpenScience* 4, 1–22. <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2020.0529>
- Nimis, P., Omenetto, P., Giunti, I., Artioli, G., Angelini, I., 2012. Lead isotope systematics in hydrothermal sulphide deposits from the central-eastern Southalpine (northern Italy). *Eur. J. Mineral.* 24, 23–37. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2163>
- Nobre Silva, I.G., Weis, D., Barling, J., Scoates, J.S., 2009. Leaching systematics and matrix elimination for the determination of high-precision Pb isotope compositions of ocean island basalts. *Geochem. Geophys. Geosystems* 10. <https://doi.org/10.1029/2009GC002537>

- Nocete, F., Sáez, R., Bayona, M.R., Nieto, J.M., Peramo, A., López, P., Gil-Ibarguchi, J.I., Inácio, N., García, S., Rodríguez, J., 2014. Gold in the Southwest of the Iberian Peninsula during the 3rd Millennium BC. *J. Archaeol. Sci.* 41, 691–704. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.10.006>
- Nørgaard, H., Reiter, S., 2020. La spécialisation à l'âge du Bronze nordique (1500-1100 bc). *Séances Société Préhistorique Fr., Actes de la séance de la Société préhistorique française de Paris (juin 2018)* 16, 123–146.
- Nørgaard, H.W., 2015. Metalcraft within the Nordic Bronze Age: Combined metallographic and superficial imaging reveals the technical repertoire in crafting bronze ornaments. *J. Archaeol. Sci.* 64, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.10.005>
- Nørgaard, H.W., Pernicka, E., Vandkilde, H., 2021. Shifting networks and mixing metals: Changing metal trade routes to Scandinavia correlate with Neolithic and Bronze Age transformations. *PLOS ONE* 16, e0252376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252376>
- Nørgaard, H.W., Pernicka, E., Vandkilde, H., 2019. On the trail of Scandinavia's early metallurgy: Provenance, transfer and mixing. *PLOS ONE* 14, e0219574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219574>
- Northover, J.P., 1981. Metallurgy in Bronze Age archaeology. *ArchéoSciences Rev. Archéom.* 1, 215–224. <https://doi.org/10.3406/arsci.1981.1149>
- Northover, J.P., Gale, N.H., 1983. The use of lead isotope analysis in the study of bronze age metallurgy, in: *The Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*. Bradford University, United Kingdom, pp. 284–291.
- Northover, P., 1989. Properties and use of arsenic-copper alloys, in: Hauptmann, A., Pernicka, E., Wagner, G. (Eds.), *Old World Archaeometallurgy*. Presented at the Old World Archaeometallurgy, Heidelberg, pp. 111–118.
- Nowak, K., Stos-Gale, Z.A., Stolarczyk, T., Miazga, B., 2022. The Late Bronze Age “metallurgists” graves’ in south-western Poland. Tracing the provenance of the metal raw material using casting moulds. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 42, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103393>
- Nowak, K., Tarbay, J.G., Stos-Gale, Z.A., Derkowski, P., Sielicka, K., 2023. A complex case of trade in metals: The origin of copper used for artefacts found in one hoard from a Late Bronze Age Lusatian Urnfield Culture in Poland. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 49, 103970. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103970>
- Oakberg, K., Levy, T., Smith, P., 2000. A Method for Skeletal Arsenic Analysis, Applied to the Chalcolithic Copper Smelting Site of Shiqmim, Israel. *J. Archaeol. Sci.* 27, 895–901. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0505>
- Obón Zúñiga, A., 2020. Le mode de production de la première métallurgie du cuivre dans le Sud-Ouest de l'Europe, in: *La Spécialisation Des Productions et Les Spécialistes*. Presented at the Session XXXIV-2 du XVIIIe congrès de l'UISPP, Séances de la Société préhistorique française, Paris, pp. 41–62.
- O'Brien, W., 2022. Trade and the Hillfort Chiefdoms of Bronze Age Ireland, in: Ling, J., Kristiansen, K., Chacon, R.J. (Eds.), *Trade before Civilization: Long Distance Exchange and the Rise of Social Complexity*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 230–250. <https://doi.org/10.1017/9781009086547.013>
- O'Brien, W., 2015. *Prehistoric Copper Mining in Europe 5500–500 BC*, Oxford University Press. ed.
- O'Brien, W., 2003. The Bronze Age Copper Mines of the Goleen Area, Co. Cork. *Proc. R. Ir. Acad. Sect. C Archaeol. Celt. Stud. Hist. Linguist. Lit.* 103C, 13–59.
- O'Brien, W., 1994. *Mount Gabriel: Bronze Age mining in Ireland, First Edition* edition. ed. Galway University Press, Galway.

- Odriozola, C.P., Villalobos García, R., Burbidge, C.I., Boaventura, R., Sousa, A.C., Rodríguez-Ariza, O., Parrilla-Giraldez, R., Prudêncio, M.I., Dias, M.I., 2016. Distribution and chronological framework for Iberian variscite mining and consumption at Pico Centeno, Encinasola, Spain. *Quat. Res.* 85, 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.11.010>
- Oeggli, K., Mathis, F., Moser, J., Schneider, I., Leitner, W., Tomedi, G., Stöllner, T., Krause, R., Pernicka, E., Tropper, P., Schibler, J., Nicolussi, K., Hanke, K., 2008. The history of mining activities in the Tyrol and adjacent areas : impact on environment and human societies (HiMAT). *Antiquity* 82.
- Olalde, I., Brace, S., Allentoft, M.E., Armit, I., Kristiansen, K., Booth, T., Rohland, N., Mallick, S., Szécsényi-Nagy, A., Mittnik, A., Altena, E., Lipson, M., Lazaridis, I., Harper, T.K., Patterson, N., Broomandkoshbacht, N., Diekmann, Y., Faltyskova, Z., Fernandes, D., Ferry, M., Harney, E., de Knijff, P., Michel, M., Oppenheimer, J., Stewardson, K., Barclay, A., Alt, K.W., Liesau, C., Ríos, P., Blasco, C., Miguel, J.V., García, R.M., Fernández, A.A., Bánffy, E., Bernabò-Brea, M., Billoin, D., Bonsall, C., Bonsall, L., Allen, T., Büster, L., Carver, S., Navarro, L.C., Craig, O.E., Cook, G.T., Cunliffe, B., Denaire, A., Dinwiddy, K.E., Dodwell, N., Ernée, M., Evans, C., Kuchařík, M., Farré, J.F., Fowler, C., Gazenbeek, M., Pena, R.G., Haber-Uriarte, M., Haduch, E., Hey, G., Jowett, N., Knowles, T., Massy, K., Pfrengle, S., Lefranc, P., Lemercier, O., Lefebvre, A., Martínez, C.H., Olmo, V.G., Ramírez, A.B., Maurandi, J.L., Majó, T., McKinley, J.I., McSweeney, K., Mende, B.G., Modi, A., Kulcsár, G., Kiss, V., Czene, A., Patay, R., Endrődi, A., Köhler, K., Hajdu, T., Szeniczey, T., Dani, J., Bernert, Z., Hoole, M., Cheronet, O., Keating, D., Velemínský, P., Dobeš, M., Candilio, F., Brown, F., Fernández, R.F., Herrero-Corral, A.-M., Tusa, S., Carnieri, E., Lentini, L., Valenti, A., Zanini, A., Waddington, C., Delibes, G., Guerra-Doce, E., Neil, B., Brittain, M., Luke, M., Mortimer, R., Desideri, J., Besse, M., Brücken, G., Furmanek, M., Hałaszkó, A., Mackiewicz, M., Rapiński, A., Leach, S., Soriano, I., Lillios, K.T., Cardoso, J.L., Pearson, M.P., Włodarczak, P., Price, T.D., Prieto, P., Rey, P.-J., Risch, R., Rojo Guerra, M.A., Schmitt, A., Serralongue, J., Silva, A.M., Smrčka, V., Vergnaud, L., Zilhão, J., Caramelli, D., Higham, T., Thomas, M.G., Kennett, D.J., Fokkens, H., Heyd, V., Sheridan, A., Sjögren, K.-G., Stockhammer, P.W., Krause, J., Pinhasi, R., Haak, W., Barnes, I., Lalueza-Fox, C., Reich, D., 2018. The Beaker phenomenon and the genomic transformation of northwest Europe. *Nature* 555, 190–196. <https://doi.org/10.1038/nature25738>
- Olalde, I., Mallick, S., Patterson, N., Rohland, N., Villalba-Mouco, V., Silva, M., Dulias, K., Edwards, C.J., Gandini, F., Pala, M., 2019. The genomic history of the Iberian Peninsula over the past 8000 years. *Science* 363, 1230–1234.
- Orange, M., Le Bourdonnec, F.-X., D'Anna, A., Tramoní, P., Lugliè, C., Bellot-Gurlet, L., Scheffers, A., Marchesi, H., Guendon, J.-L., Joannes-Boyau, R., 2018. Obsidian economy on the Cauria Plateau (South Corsica, Middle Neolithic): New evidence from Renaghju and I Stantari. *Quat. Int.* 467, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.033>
- Oszczepalski, S., Speczik, S., Zieliński, K., Chmielewski, A., 2019. The Kupferschiefer Deposits and Prospects in SW Poland: Past, Present and Future. *Minerals* 9, 592. <https://doi.org/10.3390/min9100592>
- Ottaway, B.S., 1982. Earliest copper artefacts of the North Alpine region: their analysis and evaluation (Thèse de doctorat). Universität Bern, Bern.
- Otto, H., Witter, W., 1952. *Handbuch der ältesten vorgeschichtlichen Metallurgie in Mitteleuropa*. Leipzig.
- Oudbashi, O., Mohammadamin, S., Davami, P., 2012. Bronze in Archaeology: A Review of the Archaeometallurgy of Bronze in Ancient Iran, in: Collini, L. (Ed.), *Copper Alloys - Early Applications and Current Performance - Enhancing Processes*. InTech. <https://doi.org/10.5772/32687>
- Oy, H., 2017. West Anatolian mining in Early Bronze Age (3000-2000 BC). *J. Anc. Hist. Archaeol.* 4, 13–24. <https://doi.org/10.14795/j.v4i2.219>

- Page, N., Hughes, G., Jones, R., Murphy, K., 2012. Excavations at Erglodd, Llangynfelyn, Ceredigion: prehistoric/Roman lead smelting site and medieval trackway. *Archaeol. Cambrensis* 161, 285–356.
- Pailler, Y., Brisotto, V., Collado, E., Conan, J., Hamon, C., Le Carlier, C., Le Goff, E., Morzadec, H., Nicolas, C., Nicolas, T., Rolet, J., Seignac, H., Stéphan, P., 2016. Ploneour-Lanvern (Finistère), Kersulec - Un dépôt en fosse du Néolithique moyen 2 & une occupation de l'âge du Bronze ancien (Rapport d'opération). Inrap Grand Ouest.
- Palinkaš, L., Bermanec, V., Galović, L., 2016. The Alpine Wilson cycle and NW Tethyan Metallogeny. *Geol. Croat.* 69, 1–2. <https://doi.org/10.4154/GC.2016.01>
- Palinkas, L.A., 1985. Lead Isotope Patterns in Galenas from some Selected Ore Deposits in Croatia and NW Bosnia. *Geoloski Vjesn.* 38, 175–189. [https://doi.org/UDC 550.42:553.44\(497.13/15\)](https://doi.org/UDC 550.42:553.44(497.13/15))
- Papac, L., 2022. Tracking population history, social structure and intergroup exchange in Neolithic to Bronze Age Europe using ancient human and virus genomes (PhD Thesis). Friedrich Schiller University Jena, Jena.
- Papadopoulou, Z.D., 2011. Akrotiraki and Skali: New Evidence for EBA Lead/Silver and Copper Production from Southern Siphnos, in: *Metallurgy: Understanding How, Learning Why: Studies in Honor of James D. Muhly*. INSTAP Academic Press, pp. 149–156.
- Pare, C.F.E. (Ed.), 2000. 1. Bronze and the Bronze Age, in: *Metals Make the World Go Round: The Supply and Circulation of Metals in Bronze Age Europe; Proceedings of a Conference Held at the University of Birmingham in June 1997* Proceedings of a Conference Held at the University of Birmingham in June 1997. Presented at the Metals make the world go round, Oxbow Books, Oxford, pp. 1–38.
- Parzinger, H., 1993. Studien zur Chronologie und Kulturgeschichte der Jungstein-, Kupfer- und Frühbronzezeit zwischen Karpaten und Mittlerem Taurus, Römisch-germanische Forschungen. P. von Zabern, Mainz am Rhein.
- Pearce, M., 2019. The 'Copper Age'—A History of the Concept. *J. World Prehistory* 32, 229–250.
- Pearce, M., 2018. The 'island of silver veins': an overview of the earliest metal and metalworking in Sardinia.
- Peche-Quilichini, K., 2019. Les métallurgies de l'âge du Bronze de Corse.
- Peche-Quilichini, K., Albanese Procelli, R.M., Lo Schiavo, F., Simonet, B.S., Boutoille, L., Cesari, J., Graziani, J., 2021. Smelt like tin spirit - Les métallurgies insulaires de l'âge du Bronze en Méditerranée occidentale, in: *Bronze 2019: 20 ans de recherches: actes du colloque international anniversaire de l'APRAB, Bayeux (19-22 juin 2019)*, Bulletin de l'Association pour la Promotion des Recherches sur l'Âge du Bronze. OREP, Bayeux, pp. 151–170.
- Peche-Quilichini, K., Bellot-Gurlet, L., Cesari, J., Gratuze, B., Graziani, J., Leandri, F., Paolini Saez, H., 2017. From shardania to laestrygonia... Eastern origin prestige goods and technical transfers in Corsica through middle and final Bronze Age. *Aegaeum - Ann. Archéologie Égéenne Univ. Liège UT-PASP*, "Hesperos. The Aegean Seen from the West", Proceedings of the 16th International Aegean Conference, University of Ioannina, Department of History and Archaeology, Unit of Archaeology and Art History, 18-21 May 2016 41, 61–71.
- Peche-Quilichini, K., Mary, J.-B., 2016. La Corse aurait-elle échappé au phénomène des dépôts d'objets métalliques durant l'âge du Bronze ?, in: *12e RMPR. "Entre deux mers" & Actualité de la Recherche*, Bayonne, pp. 326–331.
- Pegler, E., 2010. A primer on old-world metals before the Copper age. *Armchair Prehistory*. URL https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_2/articles/copper_primer_blog.pdf
- Peltenburg, E.J., 2007. Hathor, faience and copper on Late Bronze Age Cyprus. *Cah. Cent. D'Études Chypr.* 37, 375–394. <https://doi.org/10.3406/cchyp.2007.1514>

- Penhallurick, R.D., 1986. *Tin in Antiquity: Its Mining and Trade Throughout the Ancient World with Particular Reference to Cornwall, Maney*. ed. Routledge, London: The Institute of Metals.
- Pereira, F., Silva, R.J.C., Soares, A.M.M., Araújo, M.F., Cardoso, J.L., 2017. Metallurgical production from the Chalcolithic settlement of Moita da Ladra, Portugal. *Mater. Manuf. Process.* 32, 781–791. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1244839>
- Pérez Macías, J.A., 1999. Pico del Oro (Tharsis, Huelva): Contraargumentos sobre la crisis metalúrgica tartésica. *Huelva En Su Hist.* 71–98.
- Pérez Macías, J.A., 1997. Pico del Oro (Tharsis, Huelva). Contraargumentos sobre la crisis metalúrgica tartésica. *Arx* 93–106.
- Pernicka, E., 2014. Provenance Determination of Archaeological Metal Objects, in: Roberts, B.W., Thornton, C.P. (Eds.), *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*. Springer Science & Business Media, pp. 239–268.
- Pernicka, E., 2013. Analyses of early bronze age metal objects from the Museum Debrecen, Hungary. *Gesta* 12, 48–55. <https://doi.org/10.11588/propylaeumdok.00004729>
- Pernicka, E., 2004. Copper and Silver in Arisman and Tappeh Sialk and the Early Metallurgy in Iran, in: Stöllner, T., Slotta, R., Vatandoust, A. (Eds.), *Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology*, Deutsches Bergbau-Museum. Bochum, pp. 232–239.
- Pernicka, E., 1999. Trace element fingerprinting of ancient copper: a guide to technology or provenance, in: Young, S.M.M. (Ed.), *Metals in Antiquity*. Archaeopress, Oxford, pp. 163–171.
- Pernicka, E., 1990. Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit. *Jahrb. Röm.-Ger. Zentralmuseums Mainz* 37, 21–129. <https://doi.org/10.11588/jrgzm.1990.1.72999>
- Pernicka, E., Adam, J., Borg, G., Brüggemann, G., Bunnefeld, J.-H., Kainz, W., Klamm, M., Koiki, T., Meller, H., Schwarz, R., Stöllner, T., Wunderlich, C.-H., Reichenberger, A., 2020. Why the Nebraskan Sky Disc Dates to the Early Bronze Age. An Overview of the Interdisciplinary Results. *Archaeol. Austriaca Band* 104/2020, 89–122. <https://doi.org/10.1553/archaeologia104s89>
- Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Grimanis, A.P., 1990. On the Composition and Provenance of Metal Artefacts from Poliochni on Lemnos. *Oxf. J. Archaeol.* 9, 263–298. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.1990.tb00370.x>
- Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Todorova, H., Kuleff, I., 1997. Prehistoric copper in Bulgaria: Its composition and provenance. *Eurasia Antiq. Z. Für Archäol. Eurasiens* 41–180.
- Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Wagner, G.A., 2009. Eneolithic and Early Bronze Age copper artefacts from the Balkans and their relation to Serbian copper ores. *Praehistorische Z.* 68, 1–54. <https://doi.org/10.1515/prhz.1993.68.1.1>
- Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Wagner, G.A., 1993. Eneolithic and Early Bronze Age copper artefacts from the Balkans and their relation to Serbian copper ores. *Praehistorische Z.* 68, 1–54. <https://doi.org/10.1515/prhz.1993.68.1.1>
- Pernicka, E., Eibner, C., Öztunalı, O., Wagner, G.A., 2003. Early Bronze Age Metallurgy in the North-East Aegean, in: Wagner, Günther A., Pernicka, Ernst, Uerpmann, H.-P. (Eds.), *Troia and the Troad, Natural Science in Archaeology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 143–172. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05308-9_10
- Pernicka, E., Gentner, W., Wagner, G.A., Vavelidis, M., Gale, N.H., 1981. Ancient lead and silver production on Thasos (Greece). *Rev. Archéom.* 1, 227–237. <https://doi.org/10.3406/arsci.1981.1151>

- Pernicka, E., Lutz, J., Stöllner, T., 2016a. Bronze Age Copper Produced at Mitterberg, Austria, and its Distribution. *Archaeol. Austriaca* 100, 19–55. <https://doi.org/10.1553/archaeologia100s19>
- Pernicka, E., Nessel, B., Mehofer, M., Safta, E., 2016b. Lead Isotope Analyses of Metal Objects from the Apa Hoard and Other Early and Middle Bronze Age Items from Romania. *Archaeol. Austriaca* 100, 57–86.
- Pernicka, E., Rehren, T., Schmitt-Strecker, S., 1998. Late Uruk silver production by cupellation at Habu ba Kabira, Syria, in: *Metallurgica antiqua: in honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin*, *Der Anschnitt Beiheft*. Dt. Bergbau-Museum, Bochum, pp. 123–134.
- Pernicka, E., Seeliger, T.C., Wagner, G.A., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Eibner, C., Oztunali, O., Baranyi, I., 1984. Archäometallurgische Untersuchungen in Nordwestanatolien. *Jahrb. Röm.-Ger. Zentralmuseums* 31, 533–599.
- Perucchetti, L., Bray, P., Felicetti, A., Sainsbury, V., Howarth, P., Saunders, M.K., Hommel, P., Pollard, M., 2021. FLAME-D Database: An Integrated System for the Study of Archaeometallurgy. *Archaeometry* 63, 651–667. <https://doi.org/10.1111/arc.12616>
- Peter-Röcher, H., 2007. *Gewalt und Krieg im prähistorischen Europa Beiträge zur Konfliktforschung auf der Grundlage archäologischer, anthropologischer und ethnologischer Quellen*. Habelt, Bonn.
- Peterson, D.L., Dudgeon, J.V., Tromp, M., Bobokhyan, A., 2016. LA-ICP-MS Analysis of Prehistoric Copper and Bronze Metalwork from Armenia, in: *Recent Advances in Laser Ablation ICP-MS for Archaeology, Natural Science in Archaeology*. Springer, pp. 115–133.
- Petit, C., Jouffroy-Bapicot, I., Guillaumet, J.-P., Monna, F., Richard, H., Tamas, G., 2008. L'évolution de la végétation du massif du Morvan et l'impact des activités paléoméallurgiques., in: Szabo, L.D.-P.G. (Ed.), *L'oppidum de Bibracte (Mont-Beuvray, France). Bilan de 10 Années de Recherches (1996-2005)*, *Acta Archaeologica. Akadémiai Kiado, Budapest*, pp. 6–11.
- Pétrequin, P., Bontemps, C., Buthod-Ruffier, D., Le Maux, N., 2011. Approche expérimentale de la production des haches alpines, in: *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen. Ve et IVe millénaires av. J.-C.*, *Les cahiers de la MSHE Ledoux*. pp. 258–291.
- Pétrequin, P., Cassen, S., Errera, M., Klassen, L., Sheridan, A., Pétrequin, A.M., 2012. *Jade. Grandes haches alpines du Néolithique européen. Ve et IVe millénaires av. J.-C.* Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté et Centre de Recherche Archéologique de la Vallée de l'Ain.
- Pfaffenberger, B., 1998. Mining communities, chaînes opératoires and sociotechnical systems, in: *Social Approaches to an Industrial Past*. Routledge.
- Piccardo, P., Vernet, J., Ghiara, G., 2017. Mise en oeuvre des alliages cuivreux : faire parler le métal grâce à la science des matériaux, in: *Quatre mille ans d'histoire du cuivre. Fragments d'une suite de rebonds*, Presses universitaires de Bordeaux. Pernot Michel, pp. 41–60.
- Pichler, T., Nicolussi, K., Goldenberg, G., Hanke, K., Kovács, K., Thurner, A., 2013. Charcoal from a prehistoric copper mine in the Austrian Alps: dendrochronological and dendrological data, demand for wood and forest utilisation. *J. Archaeol. Sci.* 40, 992–1002. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.008>
- Pichler, T., Nicolussi, K., Schröder, J., Stöllner, T., Thomas, P., Thurner, A., 2018. Tree-ring analyses on Bronze Age mining timber from the Mitterberg Main Lode, Austria - did the miners lack wood? *J. Archaeol. Sci. Rep.* 19, 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.02.039>
- Pickles, S., Peltenburg, E., 1998. *Metallurgy, Society and the Bronze/Iron Transition in the East Mediterranean and the Near East (Report of the Department of Antiquities, Cyprus)*. Nicosia.
- Pigott, V.C., 1996. Near Eastern Archaeometallurgy: Modern Research and Future Directions, in: Cooper, J.S., Schwartz, G.M. (Eds.), *The Study of the Ancient Near East in the Twenty-First Century*. Eisenbrauns, pp. 139–76.

- Pinarelli, L., 2004. Lead Isotope Characterization of copper ingots from Sardinia (Italy): inferences on their origins. *Bull. Geol. Soc. Greece* 36, 1173–1180. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16460>
- Piningre, J.-F., Ganard, V., Mordant, C., 2021. Parures cérémonielles en France orientale au Bronze final: le dépôt de Mathay, Doubs, Art, archéologie & patrimoine. Éditions universitaires de Dijon Société archéologique de l'Est, Dijon.
- Pittioni, R., 1951. Prehistoric copper mining in Austria: problems and facts, in: *Seventh Annual Report, Institute of Archaeology*. London, pp. 17–40.
- Poggiali, F., Buonincontri, M.P., D'Auria, A., Volante, N., Di Pasquale, G., 2017. Wood selection for firesetting: First data from the Neolithic cinnabar mine of Spaccasasso (South Tuscany, Italy). *Quat. Int.* 458, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.028>
- Poissonnier, B., Rousseau, L., 2013. Le site campaniforme de La République à Talmont-Saint-Hilaire (85) : état des connaissances (Extrait du Rapport d'activité de l'année 2013 du PCR "Le Campaniforme et l'âge du Bronze dans les Pays de la Loire" (coord. S. Boulud-Gazo)).
- Pollard, A., Thomas, R., Ware, D., Williams, P., 1991. Experimental smelting of secondary copper minerals: implications for Early Bronze Age metallurgy in Britain, in: Wagner, G.A., Pernicka, E. (Eds.), *Archaeometry '90*. Birkhäuser, Boston, pp. 127–136.
- Pollard, A.M., 2018. Previous Approaches to the Chemistry and Provenance of Archaeological Copper Alloys, in: *Beyond Provenance: New Approaches to Interpreting the Chemistry of Archaeological Copper Alloys*, Studies in Archaeological Sciences. Leuven University Press, Leuven, Belgium, pp. 13–40.
- Pollard, A.M., 2009. What a long strange trip it's been: Lead isotopes in archaeology, in: Shortland, A.J., Freestone, I.C., Rehren, T. (Eds.), *From Mine to Microscope: Advances in the Study of Ancient Technology*. Oxbow Books, pp. 181–190.
- Pollard, A.M., Bray, P.J., 2018. *Beyond provenance: new approaches to interpreting the chemistry of archaeological copper alloys*, Studies in archaeological sciences. Leuven University Press, Leuven, Belgium.
- Pollard, A.M., Bray, P.J., Gosden, C., 2014. Is there something missing in scientific provenance studies of prehistoric artefacts? *Antiquity* 88, 625–631. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00101255>
- Polzer, M., 2014. The Bajo de la Campana Shipwreck and Colonial Trade in Phoenician Spain, in: *From Assyria to Iberia: Crossing Continents at the Dawn of the Classical Age*. Metropolitan Museum of Art, pp. 230–242.
- Pomiès, C., Cocherie, A., Guerrot, C., Marcoux, E., Lancelot, J., 1998. Assessment of the precision and accuracy of lead-isotope ratios measured by TIMS for geochemical applications: example of massive sulphide deposits (Rio Tinto, Spain). *Chem. Geol.* 144, 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00127-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00127-7)
- Powell, W., Mathur, R., Bankoff, H.A., Mason, A., Bulatović, A., Filipović, V., Godfrey, L., 2017. Digging deeper: Insights into metallurgical transitions in European prehistory through copper isotopes. *J. Archaeol. Sci.* 88, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.06.012>
- Prange, M., Ambert, P., 2005. Caractérisation géochimique et isotopique des minerais et des métaux base cuivre de Cabrières (Hérault), in: *La Première Métallurgie En France et Dans Les Pays Limitrophes*. Presented at the Actes du colloque international de Carcassonne, Société Préhistorique Française, Carcassonne, 2002, pp. 71–81.
- Prescott, C., 2006. Copper production in Bronze Age Norway?, in: *Historien i Forhistorien. Festschrift Til Einar Østmo På*. pp. 183–190.

- Price, T.D., Frei, R., Brinker, U., Lidke, G., Terberger, T., Frei, K.M., Jantzen, D., 2019. Multi-isotope proveniencing of human remains from a Bronze Age battlefield in the Tollense Valley in northeast Germany. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 11, 33–49. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0529-y>
- Prieto-Martinez, M.P., 2008. Bell Beaker Communities in Thy: The First Bronze Age Society in Denmark. *Nor. Archaeol. Rev.* 41, 115–158. <https://doi.org/10.1080/00293650802517027>
- Primas, M., 1995. Gold and Silver During the 3rd Mill. Cal. BC, in: Morteani, G., Northover, J.P. (Eds.), *Prehistoric Gold in Europe: Mines, Metallurgy and Manufacture*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 77–93. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1292-3_8
- Pryce, T.O., Htwe, K.M.M., Georgakopoulou, M., Martin, T., Vega, E., Rehren, T., Win, Tin Tin, Win, Thu Thu, Petchey, P., Innanchai, J., Pradier, B., 2018. Metallurgical traditions and metal exchange networks in late prehistoric central Myanmar, c. 1000 BC to c. AD 500. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 10, 1087–1109. <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0436-7>
- Py, V., 2009. Mine, bois et forêt dans les Alpes du Sud au Moyen Âge. Approches archéologique, bioarchéologique et historique (PhD Thesis). Université de Provence - Aix-Marseille I.
- Py, V., Ancel, B., 2006. Archaeological experiments in fire-setting : protocol, fuel and anthracological approach. *BAR Int. Ser.* S 71–82.
- Queixalos, I., Menu, M., Mohen, J.-P., 1987. Creusets pour la fonte des alliages à base de cuivre du Bronze Final au Fort-Harrouard à Sorel-Moussel (Eure-et-Loir). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 84, 23–32. <https://doi.org/10.3406/bspf.1987.9806>
- Rademakers, F., 2015. Into the Crucible. Methodological approaches to reconstructing crucible metallurgy, from New Kingdom Egypt to Late Roman Thrace (PhD Thesis). Dr. Thesis UCL Univ. Coll. Lond. UCL (University College London).
- Rademakers, F.W., Farci, C., 2018. Reconstructing bronze production technology from ancient crucible slag: experimental perspectives on tin oxide identification. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 18, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.020>
- Rademakers, F.W., Verly, G., Somaglino, C., Degryse, P., 2020. Geochemical changes during Egyptian copper smelting? An experimental approach to the Ayn Soukhna process and broader implications for archaeometallurgy. *J. Archaeol. Sci.* 122, 105223. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105223>
- Radivojević, M., 2015. Inventing Metallurgy in Western Eurasia: a Look Through the Microscope Lens. *Camb. Archaeol. J.* 25, 321–338. <https://doi.org/10.1017/S0959774314001097>
- Radivojević, M., Rehren, T., 2016. Paint It Black: The Rise of Metallurgy in the Balkans. *J. Archaeol. Method Theory* 23, 200–237. <https://doi.org/10.1007/s10816-014-9238-3>
- Radivojević, M., Rehren, T., Kuzmanović-Cvetković, J., Jovanović, M., Northover, J.P., 2013. Tainted ores and the rise of tin bronzes in Eurasia, c. 6500 years ago. *Antiquity* 87, 1030–1045. <https://doi.org/10.1017/S0003598X0004984X>
- Radivojević, M., Rehren, T., Pernicka, E., Šljivar, D., Brauns, M., Borić, D., 2010. On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe. *J. Archaeol. Sci.* 37, 2775–2787. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.012>
- Radivojević, M., Roberts, B.W., 2021. Early Balkan Metallurgy: Origins, Evolution and Society, 6200–3700 BC. *J. World Prehistory* 34, 195–278. <https://doi.org/10.1007/s10963-021-09155-7>
- Radivojević, M., Roberts, B.W., Pernicka, E., Stos-Gale, Z., Martínón-Torres, M., Rehren, T., Bray, P., Brandherm, D., Ling, J., Mei, J., Vandkilde, H., Kristiansen, K., Shennan, S.J., Broodbank, C., 2019. The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. *J. Archaeol. Res.* 27, 131–185. <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9>

- Radivojević, M., Roberts, B.W., Pernicka, E., Stos-Gale, Z., Martínón-Torres, M., Rehren, T., Bray, P., Brandherm, D., Ling, J., Mei, J., Vandkilde, H., Kristiansen, K., Shennan, S.J., Broodbank, C., 2018. The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. *J. Archaeol. Res.* <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9>
- Rageot, M., Lepère, C., Henry, A., Binder, D., Davtian, G., Filippi, J.-J., Fernandez, X., Guilaine, J., Jallet, F., Radi, G., Thirault, E., Terradas, X., Regert, M., 2021. Management systems of adhesive materials throughout the Neolithic in the North-West Mediterranean. *J. Archaeol. Sci.* 126, 105309. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105309>
- Ramis, D., Hauptmann, A., Coll, J., 2005. Réduction du minerai de cuivre dans la Préhistoire de Majorque, in: *Mémoires de La Société Préhistorique Française*. Presented at the La première métallurgie en France et dans les pays limitrophes. Colloque international, Pôle éditorial archéologique de l'Ouest, pp. 217–224.
- Randall, M., 1995. Estimates of Bronze Age Copper Production at Great Orme (Unpublished M.Sc thesis). University of London.
- Randsborg, K., 2006. Opening the oak coffins. New dates—new perspectives, in: Randsborg, K., Christensen, K. (Eds.), *Bronze Age Oak Coffin Graves: Archaeology and Dendro-Dating*. Copenhagen, pp. 1–162.
- Ratnagar, S., 2001. The Bronze Age: Unique Instance of a Pre-Industrial World System? *Curr. Anthropol.* 42, 351–379. <https://doi.org/10.1086/320473>
- Ravich, I., Ryndina, N., 1995. Early Copper-Arsenic Alloys and the Problems of their Use in the Bronze Age of the North Caucasus. *Bull. Met. Mus.* 23, 1–18.
- Reguera-Galan, A., Barreiro-Grille, T., Moldovan, M., Lobo, L., Cortina, M.Á. de B., Alonso, J.I.G., 2019. A Provenance Study of Early Bronze Age Artefacts Found in Asturias (Spain) by Means of Metal Impurities and Lead, Copper and Antimony Isotopic Compositions. *Archaeometry* 61, 683–700. <https://doi.org/10.1111/arc.12445>
- Rehren, T., 2009. From mine to microbe – the Neolithic copper melting crucibles from Switzerland, in: Shortland, A., Freestone, I., Rehren, T. (Eds.), *From Mine to Microscope*. Oxbow Books, pp. 155–162.
- Rehren, T., Boscher, L., Pernicka, E., 2012. Large scale smelting of speiss and arsenical copper at Early Bronze Age Arisman, Iran. *J. Archaeol. Sci.* 39, 1717–1727. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.009>
- Rehren, T., Vanhove, D., Mussche, H.F., Oikonomakou, M., 1999. Litharge from Laurion. A medical and metallurgical commodity from South Attika. *Antiq. Class.* 68, 299–308. <https://doi.org/10.3406/antiq.1999.1348>
- Reiter, S.S., Frei, K.M., 2021. Examining alternative constructions of power and mobility in the Early Nordic Bronze Age: A case study of a local elite female from Denmark. *Nouv. Archéologie* 24–32. <https://doi.org/10.4000/nda.11947>
- Reitmaier-Naef, L., 2019. Copper smelting slag from the Oberhalbstein (Canton of Grisons, Switzerland) - Methodological considerations on typology and morphology., in: *Alpine Copper II - Alpenkupfer II - Rame delle Alpi II - Ciuvre des Alpes II: New Results and Perspectives on Prehistoric Copper Production*. VML Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen, pp. 229–244.
- Renfrew, C., 1972. *The Emergence of Civilization: The Cyclades and the Aegean in the Third Millennium BC*. David Brown Book Company, Oxford : Oakville, CT.
- Renfrew, L.C., 1973. *Before Civilization: Radiocarbon Revolution and Prehistoric Europe*. Penguin Books Ltd, London.
- Renson, V., Jacobs, A., Coenaerts, J., Mattielli, N., Nys, K., Claeys, P., 2013. Using Lead Isotopes to Determine Pottery Provenance in Cyprus: Clay Source Signatures and Comparison with Late Bronze Age Cypriote Pottery. *Geoarchaeology* 28, 517–530. <https://doi.org/10.1002/gea.21454>

- Renzi, M., Montero-Ruiz, I., Bode, M., 2009. Non-ferrous metallurgy from the Phoenician site of La Fonteta (Alicante, Spain): a study of provenance. *J. Archaeol. Sci.* 36, 2584–2596. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.07.016>
- Ricardo, D., 1817. *On the Principles of Political Economy, and Taxation*, Cambridge Library Collection - British and Irish History, 19th Century. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107589421>
- Richards, J.P., 2014. Making faults run backwards: the Wilson Cycle and ore deposits. *Can. J. Earth Sci.* 51, 266–271. <https://doi.org/10.1139/cjes-2013-0094>
- Rico, C., Fabre, J.-M., Antolinos Marín, J.A., 2009. Recherches sur les mines et la métallurgie du plomb-argent de Carthagène à l'époque romaine. *Mélanges Casa Velázquez Nouv. Sér.* 291–310. <https://doi.org/10.4000/mcv.343>
- Ripoche, J., 2017. La transition du Néolithique à l'âge du Bronze dans le Nord-Ouest de la façade atlantique : entre révolutions techniques et transformations sociales, in: Filet, C., Höltkemeier, S., Perriot, C., Rolland, J. (Eds.), *Révolutions : L'archéologie Face Aux Renouvellements Des Sociétés*, Archéo.Doct. Éditions de la Sorbonne, Paris.
- Roberts, B.W., Radivojević, M., Maric, M., 2021. The Vinča culture: an overview, in: Radivojević, M., Roberts, B.W., Maric, M., Kuzmanovic, C., Rehen, T. (Eds.), *The Rise of Metallurgy in Eurasia: Evolution, Organisation and Consumption of Early Metal in the Balkans*. Archaeopress, Oxford (GB), pp. 38–46.
- Roberts, B.W., Thornton, C.P., Pigott, V.C., 2009. Development of metallurgy in Eurasia. *Antiquity* 83, 1012–1022.
- Rodríguez, J., Sinner, A.G., Martínez-Chico, D., Francisco Santos Zalduegui, J., 2023. AMALIA, A Matching Algorithm for Lead Isotope Analyses: Formulation and proof of concept at the Roman foundry of Fuente Spitz (Jaén, Spain). *J. Archaeol. Sci. Rep.* 51, 104192. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104192>
- Romer, R.L., 1989. Interpretation of the lead isotopic composition from sulfide mineralizations in the Proterozoic Sjangeli area, northern Sweden (No. 415). Geological Survey of Norway.
- Rose, T., Hanning, E., Klein, S., 2020. Smelting Experiments with Chalcopyrite Ore based on Evidence from the Eastern Alps. *METALLA* 25, 77–100. <https://doi.org/10.46586/metalla.v25.2019.i2.77-100>
- Rosman, K.J.R., Chisholm, W., Hong, S., Candelone, J.-P., Boutron, C.F., 1997. Lead from Carthaginian and Roman Spanish Mines Isotopically Identified in Greenland Ice Dated from 600 B.C. to 300 A.D. *Environ. Sci. Technol.* 31, 3413–3416. <https://doi.org/10.1021/es970038k>
- Rossi, C., 2009. Mixing, building, and feeding: mathematics and technology in ancient Egypt, in: Robson, E., Stedall, J. (Eds.), *The Oxford Handbook of the History of Mathematics*, Oxford University Press. Oxford University Press, Oxford, pp. 407–428.
- Rossi, M., Gasquet, D., Cheilletz, A., Tarrieu, L., Bounajma, H., Mantoy, T., Reisberg, L., Delouie, E., Boulvais, P., Burnard, P., 2017. Isotopic and geochemical constraints on lead and fluid sources of the PbZnAg mineralization in the polymetallic Tighza-Jbel Aouam district (central Morocco), and relationships with the geodynamic context. *J. Afr. Earth Sci., Magmatism, metamorphism and associated mineralization in North Africa and related areas* 127, 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.08.011>
- Rostan, P., Rossi, M., Gattiglia, A., 2002. Approche économique et industrielle du complexe minier et métallurgique de Saint-Véran (Hautes-Alpes) dans le contexte de l'Age du Bronze des Alpes du Sud, in: *Actes de La Conférence Les Alpes Dans L'Antiquité*. Presented at the Les Alpes dans L'Antiquité, Société Valdôtaine de Préhistoire et d'Archéologie, Tende, pp. 77–96.
- Rostoker, W., 1975. Some Experiments in Prehistoric Copper Smelting. *Paléorient* 3, 311–315. <https://doi.org/10.3406/paleo.1975.4209>

- Rostoker, W., Pigott, V.C., Dvorak, J., 1989. Direct reduction of copper metal by oxide-sulphide mineral interaction. *Archeomaterials* 3, 69–87.
- Rothenberg, B., 1987. Pharaonic Copper Mines in South Sinai. *IAMS* 10–11, 1–7.
- Rothenberg, B., 1978. *Chalcolithic Copper Smelting: Excavations and Experiments*, 1st edition. ed. Intl Specialized Book Services, London.
- Rothenberg, B., Blanco-Freijeiro, A., 1981. *Ancient Mining and Metallurgy in South-West Spain*, The Institute for Archaeo-Metallurgical Studies. ed. London.
- Rothman, M.S., 2004. Studying the Development of Complex Society: Mesopotamia in the Late Fifth and Fourth Millennia BC. *J. Archaeol. Res.* 12, 75–119.
- Rousseau, L., Gandois, H., Favrel, Q., Cuenca Solana, D., Dupont, C., Garnier, N., Guéret, C., Laforge, M., Poissonnier, B., Vigneau, T., 2020. Cinquante ans après la découverte : état des connaissances et apport des fouilles récentes sur le site campaniforme de la République à Talmont- Saint-Hilaire (Vendée). *Bull. Société Préhistorique Fr.* 117, 47–84. <https://doi.org/10.3406/bspf.2020.15078>
- Roussot-Larroque, J., Queffelec, A., 2014. Le plus vieil objet de fer d'Europe occidentale est-il landais? *Bull. Assoc. Fr. Pour l'étude L'âge Fer* 32, 73–84.
- Rovira Llorens, S., 2005. Tecnología Metalúrgica Campaniforme en la Península Ibérica. Coladas, moldeado y tratamientos postfundición, in: Rojo-Guerra, M.A., Garrido-Pena, R., García Martínez de Lagrán, I. (Eds.), *El Campaniforme En La Península Ibérica y Su Contexto Europeo*. Valladolid, pp. 495–521.
- Rovira Llorens, S., 2004. Tecnología metalúrgica y cambio cultural en la prehistoria de la Península Ibérica. *Norba Rev. Hist.* 9–40.
- Rovira, S., 2011. Contribution of the analytical work to the knowledge of the early metallurgy in the Iberian Peninsula. *Archeometallurgia Dalla Conoscenza Alla Fruizione*, Edipugila 43–55.
- Rovira, S., 2002. Métallurgie ancienne dans la Péninsule Ibérique, in: *La Première Métallurgie En France et Dans Les Pays Limitrophes*. Mémoires de la Société Préhistorique Française, pp. 177–185.
- Rovira, S., Ambert, P., 2002. Les céramiques à réduire le minerai de cuivre : une technique métallurgique utilisée en Ibérie, son extension en France méridionale. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 99, 105–126. <https://doi.org/10.3406/bspf.2002.12609>
- Rubinstein, J., Barsky, L.A., 2002. *Non-ferrous Metal Ores Deposits, Minerals and Plants (On the example of Former USSR)*. CRC Press.
- Ruiz Taboada, A., Montero Ruiz, I., 1999. The oldest metallurgy in western Europe. *Antiquity* 73, 897–903.
- Russell, R.D., Farquhar, R.M., 1960. Dating galenas by means of their isotopic constitutions—II. *Geochim. Cosmochim. Acta* 19, 41–52. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(60\)90124-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(60)90124-1)
- Rychner, V., Kläntschi, N., 1995. Arsenic, nickel et antimoine. Une approche de la métallurgie du Bronze moyen et final en Suisse par l'analyse spectrométrique. Tome I, *Cahiers d'archéologie romande*. ed. Lausanne.
- Ryndina, N., Indenbaum, G., Kolosova, V., 1999. Copper Production from Polymetallic Sulphide Ores in the Northeastern Balkan Eneolithic Culture. *J. Archaeol. Sci.* 26, 1059–1068. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0410>
- Sabatini, B.J., 2015. The As-Cu-Ni System: A Chemical Thermodynamic Model for Ancient Recycling. *JOM* 67, 2984–2992. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1593-3>
- Sabatini, S., 2016a. Revisiting Late Bronze Age oxhide ingots: meanings, questions and perspectives, in: *Local and Global Perspectives on Mobility in the Eastern Mediterranean*. The Norwegian Institute at Athens, pp. 15–62.

- Sabatini, S., 2016b. Late Bronze Age Oxhide and oxhide-like ingots from areas other than the Mediterranean: problems and challenges. *Oxf. J. Archaeol.* 35, 29–45. <https://doi.org/10.1111/ojoa.12077>
- Sabatini, S., Ling, J., 2013. Boundaries, Flows and Connectivities: Mobility and Stasis in the Bronze Age, in: Bergerbrant, S., Sabatini, S. (Eds.), *Counterpoint: Essays in Archaeology and Heritage Studies in Honour of Professor Kristian Kristiansen*, BAR International Series. Archaeopress, Oxford, pp. 517–529.
- Sack, R.O., 2017. Fahlore thermochemistry: Gaps inside the (Cu,Ag)₁₀(Fe,Zn)₂(Sb,As)₄S₁₃ cube. *Petrology* 25, 498–515. <https://doi.org/10.1134/S0869591117050071>
- Sáez, R., Nocete, F., Nieto, J.M., Capitán, M.Á., Rovira, S., 2003. The extractive metallurgy of copper from Cabezo Juré, Huelva, Spain: chemical and mineralogical study of slags dated to the third millenium B.C. *Can. Mineral.* 41, 627–638. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.3.627>
- Şahoğlu, V., 2005. The Anatolian trade network and the izmir region during the early bronze age. *Anatol. Trade Netw. Izmir Reg. Early Bronze Age* 24, 339–361.
- Salanova, L., 2012. Productions domestiques, productions spécialisées... et le reste ? Les différents types de productions céramiques néolithiques. *Bull. Société Préhistorique Fr.* 109, 221–229. <https://doi.org/10.3406/bspf.2012.14104>
- Sandars, N.K., 1987. *The Sea Peoples: warriors of the ancient Mediterranean 1250 - 1150 BC*, Rev. ed., repr. ed, Ancient peoples and places. Thames and Hudson, London.
- Sangster, D.F., Outridge, P.M., Davis, W.J., 2000. Stable lead isotope characteristics of lead ore deposits of environmental significance. *Environ. Rev.* <https://doi.org/10.1139/a00-008>
- Satow, C., Gudmundsson, A., Gertisser, R., Ramsey, C.B., Bazargan, M., Pyle, D.M., Wulf, S., Miles, A.J., Hardiman, M., 2021. Eruptive activity of the Santorini Volcano controlled by sea-level rise and fall. *Nat. Geosci.* 14, 586–592. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00783-4>
- Sawkins, F.J., 1990. Metal Deposits in Relation to Collision Events, in: Sawkins, F.J. (Ed.), *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics, Minerals and Rocks*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 334–376. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08681-0_10
- Sayre, E.V., Joel, E.C., Blackman, M.J., Yener, K.A., Özbal, H., 2001. Stable Lead Isotope Studies of Black Sea Anatolian Ore Sources and Related Bronze Age and Phrygian Artefacts from Nearby Archaeological Sites. Appendix: New Central Taurus Ore Data. *Archaeometry* 43, 77–115. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00006>
- Sayre, E.V., Yener, K.A., Joel, E.C., Barnes, I.L., 1992. Statistical Evaluation of the Presently Accumulated Lead Isotope Data from Anatolia and Surrounding Regions. *Archaeometry* 34, 73–105. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1992.tb00479.x>
- Scaife, B., Budd, P., McDonnell, J., Pollard, A.M., 1999. Lead isotope analysis, oxide ingots and the presentation of scientific data in archaeology, in: Young, S.M.M., Pollard, A.M., Budd, P., Ixer, R.A. (Eds.), *Metals in Antiquity*. Archaeopress, Oxford, pp. 122–133.
- Scaife, B., Budd, P., McDonnell, J.G., Pollard, A.M., Thomas, R.G., 1996. A reappraisal of statistical techniques used in lead isotope analysis, in: Demirci, S., Ozer, A.M., Summers, G.D. (Eds.), *Proceedings of the 29th International Symposium on Archaeometry*. Ankara, pp. 301–307.
- Schauer, P., Shennan, S., Bevan, A., Colledge, S., Edinborough, K., Kerig, T., Pearson, M.P., 2021. Cycles in Stone Mining and Copper Circulation in Europe 5500–2000 bc: A View from Space. *Eur. J. Archaeol.* 24, 204–225. <https://doi.org/10.1017/eea.2020.56>
- Schibler, J., Breitenlechner, E., Deschler-Erb, S., Goldenberg, G., Hanke, K., Hiebel, G., Plogmann, H.H., Nicolussi, K., Marti-Grädel, E., Pichler, S., Schmidl, A., Schwarz, S., Stopp, B., Oeggel, K., 2011. *Miners*

- and mining in the Late Bronze Age: a multidisciplinary study from Austria. *Antiquity* 85, 1259–1278. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00062049>
- Schmitt-Strecker, S., Begemann, F., 2005. Kupfer- und bronzezeitliche Metallartefakte vom Westbalkan: Zur Frage nach den Quellen ihres Kupfers. *Prähistorische Z.* 80, 49–64. <https://doi.org/10.1515/prhz.2005.80.1.49>
- Schroeder, H., Margaryan, A., Szmyt, M., Theulot, B., Włodarczak, P., Rasmussen, S., Gopalakrishnan, S., Szczepanek, A., Konopka, T., Jensen, T.Z.T., Witkowska, B., Wilk, S., Przybyła, M.M., Pospieszny, Ł., Sjögren, K.-G., Belka, Z., Olsen, J., Kristiansen, K., Willerslev, E., Frei, K.M., Sikora, M., Johannsen, N.N., Allentoft, M.E., 2019. Unraveling ancestry, kinship, and violence in a Late Neolithic mass grave. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 116, 10705–10710. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820210116>
- Schwarz, R., 2014. Goldene Schläfen- und Lockenringe: Herrschaftsinsignien in bronzezeitlichen Ranggesellschaften Mitteldeutschlands: Überlegungen zur Gesellschaft der Aunjetitzer Kultur., in: *Metalle der Macht –Frühes Gold und Silber*. Presented at the Mitteldeutscher Archäologentag, Tagungen Landesmus. Vorgesch, Halle (Saale), pp. 717–742.
- Scorrano, G., Yediay, F.E., Pinotti, T., Feizabadifarahani, M., Kristiansen, K., 2021. The genetic and cultural impact of the Steppe migration into Europe. *Ann. Hum. Biol.* 48, 223–233. <https://doi.org/10.1080/03014460.2021.1942984>
- Shalev, S., 1994. The change in metal production from the Chalcolithic period to the Early Bronze Age in Israel and Jordan. *Antiquity* 68, 630–637. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00047153>
- Shalev, S., Shilstein, S.Sh., Yekutieli, Yu., 2006. XRF study of archaeological and metallurgical material from an ancient copper-smelting site near Ein-Yahav, Israel. *Talanta, Colloquium Spectroscopicum Internationale XXXIV* 70, 909–913. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.052>
- Shennan, S.J., 1989. The Excavation of an Early Bronze Age Settlement at St. Veit-Klinglberg, Land Salzburg, Austria: An Interim Report. *Antiqu. J.* 69, 205–224. <https://doi.org/10.1017/S0003581500085413>
- Shimizu, M., Shikazono, N., 1985. Iron and zinc partitioning between coexisting stannite and sphalerite: a possible indicator of temperature and sulfur fugacity. *Miner. Deposita* 20, 314–320. <https://doi.org/10.1007/BF00204292>
- Shishlina, N., Roslyakova, N., Kolev, Y., Bachura, O., Kuznetsova, O., Kiseleva, D., Retivov, V., Tereschenko, E., 2020. Animals, metal and isotopes: Mikhailo-Ovtsyanka I, the Late Bronze Age mining site of the steppe Volga region. *Archaeol. Res. Asia* 24, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.ara.2020.100229>
- Shugar, A.N., 2000. *Archaeometallurgical Investigation of the Chalcolithic site of Abu Matar, Israel: a reassessment of technology and its implications for the Ghassulian Culture (Thèse de doctorat)*. University College London, London.
- Siddall, R., 2018. Mineral Pigments in Archaeology: Their Analysis and the Range of Available Materials. *Minerals* 8, 201. <https://doi.org/10.3390/min8050201>
- Siepi, C., 2013. *L'exploitaion ancienne de l'étain en France. Etude des déchets métallurgiques de deux sites : Limerzel (Massif Armorician) et Vaulty (Massif Central) (Mémoire de Master 2)*. Paris 1 - Panthéon Sorbonne, Paris.
- Simon, J.I., Reid, M.R., Young, E.D., 2007. Lead isotopes by LA-MC-ICPMS: Tracking the emergence of mantle signatures in an evolving silicic magma system. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 2014–2035. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.01.023>
- Sivitskis, A.J., Lehner, J.W., Harrower, M.J., Dumitru, I.A., Paulsen, P.E., Nathan, S., Viète, D.R., Al-Jabri, S., Helwing, B., Wiig, F., Moraetis, D., Pracejus, B., 2019. Detecting and Mapping Slag Heaps at Ancient Copper Production Sites in Oman. *Remote Sens.* 11, 3014. <https://doi.org/10.3390/rs11243014>

- Skourtanioti, E., Erdal, Y.S., Frangipane, M., Balossi Restelli, F., Yener, K.A., Pinnock, F., Matthiae, P., Özbal, R., Schoop, U.-D., Guliyev, F., Akhundov, T., Lyonnet, B., Hammer, E.L., Nugent, S.E., Burri, M., Neumann, G.U., Penske, S., Ingman, T., Akar, M., Shafiq, R., Palumbi, G., Eisenmann, S., D'Andrea, M., Rohrlach, A.B., Warinner, C., Jeong, C., Stockhammer, P.W., Haak, W., Krause, J., 2020. Genomic History of Neolithic to Bronze Age Anatolia, Northern Levant, and Southern Caucasus. *Cell* 181, 1158–1175.e28. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.04.044>
- Smith, R., 2006. A typology of lead-bale slags based on their physico-chemical properties. *Hist. Metall.* 40, 115–128.
- Snoek, W., Plimer, I., Reeves, S., 1999. Application of Pb isotope geochemistry to the study of the corrosion products of archaeological artefacts to constrain provenance. *J. Geochem. Explor.* 66, 421–425.
- Soriano, I., 2011. De tumbas de metalúrgico en el Nordeste Peninsular. El Forat de la Tuta (Riner, Solsonès, Lleida). *Rev. Arqueol. Ponent* 21, 37–56.
- Sotiropoulou, S., Perdikatsis, V., Apostolaki, Ch., Karydas, A.G., Devetzi, A., Birtacha, K., 2010. Lead pigments and related tools at Akrotiri, Thera, Greece. Provenance and application techniques. *J. Archaeol. Sci.* 37, 1830–1840. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.02.001>
- Spanakis, I., 2015. Μελέτη των ιστορικών μεταλλευτικών δραστηριοτήτων στην Δυτική Κρήτη. Technical University of Crete, Chania.
- Stacey, J.S., Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 26, 207–221. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6)
- Standish, C., Dhuime, B., Chapman, R., Coath, C., Hawkesworth, C., Pike, A., 2013. Solution and laser ablation MC-ICP-MS lead isotope analysis of gold. *J. Anal. At. Spectrom.* 28, 217–225. <https://doi.org/10.1039/C2JA30277B>
- Standish, C.D., Dhuime, B., Hawkesworth, C.J., Pike, A.W.G., 2015. A Non-local Source of Irish Chalcolithic and Early Bronze Age Gold. *Proc. Prehist. Soc.* 81, 149–177. <https://doi.org/10.1017/ppr.2015.4>
- Staniaszek, B.E.P., Northover, J.P., 1983. The properties of leaded bronze alloys, in: Aspinall, A., Warren, S.E. (Eds.), *The Proceedings of the 22nd International Symposium on Archaeometry*, University of Bradford. Bradford, pp. 262–272.
- Stech, T., 1999. Aspects of early metallurgy in Mesopotamia and Anatolia, in: Pigott, V.C. (Ed.), *The Archaeometallurgy of the Asian Old World*. Univ. of Pennsylvania Museum, Philadelphia, pp. 59–71.
- Steiniger, D., Giardino, C., 2013. Prehistoric mining in central Italy: New evidence from the Monti della Tolfa (Latium), in: *Mining in European History and Its Impact on Environment and Human Societies – 2nd Mining in European History Conference of the FZ HiMAT*, Innsbruck University Press, Innsbruck, pp. 81–87.
- Stoellner, T., Craddock, B., Gambaschidze, I., Gogochuri, G., Hauptmann, A., Hornschuch, A., Klein, F., Löffler, I., Mindiashvili, G., Murwanidze, B., Senczek, S., Schaich, M., Steffens, G., Tamasashvili, K., Timberlake, S., 2014. Gold in the Caucasus: New research on gold extraction in the Kura-Araxes Culture of the 4th millennium BC and early 3rd millennium BC. *Tagungen Landesmus. Für Vorgesch. Halle* 11, 71–110.
- Stoellner, T., Samashev, Z., Berdenov, S., Ciorny, J., Doll, M., Garner, J., Gontcharov, A., Gorelik, A., Hauptmann, A., Herd, R., Kusch, G.A., Merz, V., Riese, T., Sikorski, B., Zickgraf, B., 2011. Tin from Kazakhstan – The Steppe tin for the West? *Anatol. Met.* V, 231–252.
- Stöllner, T., 2014. Methods of Mining Archaeology, in: Roberts, B.W., Thornton, C. (Eds.), *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*. Springer-Verlag, New York, pp. 133–159.

- Stöllner, T., 2012. Mining and Elites: A Paradigm Beyond the Evidence in European Metal Ages, in: *Beyond Elites - Alternatives to Hierarchical Systems in Modelling Social Formations*. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie, Ruhr Universität Bochum, pp. 433–448.
- Stöllner, T., 2010. Copper and Salt – Mining Communities in the Alpine Metal Ages, in: *Mining in European History and Its Impact on Environment and Human Societies*. Presented at the 1st Mining in European History –Conference SFB, pp. 297–313.
- Stöllner, T., 2008. Mining landscapes in early societies - imprinting processes in pre and protohistoric economies?, in: Bartels, C., Küppers-Eichas, C. (Eds.), *Cultural Heritage and Landscapes in Europe*. Presented at the International Conference Bochum 2007, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 65–92.
- Stöllner, T., Breitenlechner, E., Fritsch, D., Gontscharow, A., Hanke, K., Kirchner, D., Kovács, K., Moser, M., Nicolussi, K., Oeggl, K., Pichler, T., Pils, R., Prange, M., Thiemeyer, H., Thomas, P., 2016. Ein Nassaufbereitungskasten vom Troiboden. Interdisziplinäre Erforschung des bronzezeitlichen Montanwesens am Mitterberg (Land Salzburg, Österreich), in: *Interdisziplinäre Erforschung des bronzezeitlichen Montanwesens am Mitterberg (Land Salzburg, Österreich)*, Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums. University Library Heidelberg, pp. 1–32.
- Stöllner, T., Hanning, E., Hornschuch, A., 2011. Ökonometrie des Kupferproduktionsprozesses am Mitterberger Hauptgang, in: *Die Geschichte Des Bergbaus in Tirol Und Seinen Angrenzenden Gebieten*. Presented at the 5. Milestone-Meeting des SFB-HiMAT, Mühlbach, pp. 115–128.
- Stolyarova, T.A., Baranov, A.V., Osadchii, E.G., 2018. Calorimetric determination of the standard enthalpy of formation of stannite, $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. *Geochem. Int.* 56, 75–77. <https://doi.org/10.1134/S001670291801007X>
- Stone, J.S., Cruz-Uribe, A.M., Brooks, H.L., Walters, J., 2019. U-Pb dating of accessory minerals by LA-ICP-MS/MS 2019, V11D-0120.
- Storemyr, P., 2013. Burning rock! Experiments with fire setting at the Stone Age Melsvik chert quarries in Northern Norway. *Storemyr Archaeol. Conserv.* URL <https://per-storemyr.net/2013/08/28/burning-rock-experiments-with-fire-setting-at-the-stone-age-melsvik-chert-quarries-in-northern-norway/>
- Stos, Z., Gale, N., 2006. Lead Isotope and Chemical Analyses of Slags from Chrysokamino, in: *The Chrysokamino Metallurgy Workshop and Its Territory*. ASCSA, pp. 299–319.
- Stos-Gale, Z., 2019. Analizy izotopów ołowiu a pochodzenie zabytków z brązu, in: Sobieraj, J. (Ed.), *The Origins of the Bronze Age in Warmia and Masuria Revealed by Scientific Analyses*. Olsztyn, pp. 85–120.
- Stos-Gale, Z., 2011. “Biscuits with Ears:” A Search for the Origin of the earliest Oxhide ingots. *Metall. Underst. Learn. Why Stud.* Honor James Muhly Ed. Philip P Betancourt Susan C Ferrence Prehistory monographs; v. 29, 221–229.
- Stos-Gale, Z., 2001. The impact of the natural sciences on studies of Hacksilber and early silver coinage, in: *Hacksilber to Coinage: New Insights into the Monetary History of the Near East and Greece*, Numismatic Studies. New York, pp. 53–76.
- Stos-Gale, Z.A., 1992. Application of lead isotope analysis to provenance studies in Archaeology (Thesis). University of Oxford, Michaelmas.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., 2010. Bronze Age metal artefacts found on Cyprus - metal from Anatolia and the Western Mediterranean. *Trab. Prehist.* 67.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., 2009. Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeol. Anthropol. Sci.* 1, 195–213. <https://doi.org/10.1007/s12520-009-0011-6>
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., 1981. Sources of Galena, lead and silver in predynastic Egypt. *ArchéoSciences Rev. Archéom.* 1, 285–296. <https://doi.org/10.3406/arsci.1981.1158>

- Stos-Gale, Z.A., Maliotis, G., Gale, N.H., Annetts, N., 1997. Lead Isotope Characteristics of the Cyprus Copper Ore Deposits Applied to Provenance Studies of Copper Oxhide Ingots. *Archaeometry* 39, 83–123. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1997.tb00792.x>
- Strahm, C., 1994. Die Anfänge der Metallurgie in Mitteleuropa. *Helvetica Archaeol.* 25, 2–39.
- Strahm, C., 1988. Les séquences socio-culturelles de la première métallurgie, in: *Paléométaballurgie Des Cuivres. Presented at the Actes du colloque de Bourg-en-Bresse et Beaune, M.-Ch. Frère-Sautot*, pp. 151–153.
- Sun, W., Zhang, L., Guo, J., Li, C., Jiang, Y., Zartman, R.E., Zhang, Z., 2016. Origin of the mysterious Yin-Shang bronzes in China indicated by lead isotopes. *Sci. Rep.* 6, 23304. <https://doi.org/10.1038/srep23304>
- Svizzero, S., Tisdell, C.A., 2018. The Demise of the Únětice Culture due to the Reduced Availability of Natural Resources for Bronze Production. *Int. J. Res. Sociol. Anthropol.* 4, 1–14. <https://doi.org/10.20431/2454-8677.0403001>
- Svizzero, S., Tisdell, C.A., 2016. Input Shortages and the Lack of Sustainability of Bronze Production by the Únětice (Economics, Ecology and the Environment No. 202), ISSN 1327-8231. University of Queensland.
- Sweeney, N.M., 2016. Connectivity and globalization in the Bronze Age of Anatolia, in: *The Routledge Handbook of Archaeology and Globalization. Routledge Handbooks Online*, p. 16. <https://doi.org/10.4324/9781315449005.ch57>
- Swiridiuk, P., Close, B., 2004. Geophysical surveying over VMS deposits in oman. *ASEG Ext. Abstr.* 2004, 1–4. <https://doi.org/10.1071/ASEG2004ab145>
- Szécsényi-Nagy, A., Roth, C., Brandt, G., Rihuete-Herrada, C., Tejedor-Rodríguez, C., Held, P., García-Martínez-de-Lagrán, Í., Arcusa Magallón, H., Zesch, S., Knipper, C., Bánffy, E., Friederich, S., Meller, H., Bueno Ramírez, P., Barroso Bermejo, R., de Balbín Behrmann, R., Herrero-Corral, A.M., Flores Fernández, R., Alonso Fernández, C., Jiménez Echevarria, J., Rindlisbacher, L., Oliart, C., Fregeiro, M.-I., Soriano, I., Vicente, O., Micó, R., Lull, V., Soler Díaz, J., López Padilla, J.A., Roca de Togores Muñoz, C., Hernández Pérez, M.S., Jover Maestre, F.J., Lomba Maurandi, J., Avilés Fernández, A., Lillios, K.T., Silva, A.M., Magalhães Ramalho, M., Oosterbeek, L.M., Cunha, C., Waterman, A.J., Roig Buxó, J., Martínez, A., Ponce Martínez, J., Hunt Ortiz, M., Mejías-García, J.C., Pecero Espín, J.C., Cruz-Auñón Briones, R., Tomé, T., Carmona Ballester, E., Cardoso, J.L., Araújo, A.C., Liesau von Lettow-Vorbeck, C., Blasco Bosqued, C., Ríos Mendoza, P., Pujante, A., Royo-Guillén, J.I., Esquembre Beviá, M.A., Dos Santos Goncalves, V.M., Parreira, R., Morán Hernández, E., Méndez Izquierdo, E., Vega y Miguel, J., Mendiña García, R., Martínez Calvo, V., López Jiménez, O., Krause, J., Pichler, S.L., Garrido-Pena, R., Kunst, M., Risch, R., Rojo-Guerra, M.A., Haak, W., Alt, K.W., 2017. The maternal genetic make-up of the Iberian Peninsula between the Neolithic and the Early Bronze Age. *Sci. Rep.* 7, 15644. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15480-9>
- Szefer, H., 2012. The Technology of Copper Alloys, Particularly Leaded Bronze, in Greece, its Colonies, and in Etruria during the Iron Age (Mémoire de Master). Université de Montréal.
- Szekely, G.J., Rizzo, M.L., 2005. Hierarchical Clustering via Joint Between-Within Distances: Extending Ward's Minimum Variance Method. *J. Classif.* 22, 151–183. <https://doi.org/10.1007/s00357-005-0012-9>
- Szigeti, A., Varga, V., Kiss, V., Gyucha, A., 2017. Metals in Transition: A Visual Comparison of Copper and Bronze Age Trade in the Eastern Carpathian Basin. Presented at the Society for American Archaeology, Vancouver, Canada, p. poster.
- Tallet, P., Castel, G., Fluzin, P., 2011. Metallurgical sites of South Sinai (Egypt) in the Pharaonic Era: New Discoveries. *Paléorient* 37, 79–89. <https://doi.org/10.3406/paleo.2011.5424>

- Tanasi, D., Tykot, R.H., Hassam, S., Vianello, A., 2019. The Emergence of Copper-Based Metallurgy in the Maltese Archipelago: an archaeometric perspective. *STAR Sci. Technol. Archaeol. Res.* 5, 127–137. <https://doi.org/10.1080/20548923.2019.1685248>
- Tarbay, J.G., 2016. The Late Bronze Age “scrap hoard” from Nagydobsza. Part I. *Commun. Archaeol. Hung.* 2016, 87–146. <https://doi.org/10.54640/CAH.2016.87>
- Tartaron, T.F., 2008. Aegean Prehistory as World Archaeology: Recent Trends in the Archaeology of Bronze Age Greece. *J. Archaeol. Res.* 16, 83–161.
- Taylor, J.J., 1994. The Oliver Davis Lecture: The First Golden Age of Europe Was in Ireland and Britain (Circa 2400-1400 B.C.). *Ulst. J. Archaeol.* 57, 37–60.
- Taylor, R.N., Ishizuka, O., Michalik, A., Milton, J.A., Croudace, I.W., 2015. Evaluating the precision of Pb isotope measurement by mass spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom.* 30, 198–213. <https://doi.org/10.1039/C4JA00279B>
- Tejedor, C.C., 2018. The Mazarrón 1 Shipwreck: an iron-age boat with unique features from the Iberian Peninsula. *Int. J. Naut. Archaeol.* 47, 300–324. <https://doi.org/10.1111/1095-9270.12318>
- Terberger, G.L., Detlef Jantzen, Sebastian Lorenz, Thomas, 2017. The Bronze Age battlefield in the Tollense Valley, Northeast Germany: Conflict scenario research, in: *Conflict Archaeology*. Routledge.
- Téreygeol, F., 2001. Les mines d’argent carolingiennes de Melle (These de doctorat). Paris 1.
- Terpstra, T.T., 2021. Mediterranean Silver Production and the Site of Antas, Sardinia. *Oxf. J. Archaeol.* 40, 176–190. <https://doi.org/10.1111/ojoa.12216>
- Thomas, R., 2023. 40 Years Old and Still Solving Problems: Evolution of the ICP-MS Application Landscape. *Spectroscopy* 32, 8–13.
- Thompson, C., Skaggs, S., 2013. King Solomon’s Silver? Southern Phoenician Hacksilber Hoards and the Location of Tarshish. *Internet Archaeol.* <https://doi.org/10.11141/ia.35.6>
- Thornton, C.P., 2014. The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau, in: *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses*. Springer-Verlag, New York, pp. 665–696.
- Thornton, C.P., 2009. The Chalcolithic and early Bronze Age metallurgy of Tepe Hissar, northeast Iran: A challenge to the ‘Levantine Paradigm’ (PhD Thesis). University of Pennsylvania.
- Thornton, C.P., Golden, J.M., Killick, D.J., Pigott, V.C., Rehen, T.H., Roberts, B.W., 2010. A Chalcolithic Error: Rebuttal to Amzallag 2009. *Am. J. Archaeol.* 114, 305–315.
- Timberlake, S., 2017. New ideas on the exploitation of copper, tin, gold, and lead ores in Bronze Age Britain: The mining, smelting, and movement of metal. *Mater. Manuf. Process.* 32, 709–727. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1221113>
- Timberlake, S., 2008. Excavations of early mine workings at Twll y Mwyn (Cwm Darren) and Erglodd, Ceredigion (Welsh Mines Preservation Trust Newsletter). Crawley, West Sussex.
- Timberlake, S., 2007. The use of experimental archaeology/archaeometallurgy for the understanding and reconstruction of Early Bronze Age mining and smelting technologies, in: *Metals and Mines : Studies in Archaeometallurgy*, Archetype Publications Ltd. Presented at the Metallurgy, a touchstone for cross-cultural interactions, Archetype Publications Ltd, London, pp. 27–36.
- Timberlake, S., 2003. Excavations on Copa Hill, Cwmystwyth (1986– 1999): An Early Bronze Age copper mine within the uplands of central Wales, British archaeological reports British series. BAR Publishing, Oxford.
- Timberlake, S., 1992. Prehistoric copper mining in Britain. *Corn. Archaeol.* 31, 15–34.

- Timberlake, S., 1990. Excavations at Parys Mountain and Nantyreira, in: *Early Mining in the British Isles: The Proceedings of the Early Mining Workshop at Plas Tan y Bwlch, Snowdonia National Park Study Centre*. Presented at the Early Mining Workshop, Peter & Susan Crew, Plas Tan y Bwlch, pp. 15–21.
- Timberlake, S., Barnatt, J., Bray, L., Cranstone, D., Pickin, J., Newman, P., 2013. 2: The Prehistoric and Roman Periods, in: *An Archaeological Assessment of Tinworking, Mining and Smelting in England*. National Association of Mining History Organisations, pp. 1–40.
- Timberlake, S., Craddock, B., 2013. Prehistoric metal mining in Britain: the study of cobble stone mining tools based on artefact study, ethnography and experimentation. *Chungara Rev. Antropol. Chil.* 45, 33–59.
- Timberlake, S., Marshall, P., 2018. Copper mining and smelting in the British Bronze Age: new evidence of mine sites including some re-analysis of dates and ore sources, in: *Mining for Ancient Copper Essays in Memory of Beno Rothenberg*. pp. 418–431.
- Timberlake, S., Marshall, P., 2013. Understanding the chronology of British Bronze Age mines – Bayesian modelling and theories of exploitation, in: *Mining in European History and Its Impact on Environment and Human Societies: Proceedings for the 2nd Mining in European History-Conference of the FZB-HIMAT, 7.-10. November 2012, Innsbruck, Conference Series*. Presented at the Mining in European History-Conference, Innsbruck Univ. Press, Innsbruck, pp. 59–66.
- Timón-Sánchez, S.M., López-Moro, F.J., Romer, R.L., Rhede, D., Fernández-Fernández, A., Moro-Benito, C., 2019. Late-Variscan multistage hydrothermal processes unveiled by chemical ages coupled with compositional and textural uraninite variations in W-Au deposits in the western Spanish Central System Batholith. *Geol. Acta Int. Earth Sci. J.* 17, 1–19.
- Tisdell, C.A., Svizzero, S., 2019. Unsustainable Mining Development and the Collapse of Some Ancient Societies: Economic Reasons. *Int. J. Res. Sociol. Anthropol.* 5. <https://doi.org/10.20431/2454-8677.0503003>
- Tizzoni, M., 1999. Etruscan tin: a legend? *Pallas Rev. Détudes Antiq.* 50, 89–100. <https://doi.org/10.3406/palla.1999.1538>
- Todd, M., 2014. *The South West to 1000 AD*. Routledge.
- Tolksdorf, J.F., Schröder, F., Petr, L., Herbig, C., Kaiser, K., Kočár, P., Fülling, A., Heinrich, S., Hönl, H., Hemker, C., 2020. Evidence for Bronze Age and Medieval tin placer mining in the Erzgebirge mountains, Saxony (Germany). *Geoarchaeology* 35, 198–216. <https://doi.org/10.1002/gea.21763>
- Tomczyk, C., 2024. L'étain « des cours d'eau » : Une ressource non négligeable à l'âge du Bronze ?, in: *Georgel-Debedde, S., Hut, C., Martin, V., Poli, S. (Eds.), Le passé au fil de l'eau : L'eau et ses enjeux dans les sociétés anciennes, Archéo.doct. Éditions de la Sorbonne, Paris, pp. 1–16.* <https://doi.org/10.4000/books.psorbonne.115667>
- Tomczyk, C., 2022. A database of lead isotopic signatures of copper and lead ores for Europe and the Near East. *J. Archaeol. Sci.* 146, 105657. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105657>
- Tomczyk, C., 2020. Contexte géologique, in: *Costa, K., Maillé (Eds.), Rapport 2020 PCR Mines et Métallurgies Pré et Protohistoriques En Occitanie*. Toulouse, pp. 19–30.
- Tomczyk, C., 2017. Critères de mise en exploitation des gisements de Cu et Sn au Néolithique et à l'âge du Bronze en Europe (Mémoire de Master 2 (non publié)). Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- Tomczyk, C., Brun, P., Petit, C., 2021a. Synthetic study of the emergence of primary copper sulphide metallurgy, in: *Török, B., Giunlia-Mair, A. (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference "Archaeometallurgy in Europe."* Presented at the Archaeometallurgy in Europe V, Editions Mergoïl, Miskolc, Hungary, pp. 183–192.
- Tomczyk, C., Brun, P., Petit, C., 2020. Maîtrise des techniques minières durant le Néolithique et l'âge du Bronze un facteur d'exploitation des mines de cuivre ?, in: *La Spécialisation Des Productions et Les Spécialistes*.

Presented at the Session XXXIV-2 du XVIIIe congrès de l'UISPP, Séances de la Société préhistorique française, Paris, pp. 225–240.

- Tomczyk, C., Costa, K., Brun, P., Desachy, B., Petit, C., 2021b. Multivariate statistical study of lead isotopic data: proposal of a protocol for provenance determination, in: Török, B., Giunlia-Mair, A. (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference “Archaeometallurgy in Europe.” Presented at the Archaeometallurgy in Europe V, Editions Mergoïl, Miskolc, Hungary, pp. 165–182.
- Tomczyk, C., Costa, K., Giosa, A., 2019. Déterminer les zones d’approvisionnement en cuivre archéologique, in: Del Medico, C., Dessaint, M., Gorin, C. (Eds.), Méthodes d’enregistrement des données en archéologie. Éditions de la Sorbonne, pp. 183–197. <https://doi.org/10.4000/books.pSORbonne.37927>
- Tomczyk, C., Costa, K., Giosa, A., Brun, P., Petit, C., 2021c. Provenance studies using lead isotopy: contribution of the consideration of geological contexts in archaeological databases. *BSGF - Earth Sci. Bull.* 192, 20. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021008>
- Tomczyk, C., Żabiński, G., 2023. A PCA-AHC Approach to Provenance Studies of Non-Ferrous Metals with Combined Pb Isotope and Chemistry Data. *J. Archaeol. Method Theory*. <https://doi.org/10.1007/s10816-022-09598-y>
- Torró, L., Benites, D., Vallance, J., Laurent, O., Ortiz-Benavente, B.A., Chelle-Michou, C., Proenza, J.A., Fontboté, L., 2022. Trace element geochemistry of sphalerite and chalcopyrite in arc-hosted VMS deposits. *J. Geochem. Explor.* 232, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106882>
- Trevits, M., Yuan, L., Teacoach, K., Valoski, M., Urosek, J., 2009. Mining Publication: Understanding Mine Fire Disasters by Determining the Characteristics of Deep-Seated Fires. Presented at the SME Annual Meeting and Exhibit, Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Denver, Colorado, pp. 1–9.
- Tribouillard, É., 2018. Analyse spatiale et régionalisation des productions de haches à douille des types armoricains. *Rev. Archéologique Ouest* 159–172. <https://doi.org/10.4000/rao.5206>
- Trincherini, P.R., Domergue, C., Manteca, I., Nesta, A., Quarati, P., 2009. The identification of lead ingots from the Roman mines of Cartagena: the rôle of lead isotope analysis. *J. Roman Archaeol.* 22, 123–145. <https://doi.org/10.1017/S1047759400020626>
- Tropper, P., Krismer, M., Goldenberg, G., 2017. Recent and Ancient Copper Production in the Lower Inn Valley. an Overview of Prehistoric Mining and Primary Copper Metallurgy in the Brixlegg Mining District. *Mitteilungen Österr. Ges.* 163, 97–115.
- Tropper, P., Vavtar, F., 2009. Mineralogical/petrological and geochemical survey of historic Mining sites in the tyrol and adjacent areas in the course of the sonderforschungsbereich hiMat (history of Mining activities in the tyrol and adjacent areas). *Geo.Alp.* 6, 1–10.
- Tudyka, K., Pazdur, A., De Vleeschouwer, F., 2017. Holocene elemental, lead isotope and charcoal record from peat in southern Poland. *Mires Peat* 1–18. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.257>
- Turck, R., Stllner, T., Goldenberg, G., 2019. Alpine Copper II - Alpenkupfer II - Rame delle Alpi II - Ciuvre des Alpes II: New Results and Perspectives on Prehistoric Copper Production. VML Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westfalen.
- Tykot, R.H., 2017. Obsidian Studies in the Prehistoric Central Mediterranean: After 50 Years, What Have We Learned and What Still Needs to Be Done? *Open Archaeol.* 3, 264–278. <https://doi.org/10.1515/opar-2017-0018>
- Tylecote, R.F., 1992. A history of metallurgy, Maney for the institute of materials. ed. Institute of Materials.
- Tylecote, R.F., 1987. The early history of metallurgy in Europe, Longman archaeology series. Longman, London ; New York.

- Tzachili, I., 2008. Aegean Metallurgy in the Bronze Age, in: Proceedings of an International Symposium Held at the University of Crete, Rethymnon, Greece, on November 19-21, 2004. Ta Pragmata Publications, Athens, pp. 7–33.
- Vagnetti, L., Schiavo, F.L., 1989. Late Bronze Age long distance trade in the Mediterranean: the role of the Cypriots, in: Peltenburg, E. (Ed.), *Early Society in Cyprus*. Edinburgh University Press, pp. 217–243.
- Valera, P.G., Valera, R.G., 2005. Outline of Geology and Mineral Deposits of Sardinia, in: *Archaeometallurgy in Sardinia*. Monographies instrumentum, pp. 35–109.
- Van Vliet-Lanoë, B., 1996. Relations entre la contraction thermique des sols en Europe du Nord-Ouest et la dynamique de l'inlandsis Weichsélien. *Comptes-Rendus Académie Sci. Paris* 322, 461–468.
- Vandenbergh, J., French, H.M., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A.A., Jin, H., Cui, Z., Zhang, T., Wan, X., 2014. The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas* 43, 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vandeveld, S., Lacour, J.-L., Quéré, C., Marie, L., Petit, C., Slimak, L., 2021. Identification du rythme annuel de précipitation des carbonates pariétaux pour un calage micro-chronologique des occupations archéologiques pyrogéniques : cas de la Grotte Mandrin (Malataverne, Drôme, France). *Bull. Société Géologique Fr.* 192, 9. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021002>
- Vandkilde, H., 2019. Bronze Age Beginnings – a Scalar View from the Global Outskirts. *Proc. Prehist. Soc.* 85, 1–27. <https://doi.org/10.1017/ppr.2019.7>
- Vandkilde, H., 2016. Bronzization: The Bronze Age as Pre-Modern Globalization. *Praehistorische Z.* 91. <https://doi.org/10.1515/pz-2016-0005>
- Vandkilde, H., 2014. Breakthrough of the Nordic Bronze Age: Transcultural Warriorhood and a Carpathian Crossroad in the Sixteenth Century BC. *Eur. J. Archaeol.* 17, 602–633. <https://doi.org/10.1179/1461957114Y.0000000064>
- Vandkilde, H., Northover, J.P., 1996. From Stone to Bronze: The Metalwork of the Late Neolithic and Earliest Bronze Age in Denmark. *Jutland Archaeological Society*.
- Vasseur, L.-V., 1961. L'étain dans le monde. *Cah. O.-m.* 14, 121–156. <https://doi.org/10.3406/caoum.1961.2202>
- Vaxevanopoulos, M., Blichert-Toft, J., Davis, G., Albarède, F., 2022. New findings of ancient Greek silver sources. *J. Archaeol. Sci.* 137, 105474. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105474>
- Viallefond, L., 1994. Cluster analysis on geochemical results from gossans., in: Leistel, J.M. (Ed.), *The Massive Sulphide Deposits of the South Iberian Pyrite Province: Geological Setting and Exploration Criteria*. BRGM, Orléans, pp. 109–137.
- Vidal, R., 2012. La minería metálica prehistórica en la península ibérica. *Lurralde Investig. Espac.* 67–78.
- Vidigal, R.O., Valério, P., Araújo, M.F., Soares, A.M.M., Mataloto, R., 2016. Micro-EDXRF study of Chalcolithic copper-based artefacts from Southern Portugal. *X-Ray Spectrom.* 45, 63–68. <https://doi.org/10.1002/xrs.2658>
- Villa, I.M., 2009. Lead isotopic measurements in archeological objects. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 1, 149. <https://doi.org/10.1007/s12520-009-0012-5>
- Villalba-Mouco, V., Oliart, C., Rihuete-Herrada, C., Childebayeva, A., Rohrlach, A.B., Fregeiro, M.I., Celdrán Beltrán, E., Velasco-Felipe, C., Aron, F., Himmel, M., Freund, C., Alt, K.W., Salazar-García, D.C., García Atiénzar, G., de Miguel Ibáñez, M.P., Hernández Pérez, M.S., Barciela, V., Romero, A., Ponce, J., Martínez, A., Lomba, J., Soler, J., Martínez, A.P., Avilés Fernández, A., Haber-Uriarte, M., Roca de Togores Muñoz, C., Olalde, I., Lalueza-Fox, C., Reich, D., Krause, J., García Sanjuán, L., Lull, V., Micó,

- R., Risch, R., Haak, W., 2021. Genomic transformation and social organization during the Copper Age–Bronze Age transition in southern Iberia. *Sci. Adv.* 7, eabi7038. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abi7038>
- Villalba-Mouco, V., Oliart, C., Rihuete-Herrada, C., Rohrlach, A.B., Fregeiro, M.I., Childebayeva, A., Ringbauer, H., Olalde, I., Celdrán Beltrán, E., Puello-Mora, C., Valério, M., Krause, J., Lull, V., Micó, R., Risch, R., Haak, W., 2022. Kinship practices in the early state El Argar society from Bronze Age Iberia. *Sci. Rep.* 12, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25975-9>
- Visco, G., Plattner, S.H., Guida, G., Ridolfi, S., Gigante, G.E., 2015. Rings or daggers, axes or fibulae have a different composition? A multivariate study on Central Italy bronzes from eneolithic to early iron age. *Chem. Cent. J.* 9, 15. <https://doi.org/10.1186/s13065-015-0090-7>
- Von Quadt, A., Peytcheva, I., Fanger, L., Heinrich, C.A., 2005. The Elatsite porphyry Cu–Au deposit, Bulgaria: Ore deposit: Lat. 42° 45' N, Long. 24° 02' E. *Ore Geol. Rev.* 27, 128–129. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.022>
- Voudouris, P., 2016. A Field Guide on the Geology and Mineralogy of Lavrion, Attica, Greece. Faculty of Geology & Geoenvironment National and Kapodistrian University of Athens, Athens.
- Vuković, J., 2011. Late neolithic pottery standardization: Application of statistical analyses. *Starinar* 81–100.
- Wager, E., Ottaway, B., 2018. Optimal versus minimal preservation: two case studies of Bronze Age ore processing sites. *Hist. Metall.* 52, 22–32.
- Wagner, G., Gentner, W., Gropengiesser, H., Gale, N., 1980. Early Bronze Age lead-silver mining and metallurgy in the Aegean: the ancient workings on Siphnos, in: Craddock, P.T. (Ed.), *Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurg.* British Museum Occasional Paper, pp. 63–86.
- Wagner, G., Yule, P., 2007. Thermoluminescence Dating of Early Ceramics from Oman. *J. Oman Stud.* 1–15. <https://doi.org/10.11588/PROPYLAEUMDOK.00000129>
- Wang, C., Zhao, K.-D., Chen, J., Ma, X., 2022. Examining fingerprint trace elements in cassiterite: Implications for primary tin deposit exploration. *Ore Geol. Rev.* 149, 105082. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105082>
- Wang, Q., Strekopytov, S., Roberts, B.W., 2018. Copper ingots from a probable Bronze Age shipwreck off the coast of Salcombe, Devon: Composition and microstructure. *J. Archaeol. Sci.* 97, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.07.002>
- Wang, Q., Strekopytov, S., Roberts, B.W., Wilkin, N., 2016. Tin ingots from a probable Bronze Age shipwreck off the coast of Salcombe, Devon: Composition and microstructure. *J. Archaeol. Sci.* 67, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.01.018>
- Warburton, D.A., 2023. *Bronze Age Egypt and globalisation.* Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne.
- Wayman, M.L., Duke, M.J.M., 1999. The effects of melting on native copper, in: *The Beginnings of Metallurgy.* Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 55–63.
- Webb, J.M., 2015. Identifying stone tools used in mining, smelting, and casting in Middle Bronze Age Cyprus. *J. Field Archaeol.* 40, 22–36. <https://doi.org/10.1179/0093469014Z.000000000108>
- Webb, J.M., Frankel, D., Stos, Z.A., Gale, N., 2006. Early Bronze Age metal trade in the eastern Mediterranean. New compositional and lead isotope evidence from Cyprus. *Oxf. J. Archaeol.* 25, 261–288. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.2006.00261.x>
- Weisgerber, G., Pernicka, E., 1995. Ore Mining in Prehistoric Europe: An Overview, in: *Prehistoric Gold in Europe,* NATO ASI Series. Springer, Dordrecht, pp. 159–182. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1292-3_12

- Weiss, D.J., Kober, B., Dolgoplova, A., Gallagher, K., Spiro, B., Le Roux, G., Mason, T.F.D., Kylander, M., Coles, B.J., 2004. Accurate and precise Pb isotope ratio measurements in environmental samples by MC-ICP-MS. *Int. J. Mass Spectrom.* 232, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2004.01.005>
- Weller, O., 2015. First salt making in Europe: an overview from Neolithic times. *Doc. Praehist.* 42. <https://doi.org/10.4312/dp.42.12>
- Wenke, R.J., 1991. The Evolution of Early Egyptian Civilization: Issues and Evidence. *J. World Prehistory* 5, 279–329.
- Wertime, T.A., 1973. The Beginnings of Metallurgy: A New Look: Arguments over diffusion and independent invention ignore the complex metallurgic crafts leading to iron. *Science* 182, 875–887. <https://doi.org/10.1126/science.182.4115.875>
- Wertime, T.A., 1964. Man's First Encounters With Metallurgy: Man's discovery of ores and metals helped to shape his sense of science, technology, and history. *Science* 146, 1257–1267. <https://doi.org/10.1126/science.146.3649.1257>
- Wheeler, T.S., Maddin, R., Muhly, J.D., 1975. Ingots and the Bronze Age Copper Trade in the Mediterranean. *Prog. Rep., Penn Museum* 17, 31–39.
- White, W.M., Albarède, F., Télouk, P., 2000. High-precision analysis of Pb isotope ratios by multi-collector ICP-MS. *Chem. Geol.* 167, 257–270. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00182-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00182-5)
- Williams, R.A., 2013. Linking Bronze Age copper smelting slags from Pentwyn on the Great Orme to ore and metal. *J. Hist. Metall. Soc.* 47, 93–110.
- Williams, R.A., Le Carlier de Veslud, C., 2019. Boom and bust in Bronze Age Britain: major copper production from the Great Orme mine and European trade, c. 1600–1400 BC. *Antiquity* 93, 1178–1196. <https://doi.org/10.15184/aqy.2019.130>
- Williamson, B.J., Shaw, A., Downes, H., Thirlwall, M.F., 1996. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central, France. *Chem. Geol.* 127, 25–42. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00105-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00105-0)
- Willies, L., Weisgerber, G., 2000. The use of fire in prehistoric and ancient mining: Firesetting. *Paléorient, La pyrotechnologie à ses débuts. Evolution des premières industries faisant usage du feu.* 26, 131–149. <https://doi.org/10.3406/paleo.2000.4715>
- Wilson, J.T., 1966. Did the Atlantic Close and then Re-Open? *Nature* 211, 676–681. <https://doi.org/10.1038/211676a0>
- Wiseman, R., 2018. Random accumulation and breaking: The formation of Bronze Age scrap hoards in England and Wales. *J. Archaeol. Sci.* 90, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.12.007>
- Wolf, S., Stos, S., Mason, R., Tite, M.S., 2003. Lead isotope analyses of Islamic pottery glazes from Fustat, Egypt. *Archaeometry* 45, 405–420. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00118>
- Wong, K.-H., Zhou, M.-F., Chen, W.T., O'Brien, H., Lahaye, Y., Chan, S.-L.J., 2017. Constraints of fluid inclusions and in-situ S-Pb isotopic compositions on the origin of the North Kostobe sediment-hosted gold deposit, eastern Kazakhstan. *Ore Geol. Rev.* 81, 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.004>
- Wood, J.R., Bell, C., Montero-Ruiz, I., 2020. The Origin of Tel Dor Hacksilver and the Westward Expansion of the Phoenicians in the Early Iron Age: The Cypriot Connection. *J. East. Mediterr. Archaeol. Herit. Stud.* 8, 1–21. <https://doi.org/10.5325/jeasmedarcherstu.8.1.0001>

- Wood, J.R., Montero-Ruiz, I., 2019. Semi-refined silver for the silversmiths of the Iron Age Mediterranean: A mechanism for the elusiveness of Iberian silver. *Trab. Prehist.* 76, 272. <https://doi.org/10.3989/tp.2019.12237>
- Wood, J.R., Montero-Ruiz, I., Martínón-Torres, M., 2019. From Iberia to the Southern Levant: The Movement of Silver Across the Mediterranean in the Early Iron Age. *J. World Prehistory* 32, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s10963-018-09128-3>
- Woodward, D., 1985. “Swords into ploughshares”: recycling in pre-industrial England. *Eco Hist. Rev.* 38, 175–191.
- Wu, X., Ji, F., Zhang, Xiaolei, Wang, F., Feng, F., Lu, Q., Zhao, S., Zhang, Y., Wang, C., Huang, F., Zhang, Xingxiang, 2022. Geochemical evidence reveals a long-distance trade of white pottery in Neolithic China 5,000 years ago. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 44, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103533>
- Yagel, O., Ben-Yosef, E., 2022. Lead in the Levant during the Late Bronze and early Iron Ages. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 46, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103649>
- Yahalom-Mack, N., Finn, D.M., Erel, Y., Tirosh, O., Galili, E., Yasur-Landau, A., 2022. Incised Late Bronze Age lead ingots from the southern anchorage of Caesarea. *J. Archaeol. Sci. Rep.* 41, 103321. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103321>
- Yahalom-Mack, N., Galili, E., Segal, I., Eliyahu-Behar, A., Boaretto, E., Shilstein, S., Finkelstein, I., 2014. New insights into Levantine copper trade: analysis of ingots from the Bronze and Iron Ages in Israel. *J. Archaeol. Sci.* 45, 159–177. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.004>
- Yahalom-Mack, N., Langgut, D., Dvir, O., Tirosh, O., Eliyahu-Behar, A., Erel, Y., Langford, B., Frumkin, A., Ullman, M., Davidovich, U., 2015. The Earliest Lead Object in the Levant. *PLOS ONE* 10, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142948>
- Yalçın, Ü., 2008. History of Mining and Metallurgy in Anatolia, in: Özbal, H., Yalçın, Ü., Paşamehmetoğlu, A.G. (Eds.), *Ancient Mining in Turkey and the Eastern Mediterranean*. Atılım University, Ankara, pp. 15–40.
- Yang, X.-M., 2012. Sulphur Solubility in Felsic Magmas: Implications for Genesis of Intrusion-related Gold Mineralization. *Geosci. Can.* 39, 17–32.
- Yener, K.A., 2008. Revisiting Kestel Mine and Göltepe: the Dynamics of Local Provisioning of Tin during the Early Bronze Age. *Anc. Min. Turk. East. Mediterr.* 57–6.
- Yener, K.A., 1997. *Excavations at Kestel Mine, Turkey: The Final Season (No. 1996–97 Annual Report)*. Oriental Institute.
- Yener, K.A., Özbal, H., 1987. Tin in the Turkish Taurus mountains: the Bolkardağ mining district. *Antiquity* 61, 220–226. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00052029>
- Yener, K.A., Sayre, E.V., Joel, E.C., Özbal, H., Barnes, I.L., Brill, R.H., 1991. Stable lead isotope studies of central taurus ore sources and related artifacts from eastern mediterranean chalcolithic and bronze age sites. *J. Archaeol. Sci.* 18, 541–577. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(91\)90053-R](https://doi.org/10.1016/0305-4403(91)90053-R)
- Yener, K.A., Vandiver, P.B., 1993. Tin Processing at Göltepe, an Early Bronze Age Site in Anatolia. *Am. J. Archaeol.* 97, 207–238. <https://doi.org/10.2307/505657>
- Zartman, R.E., 1974. Lead Isotopic provinces in the Cordillera of the Western United States and their Geologic Significance. *Econ. Geol.* 69, 792–805. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.6.792>
- Zartman, R.E., Doe, B.R., 1981. Plumbtectonics - The model. *Tectonophysics* 75.
- Zartman, R.E., Pawlowska, J., Rubinowski, Z., 1979. Lead isotopic composition of ore deposits from the Silesia-Cracow mining district: in *Research on the genesis of zinc-lead deposits of upper Silesia, Poland*. *Pr Inst Geol* 95, 133–151.

- Zaykov, V.V., Yuminov, A.M., Tkachev, V.V., 2012. Copper Mines, Chromite Copper Ores and Slags of the Ishkinino Bronze Age Archaeological Microregion, The Southern Urals. *Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia* 40, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.aeae.2012.08.004>
- Zschocke, C., Preuschen, E., 1932. Das urzeitliche Bergbaugebiet von Mühlbach-Bischofshofen. *Materialien zur Urgeschichte Österreichs*. Anthropologische Gesellschaft in Wien, Wien.
- Zwicker, U., 1989. Untersuchungen zur Herstellung von Kupfer und Kupferlegierungen im Bereich des östlichen Mittelmeeres, in: *Old World Archaeometallurgy, Anschnitt. Beiheft*. Deutsche Bergbaumuseum, Bochum, Germany, pp. 191–201.

Table des illustrations

Figure 1 : Processus métallogéniques liés aux cycles de Wilson. Les principaux métaux exploités à la Protohistoire ont été indiqués, les métaux entre parenthèses ne sont pas (ou très peu dans le cas du zinc (Zn)) exploités aux périodes anciennes.	10
Figure 2 : Solubilité du soufre en fonction de la température (dans un granite à la pression constante de 1 kbar). Source : Yang, 2012.....	13
Figure 3 : Localisation des minéralisations en cuivre, étain, plomb, argent, et or en Europe occidentale. Carte produite par l’auteure, issue de compilation de la base de données ProMine fournie par le BRGM (Bureau de Recherche en Géologie Minière) et de la base de données de l’USGS (United States Geological Survey).	15
Figure 4 : Schéma simplifié du processus d’altération hydrothermale et supergène.....	16
Figure 5 : Schéma simplifié illustrant le principe de l’altération supergène d’un filon cuprifère.	17
Figure 6 : Position des glaciers et du pergélisol au dernier maximum glaciaire ; dans ces régions, les zones d’altération supergène sont de taille très réduite. Source de la carte : Van Vliet-Lanoë, 1996.....	18
Figure 7 : Influence de l’ajout d’arsenic au cuivre sur la résistance à la déformation	21
Figure 8 : Dates d’abandon des bronzes arséniés au profit du bronze à l’étain en Europe. Source : Pare, 2000. Le bronze remplace les cuivres arséniés de manière plus précoce dans les îles Britanniques que dans le sud de la péninsule Ibérique.	22
Figure 9 : Évolution du pourcentage de bronzes à l’étain dans les assemblages découverts en Iran	23
Figure 10 : Principales formes sous lesquelles le cuivre circule en Europe occidentale au cours du temps.	24
Figure 11 : Grattages réalisés sur une hache plate à arsenic et sur un bracelet en bronze permettant de constater les différences de couleur de ces deux alliages (photographie prise au musée d’Aquitaine). Photographie : Céline Tomczyk.	26
Figure 12 : Étapes de la chaîne opératoire minière et principaux composants du système technique minier.	27
Figure 13 : Remplissage sédimentaire (alternance de sédiments sableux et d’argiles compactes)	29
Figure 14 : Tranchée d’extraction minière en partie comblée, district de Fayet, Aveyron.	30
Figure 15 : À gauche : structures présentant un profil en « V » profondes de 2 m et larges de 5 m mises en évidence par les relevés LiDAR en forêt de Mervent (photographie : Céline Tomczyk) ; à droite relevé LiDAR correspondant dans Nillesse et Watteaux (2020).	31
Figure 16 : Fontis isolé dans le district du Minier, Aveyron. Photographie : Céline Tomczyk.	31
Figure 17 : Reprise minière dans la mine de Great Orme (Pays de Galles) : seules quelques galeries de l’âge du Bronze (indiquées en gras) sont conservées, les travaux du 19 ^e siècle ayant repris et fait disparaître une grande partie des travaux anciens. Source : Lewis 1996.....	32
Figure 18 : Drague utilisée dans le cadre de l’exploitation de l’étain alluvionnaire à Saint Renan dans les années 1960. Source de l’image : http://www.expotem.fr/2011/08/la-comiren/	33
Figure 19 : Représentation de l’abattage par le feu par Georgius Agricola dans <i>De re metallica</i> (1566).	34
Figure 20 : Coupoles caractéristiques laissées par l’emploi d’abattage par le feu dans la mine de Bouco-Payrol (district de Fayet, Aveyron). Photographie : Céline Tomczyk.....	35
Figure 21 : Représentation schématique de différentes utilisations et manipulations des maillets et des piochons en pierre (le schéma c représente un pilon pour broyer le minerai). Illustration de Delgado-Raack <i>et al.</i> , 2014 d’après Timberlake et Craddock, 2013.....	37

Figure 22 : Carte de la Calabre présentant les trois régions où la présence de maillets permet de supposer l'exploitation du cuivre. Des mines ont été découvertes et fouillées dans la région 1 (en jaune) alors que dans les régions 2 et 3 (en vert) les mines n'ont pas encore été documentées. Source : Larocca et Breglia, 2016.....	38
Figure 23 : Exemple de minerai composé de roche, de gangue (ici de la baryte : Ba).....	39
Figure 24 : Type de stériles généré par différentes phases d'exploitation. Schéma : Céline Tomczyk.....	40
Figure 25 : Atelier présentant plusieurs phases de minéralogie fouillées au Minier (Viala du Tarn, Aveyron). Photographie de gauche : halde grossière (US 6083 : stériles francs) recouvrant une halde à fragments plus petits et contenant de plus nombreux fragments de gangue (US 6186 stériles de sélectivité). Photographie au centre : sol d'atelier où des fragments de minerais concassés plurimillimétriques sont conservés. Photographies de droite : contenu des sols d'ateliers, prises de vue à l'aide d'une Dino-lite. Photographies : Céline Tomczyk.....	40
Figure 26 : Exemple de halde (forme d'amas correspondant à des déversements successifs) dans le paysage ici recoupée par un chemin forestier et visible grâce aux coupes rases effectuées dans la parcelle.....	41
Figure 27 : Ancienne halde recouverte par une faible végétation (Aveyron). Photographie : Céline Tomczyk....	41
Figure 28 : Ressources nécessaires à la métallurgie (l'eau et le vent ne sont pas indiqués, mais potentiellement utilisés) pour les processus métallurgiques. Modifié par Céline Tomczyk d'après Hoffmann et Miller, 2014.	44
Figure 29 : Expérimentation de fonte de bournonites sous atmosphère réductrice	45
Figure 30 : Présence de charbons (reconnaissables par leur couleur noire et leur aspect strié) dans une scorie. Photographie : Céline Tomczyk.....	46
Figure 31 : Exemple de scories affleurant en surface (Alpes suisses, datation probable du premier âge du Fer). Photographie : Céline Tomczyk.....	46
Figure 32 : Schéma simplifié illustrant la réduction des carbonates de cuivre. Cette réduction est opérée à l'aide de charbons de bois placés au sommet des minéraux concassés. Schéma : Céline Tomczyk.....	48
Figure 33 : Schéma simplifié illustrant l'oxydation des sulfures de cuivre. Cette oxydation est pratiquée à l'air libre et donc sous atmosphère oxydante. Le soufre (S) contenu dans la chalcopirite réagit avec l'oxygène de l'atmosphère. Ce départ se fait sous forme de SO ₂ , un gaz toxique et irritant. Un mélange de CuO et de FeO est obtenu à la fin du processus. Schéma : Céline Tomczyk.....	49
Figure 34 : Schéma simplifié illustrant la réduction des sulfures de cuivre. Cette réduction est opérée à l'aide de charbons de bois placés au sommet du CuO et FeO précédemment obtenus auxquels est ajouté du quartz (SiO ₂) ici représenté sous forme de triangles. Du cuivre (Cu) est obtenu à la fin du processus, le fer (Fe) est quant à lui piégé, lié à la silice dans une scorie. Une fine matte riche en cuivre se forme au contact entre le Cu métal et la scorie. Schéma : Céline Tomczyk.....	49
Figure 35 : Scorie expérimentale obtenue après la fonte d'un mélange de bindhémites oxydées et de barytes. Le cuivre (orangé) est présent dans la scorie (gris sombre). Photographie : Céline Tomczyk.....	50
Figure 36 : Schéma simplifié illustrant l'oxydation de cuivres gris. Cette oxydation est pratiquée à l'air libre et donc sous atmosphère oxydante. Le soufre (S) et l'arsenic (As) réagissent avec l'oxygène et sont rejetés dans l'air sous forme de gaz toxiques et irritants. Schéma : Céline Tomczyk.....	51
Figure 37 : Scorie de réduction de tétraédrite ocre et poreuse découverte sur le site néolithique du Planet (Aveyron). Ces scories ne sont ni vitrifiées ni sombres et denses comme le supposerait la classification de Hoffmann et Miller, 2014. Image modifiée d'après une photographie par Emmanuel Dransart.	53
Figure 38 : Four-cuvette de l'atelier du Planet (Aveyron), la céramique (en orange) est pluricentimétrique et la couche scoriacée la recouvrant (en jaune) est plurimillimétrique. Photographie : Kévin Costa	54
Figure 39 : Hypothèses d'organisation de la production du métal et distance aux zones minières.....	58

Figure 40 : Carte de localisation des ateliers métallurgiques datés du III ^e millénaire av. J.-C. (Kunst, 2013) et minéralisations cuprifères en péninsule Ibérique (données issues des bases de données Promine et de l'USGS). Carte : Céline Tomczyk	59
Figure 41 : Carte de répartition des gîtes de cuivre au sud du Massif central (base de ProMine avec ajout de données PCR 2019) présentant une possible corrélation avec la répartition des artefacts en cuivre (répartition d'après Carozza <i>et al.</i> 2015) et les sites de pyrométallurgie. Source : Rapport PCR 2019 Mines et Métallurgie protohistorique en Occitanie. Carte : Céline Tomczyk.	60
Figure 42 : Déchets et mobilier couramment retrouvés pour chacune des trois étapes de la chaîne opératoire minière à la Pré/Protohistoire. Schéma par Céline Tomczyk, inspiré d'Artignan et Cottard (2003).	62
Figure 43 : Carte de synthèse des mines de cuivre et ateliers de pyrométallurgie préhistoriques	64
Figure 44 : Carte de synthèse des mines de cuivre de l'âge du Bronze par Radivojević <i>et al.</i> (2019).....	64
Figure 45 : Carte des principaux sites de fonte de minerais de cuivre du Néolithique par Obón Zúñiga (2020)..	65
Figure 46 : Répartition des ateliers de pyrométallurgie néolithiques par minerai fondu par Bourgarit (2007).....	65
Figure 47 : Localisation des mines de cuivre et des ateliers de métallurgie recensés par Bourgarit <i>et al.</i> (2003)..	66
Figure 48 : Carte de répartition des mines et ateliers par O'Brien (2015) ; cette carte ne recense pas toutes les exploitations indiquées dans l'ouvrage.	66
Figure 49 : Organisation des entrées des différentes feuilles de la base de données.	69
Figure 50 : Lingot de plomb-cuivre découvert sur le site du Planet.....	71
Figure 51 : Localisation des mines dont la datation antérieure à l'âge du Fer n'est supposée	73
Figure 52 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction du cuivre référencés dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).	76
Figure 53 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction de l'étain référencés dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).	77
Figure 54 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction du plomb-(argent) dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).	78
Figure 55 : Localisation et qualité de l'information des sites liés à l'extraction de l'or dans la base de données (se référer aux Tableaux 9 et 10 pour le dénombrement précis du nombre de sites).....	78
Figure 56 : Interface de chronophage et configuration utilisée.	81
Figure 57 : Nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du cuivre au cours du temps	82
Figure 58 : Évolution du nombre d'ateliers de métallurgie extractive du cuivre découverts (histogramme du haut) et du nombre de mines bien documentées (histogramme du bas).	83
Figure 59 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive de l'étain au cours du temps en Europe de l'Ouest.....	84
Figure 60 : Répartition du nombre d'ateliers de métallurgie extractive de l'étain.....	84
Figure 61 : Mines d'étain en roche connues et supposées : 1 Kestel, 2 Kültepe, 3 Schellerhau, 4 Wheal Coates, 5 Abbaretz-Nozay, 6 Carvalhelhos, 7 Tuela, 8-9 : Monte Valerio et Monte Rombolo. Une dixième mine aurait pu être ajoutée à cette compilation : la mine de São Martinho de Orgens (Portugal) où une dague du Bronze final a été trouvée dans le comblement d'un puits d'extraction lors de l'exploitation de cette dernière pendant la Seconde Guerre mondiale (Comendador Rey <i>et al.</i> , 2017). Cette découverte n'étant reliée à aucun contexte stratigraphique, le choix de ne pas l'afficher a été fait. Source de la carte : Tomczyk, 2024.	85

Figure 62 : Mines d'étain alluvionnaires connues et supposées : 1 Spasovine, 2 Montpeyroux et Le Faltre, 3 El Cerro de San Cristobal, 4 Saint-Renan, 5-6 : St Austell et Carnon, 7 montagnes de Mourne, 8 Montagnes de Wicklow, 9-15 : Perran-ar-Worthal, vallée de la Lanherne, Truro, Tremough, rivière Erme, St Eval et Sennen, 16 Mor Braz, 17 Mervent, 18-20 : Folgadoura, Carvalhelhos et Baiões, 21 Autun, 22 vallée de l'Elster (monts Métallifères), 23-24 : Mont Cer et Cigankulja. Les données géologiques sont issues de la base de données ProMine. Source de la carte : Tomczyk, 2024.	86
Figure 63 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du plomb et du plomb-argent au cours du temps en Europe de l'Ouest.	87
Figure 64 : Répartition du nombre de mines et d'ateliers de métallurgie extractive du plomb et du plomb-argent en péninsule Ibérique.	87
Figure 65 : Variation simplifiée du nombre d'exploitations de cuivre, étain et plomb-argent.	88
Figure 66 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 5000-3800 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	89
Figure 67 : Plan partiel des galeries préhistoriques et distribution des squelettes humains de la mine d'El Aramo. Source : de Blas Cortina, 2005. Les 16 squelettes inhumés dans des galeries contemporaines de l'exploitation sont interprétés par Gimbutas (2005) en lien avec des croyances chalcolithiques.	90
Figure 68 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 5000 et 3800 av. J.-C. ; la taille des figurés est proportionnelle à la taille des exploitations. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent la fonte de deux types de minerais. ..	92
Figure 69 : Sites en lien avec l'extraction du cuivre pour la période 5000 - 3800 av. J.-C. et limites de la dernière glaciation quaternaire (Weichsélien) d'après Van Vliet-Lanoë, 1996 et Vandenberghe <i>et al.</i> , 2014.	93
Figure 70 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 3800-3000 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	94
Figure 71 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 3800 et 3000 av. J.-C. et tracé simplifié des limites des secteurs présentant potentiellement des zones d'enrichissement supergène.	95
Figure 72 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 3000-2500 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	96
Figure 73 : Carte géologique de la Pyrite Belt et de ses gisements de VMS. Source : Huston <i>et al.</i> , 2011.	97
Figure 74 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 3000 et 2500 av. J.-C. et tracé simplifié des limites des secteurs présentant potentiellement des zones d'enrichissement supergène.	98
Figure 75 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 2500-2000 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	99
Figure 76 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 2500 et 2000 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières.	100
Figure 77 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 2000 et 1600 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières.	101
Figure 78 : Évolution de la production supposée de cuivre en Irlande : l'augmentation de la production de cuivre serait suivie d'une baisse brutale. Source : O'Brien, 2015, p. 299.	102
Figure 79 : Carte de localisation des districts miniers cuprifères du Chalcolithique et de l'âge du Bronze.	102

Figure 80 : Carte des indices de métallurgie pour la fin du III ^e millénaire et le début du II ^e millénaire du Grand-Ouest de la France. Les points numérotés de 8 à 12 correspondent à des sites de métallurgie d'élaboration et non de métallurgie extractive. Source : T. Nicolas, Inrap dans Pailler <i>et al.</i> , 2016.....	103
Figure 81 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 2000-1600 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	105
Figure 82 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 1600-1300 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	106
Figure 83 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 1600 et 1300 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent de que deux types de minerais y sont fondus.	108
Figure 84 : Minerai exploité dans les Alpes Tyroliennes supposé par l'étude des signatures chimiques de 1200 artefacts locaux. Source : Pernicka <i>et al.</i> , 2016.....	109
Figure 85 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 1300-800 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	109
Figure 86 : Composition moyenne (tendance générale) en étain et plomb des bronzes.....	110
Figure 87 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) entre 1300 et 800 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent de que deux types de minerais y sont fondus.	112
Figure 88 : Répartition des mines et ateliers recensés pour la période 800-400 av. J.-C. Les sites apparaissant en transparence sont douteux. La taille du figuré des mines est proportionnelle à leur dimension.	113
Figure 89 : Minéraux de cuivre extraits des mines (ronds) et fondus dans les ateliers de métallurgie d'extraction (losanges) en activité entre 800 et 400 av. J.-C. ; la taille des figurés est en lien avec la taille des exploitations minières. Deux couleurs au sein d'un même figuré d'atelier indiquent que deux types de minerais y sont fondus.	114
Figure 90 : Définition des grandes zones de production de cuivre, étain, plomb-argent,	116
Figure 91 : Répartition des mines et ateliers d'extraction du cuivre et de l'étain recensés	117
Figure 92 : Carte à large échelle interprétée de la localisation des zones de production de cuivre, étain, plomb-argent, plomb et or pour la période 1300-800 av. J.-C. Vue élargie de la carte en Figure 90.	118
Figure 93 : Répartition des mines et ateliers d'extraction du cuivre (sites douteux exclus) recensés pour la période 5000-800 av. J.-C. et indices minéralisés en cuivre (données ProMine et USGS).....	120
Figure 94 : Répartition chronologique du nombre de mines présentes dans le corpus d'étude retenu.	123
Figure 95 : Localisation des mines retenues pour l'étude des techniques minières : les mines dont l'exploitation débute avant 2000 av. J.-C. sont représentées par des cercles gris, celles dont l'exploitation débute après 2000 av. J.-C. par des cercles blancs.	124
Figure 96 : Répartition spatiale des mines présentant des traces d'abattage par le feu avant 2000 av. J.-C. (ronds rouges) et après 2000 av. J.-C. (ronds blancs). L'abattage par le feu est présent dans l'ensemble de l'Europe avant 2000 av. J.-C. (l'exploitation des mines du Tyrol autrichien ne débute qu'après 2000 av. J.-C.).....	128
Figure 97 : Évolution du nombre de sites (ateliers en haut, mines en bas) où sont travaillés des sulfures primaires de cuivre (chalcopyrites) et/ou des carbonates et oxydes de cuivre.	131
Figure 98 : Évolution du nombre de sites (ateliers en haut, mines en bas) où sont travaillés des cuivre gris et/ou des carbonates et oxydes de cuivre.	132

Figure 99 : Localisation des mines de cuivre et des ateliers de pyroméallurgie et principales périodes d'activité des grandes zones minières. Les zones sont numérotées de 1 à 15 ; les pastilles jaunes correspondent aux mines et ateliers exploitant majoritairement des chalcoprites, les pastilles grises aux mines exploitant d'autres minéraux de cuivre (cuivres gris et carbontaes de cuivre). La période d'activité indiquée correspond à la période la plus représentative de la période minière. Source : Tomczyk <i>et al.</i> , 2021a.....	133
Figure 100 : Histogrammes par région : à droite zones définies comme à exploitation majoritaire de sulfures primaires, à gauche zones où les sites exploitant ces métaux sont minoritaires. Source : Tomczyk <i>et al.</i> , 2021a.	134
Figure 101 : Ouvertures et fermetures de mines (graphique du haut) et d'ateliers (graphique du bas).....	137
Figure 102 : Ouvertures et fermetures de mines (graphique du haut) et d'ateliers (graphique du bas).....	138
Figure 103 : Mines et ateliers de métallurgie extractive en activité et sites qui cessent leur activité.....	139
Figure 104 : Localisation des sites dont la production cesse (en rouge) entre 1300 et 1200 av. J.-C., et des sites précédemment en exploitation et dont l'exploitation continue (en transparence), des sites dont la production débute (en couleur) entre 1300 et 1200 av. J.-C.	141
Figure 105 : Plan et description du volume de la mine de Carrigat dans O'Brien, 2003.....	145
Figure 106 : Volumes calculés par pas de 100 ans : l'épaisseur de la courbe obtenue (en marron) souligne des écarts importants entre les volumes maximums et minimums calculés.	146
Figure 107 : À gauche : aspect des courbes de production si une production constante est supposée ;.....	147
Figure 108 : Production totale estimée par pas de 100 ans en considérant des productions constantes.	148
Figure 109 : Production totale estimée par pas de 100 ans avec correction de type « en cloche ».	148
Figure 110 : Production totale estimée par tranche de 100 ans pour l'Europe de l'Ouest (Chypre exclue) à partir de notre corpus. Les productions minimales et maximales obtenues sont indiquées en pointillés, la moyenne est représentée par un trait plein.	149
Figure 111 : Localisation (la taille des figurés est proportionnelle à la production totale des mines) et courbes de production pour les trois régions présentant la plus forte concentration de mines décrites : le sud de la péninsule Ibérique, le Pays de Galles et l'est des Alpes. L'écart entre les valeurs maximales et minimales obtenues (représentées en pointillés) est important. Il est dû à la présence de zones d'altération supergène dans le sud de la péninsule Ibérique et à la difficulté d'estimer les volumes de vides dans les mines des Alpes.	150
Figure 112 : Productivité moyenne (somme des tonnes de cuivre produites par 100 ans divisée.....	151
Figure 113 : Productivité moyenne (somme des tonnes de cuivre produites par 100 ans divisée.....	151
Figure 114 : Évolution du nombre d'artefacts en matière lithique et en cuivre qui ont été découverts.	152
Figure 115 : Courbes de production de cuivre précédemment calculée et évolution du nombre d'artefacts en cuivre en circulation d'après Brozio <i>et al.</i> (2023) et Schauer <i>et al.</i> (2021).....	153
Figure 116 : À gauche : sites référencés par Capuzzo <i>et al.</i> (2018) ; à droite : densité de probabilité obtenue, (a) 1233 dates de l'ensemble de données filtrées, (b) 852 dates 14C des établissements, (c) 283 dates 14C des contextes funéraires. Source des illustrations : Capuzzo <i>et al.</i> , 2018.....	154
Figure 117 : Courbes de production de cuivre précédemment calculées et dynamiques démographiques issues de l'analyse de densité de probabilité des dates radiocarbone de Capuzzo <i>et al.</i> , 2018 (nous avons pris en compte l'ensemble des données soit le modèle a et avons exagéré la courbe afin de faciliter la lecture).	154
Figure 118 : Courbes de production de cuivre estimées pour la péninsule Ibérique et dynamiques démographiques issues de l'analyse de densité de probabilité des dates radiocarbone d'Hinz <i>et al.</i> , 2019.....	155

Figure 119 : Courbes de production de cuivre précédemment calculées, dynamiques démographiques issues de Capuzzo <i>et al.</i> , 2018 et évolution du nombre d'artefacts en cuivre en circulation d'après Brozio <i>et al.</i> (2023) et Schauer <i>et al.</i> (2021) (nous avons exagéré les courbes pour faciliter la lecture).	156
Figure 120 : Nombre de mines et courbes de production moyenne par type de minéral majoritairement	156
Figure 121 : Synthèse des minéraux principalement exploités et des alliages en circulation.	157
Figure 122 : Minéral à aspect de malachite issu non pas de l'altération d'une chalcoppyrite mais de l'altération d'une tétraédrite (cuivres gris) : l'analyse EDS (MEB) permet de constater que ce minéral contient des teneurs très élevées (33 %) en antimoine.	158
Figure 123 : Présence d'arsenic/antimoine dans les minerais de cuivre extraits des mines (graphique du haut) et fondus dans les ateliers (graphique du bas) au cours du temps. Le nombre de mines (graphique du haut) et d'ateliers (en bas) indique des dynamiques différentes.	159
Figure 124 : Nombre de mines considérées et production théorique en fonction de la présence ou non d'arsenic/antimoine dans les gisements. Les minerais riches en As/Sb subissant un grillage afin de vaporiser l'As/Sb (en mauve) ont été distingués des minerais pour lesquels seule une réduction.....	160
Figure 125 : Types de minerais de cuivre exploités/fondus entre 3000 et 2000 av. J.-C. (carte de gauche) et entre 1300 et 800 av. J.-C. (carte de droite). Sur la carte de gauche, certains sites (en rose) exploitent des minerais riches en cuivres gris et en minéraux de cuivre dépourvus d'arsenic et antimoine (tels que des chalcoppyrites ou des malachites) mais il n'est pas possible de déterminer si ces deux types de minéraux sont exploités ou non. Dans la carte de droite, des cuivres gris sont grillés (en violet) afin de vaporiser l'arsenic et l'antimoine.....	161
Figure 126 : Les trois types d'organisations sociétales et leurs relations à l'exploitation minière,.....	162
Figure 127 : Distribution géographique des tombes présentant des outils de travail des minerais et des métaux (étoiles) et des marteaux retrouvés hors contextes miniers entre le III ^e et le II ^e millénaire av. J.-C., d'après Soriano (2011) avec ajout d'une donnée de Costantini (1984) concernant la découverte d'un maillet dans un dolmen du Larzac et de Nowak <i>et al.</i> (2022) concernant des outils retrouvés en contexte funéraire en Pologne.....	163
Figure 128 : Analyse de la variation des périodes d'activité minière : à gauche, boîte à moustaches pour l'ensemble des mines ; à droite, diagrammes de dispersion par catégorie de mines	170
Figure 129 : À gauche : possibles traces de suie dans la paroi d'une galerie d'exploitation de cuivre (datation céramique du début du III ^e millénaire av. J.-C.), à droite : stalagmite conservée dans un travers-banc d'accès d'une mine médiévale (datation ¹⁴ C du 13 ^e siècle apr. J.-C.). Les deux sites sont localisés dans l'Aveyron.....	172
Figure 130 : Résumé des théories concernant le degré de spécialisation des productions en lien avec l'organisation des sociétés et des échanges, d'après Stöllner (2012) et Norgaard et Reiter (2020).	173
Figure 131 : Synthèse des critères de distinction des degrés de spécialisation des tâches d'après Brun (2015). .	173
Figure 132 : Pourcentage relatif du volume de production pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82).	175
Figure 133 : Pourcentage relatif du volume de production des mines de cuivre de la péninsule Ibérique (n=32).	175
Figure 134 : Répartition des types de réacteurs pour les 73 sites de métallurgie extractive du cuivre étudiés. ...	176
Figure 135 : Pourcentage relatif du volume de production pour l'ensemble des ateliers de métallurgie extractive du cuivre considérés (n=73).....	177
Figure 136 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=78).	179
Figure 137 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour les mines de cuivre à encaissant résistant (n=28).	179

Figure 138 : Pourcentage relatif de la dimension des unités de production pour les mines de cuivre à encaissant peu résistant (n=54).....	180
Figure 139 : Répartition des mines à progression rapide (à gauche, n=11), moyenne (au centre, n=18) et lente (à droite, n=49) : des mines présentant un fort nombre de m ³ abattus par an côtoient des mines où la progression est lente dans chacune des grandes régions exploitées à l'âge du Bronze.	180
Figure 140 : Pourcentage relatif des dimensions d'unités de production pour l'ensemble des ateliers de métallurgie extractive du cuivre considérés (n=73).	181
Figure 141 : Répartition des différents types d'unités de production de métallurgie extractive du cuivre entre 3000 et 2000 av. J.-C. (n= 70).....	182
Figure 142 : Répartition des différents types d'unités de production de métallurgie extractive du cuivre	182
Figure 143 : Pourcentage relatif des différents types de creusement pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82). Il n'y a pas d'augmentation de la quantité de mines souterraines exploitées.....	183
Figure 144 : Pourcentage relatif des différents types d'encaissants pour l'ensemble des mines de cuivre considérées (n=82).....	184
Figure 145 : Nombre d'ateliers par types de minerais de cuivre fondu, à gauche à Chypre,	185
Figure 146 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) réalisée avec les différents critères de spécialisation précédemment définis pour la métallurgie. Plus un atelier (un losange) est proche d'un point (une variable), plus cette variable le caractérise. De la même manière, plus deux points sont proches, plus ils se corréleront. Par exemple, la proximité de « Chalcopyrites » et « Four » indique que ces dernières sont très majoritairement fondues dans des fours.	186
Figure 147 : Étude de la spécialisation des ateliers chypriotes de métallurgie extractive du cuivre. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et la fonte de sulfures de cuivre (chalcopyrites)).....	188
Figure 148 : Étude de la spécialisation des ateliers ibériques de métallurgie extractive du cuivre. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et la fonte de sulfures de cuivre).	188
Figure 149 : Étude de la spécialisation des ateliers des Alpes centrales et de l'est. La flèche indique la direction que devraient théoriquement suivre les ateliers à travers le temps (soit une augmentation de la taille des ateliers avec apparition de fours et fonte de sulfures de cuivre).	189
Figure 150 : Analyse des Correspondances Multiples (ACM) réalisée avec les différents critères de spécialisation précédemment définis pour l'extraction minière. Plus une mine (un rond) est proche d'un point (une variable), plus cette variable la caractérise. De la même manière, plus deux points sont proches, plus ils se corréleront. La distance entre les ronds empilés a été volontairement exagérée pour faciliter la lecture.	190
Figure 151 : Modèle synthétique des systèmes miniers du Chalcolithique et de l'âge du Bronze	192
Figure 152 : Implication de la présence de certains matériaux sur l'organisation spatiale	193
Figure 153 : Répartition des pointes de flèche de type Palmela. D'après Laporte et Gomez de Soto, 2008.....	201
Figure 154 : Types d'assemblages de vases à boire datés entre 2400 et 2200 av. J.-C. Source : Caraglio (2020).	202
Figure 155 : Évolution des types de lingots issus de deux zones minières produisant du cuivre :.....	205
Figure 156 : Apparition et répartition des poids de mesure en plomb. Source : Ialongo <i>et al.</i> , 2021.....	205
Figure 157 : Ressources disponibles dans les diverses régions d'Europe dont l'exploitation.....	207

Figure 158 : Participation à une carte réalisée en collaboration avec le musée d'Aquitaine soulignant les vastes aires de répartition des pointes de flèche de Palmela (dans le sud-ouest de l'Europe), des épées de Mörigen (dans le nord-est européen) et des haches à rebords médocaines dont l'aire de répartition est restreinte à l'actuelle Aquitaine.....	209
Figure 159 : Groupes de compositions définis par Pernicka (1990).	211
Figure 160 : Schéma simplifié des modifications de compositions élémentaires pouvant se produire depuis l'extraction d'un minéral de cuivre sulfuré jusqu'à la production d'artefacts en bronze.	212
Figure 161 : Chaînes de désintégration de l' ²³⁸ U (à gauche) de l' ²³⁵ U (au centre) et du ²³² Th (à droite).	215
Figure 162 : Schéma simplifié de la désintégration de l'uranium (U) et du thorium (Th) en ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb et ²⁰⁸ Pb. Modifié d'après Marcoux, 1986 p.17 ; Pernicka, 1990 ; Ceyhan, 2003.....	215
Figure 163 : Exemple d'isochrone isotopique en différents endroits d'une même météorite : les courbes de croissance montrent que le rapport ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb augmente initialement plus vite que le rapport ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb. Source : Observatoire de Paris.	216
Figure 164 : Abondances naturelles moyennes des isotopes du plomb.....	217
Figure 165 : Rapports isotopiques du plomb couramment utilisés.....	218
Figure 166 : Carte des gisements analysés : à gauche, minéralisations de la couverture permienne (points blancs) ; à droite, minéralisations en lien avec la transgression triasique (points jaunes). Source : Tomczyk 2020.	223
Figure 167 : Rapports isotopiques du plomb mesurés dans le cadre du PCR Mines et Métallurgies protohistoriques en Occitanie (financement conjoint PCR et bourse de mobilité Paris 1).	224
Figure 168 : Rapports isotopiques du plomb du dépôt d'argent de Mique-Ekron (triangles) et de monnaies athéniennes (carrés rouges). Les signatures de Mique-Ekron s'alignent le long d'un axe reliant les signatures des minerais du Laurion (cercles bleus) et de la Pyrite Belt ibérique (croix vertes). Source : Wood <i>et al.</i> , 2020.....	226
Figure 169 : Évolution par période des teneurs en arsenic (As), antimoine (Sb), et argent (Ag) d'artefacts supposément obtenus à partir de cuivre de Ross Island . La quantité de métal recyclé est supposée croissante au cours du temps depuis le MA1-2 (2500-2200 av. J.-C.) jusqu'au MA6 (1700-1500 av. J.-C.).	226
Figure 170 : Ellipsoïdes de confiance édités dans les années 90 soulignant la similarité des signatures isotopiques du plomb des minerais toscans, égéens et anatoliens. Source : Gale et Stos-Gale, 1991.....	231
Figure 171 : Similarités des rapports ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb de minerais et principaux massifs hercyniens d'Europe de l'Ouest (tracé des massifs d'après Gourcerol <i>et al.</i> , 2019 et Timón-Sánchez <i>et al.</i> , 2019).....	232
Figure 172 : Projection ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb vs ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb de signatures isotopiques du plomb de gisements alpin (données issues de Marcoux (1986) et de Nimis <i>et al.</i> (2012)) et de signatures acquises à Saint-Véran (données de Cattin (2008) et de Giunti (2011)) . Les signatures de Saint-Véran présentent une dispersion très importante. Source du graphique : Tomczyk <i>et al.</i> , 2021c.....	233
Figure 173 : Projections bivariées des rapports isotopiques du plomb des minerais de Cartagena.....	235
Figure 174 : Exemple de lignes d'observation de biais de fractionnement de masse (points bleus) pour les rapports (de gauche à droite) : ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb et ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb. Calcul réalisé dans le cadre d'analyses MC-ICPMS à l'IPGP : un standard est mesuré toutes les 3 analyses afin de s'assurer de l'absence de fractionnement de masse, les valeurs de NBS981 utilisées pour les corrections (point orange) sont celles publiées par Jochum <i>et al.</i> (2011).	237
Figure 175 : Localisation des analyses de la base Oxalid. Source : Tomczyk <i>et al.</i> , 2019.	239
Figure 176 : Schéma récapitulatif du nettoyage de la base de données. Si une analyse est effectuée sur une localité où il n'y a pas de minerais de cuivre ou de plomb sous forme au moins de paillettes,	245

Figure 177 : À gauche (cercles oranges) analyses isotopiques du plomb de minerais réalisées avant 2000 (n=3 316), à droite (cercles verts) analyses réalisées après 2000 (n=2 613).....	246
Figure 178 : Localisation des signatures isotopiques issues de travaux archéologiques (carte du haut, cercles bruns) et d'études géologiques (carte du bas, cercles bleus). Source : Tomczyk, 2022.....	248
Figure 179 : Gisements de cuivre (carte du haut) et de plomb (carte du bas) référencés dans la base de données et indices minéralisés en Europe (cartes en miniatures). Source de la carte : Tomczyk, 2022.....	249
Figure 180 : Régions cuprifères non caractérisées (aucune 4 peu d'analyses).....	250
Figure 181 : Régions cuprifères non ou peu caractérisées (hachures) et mines (cercles noirs).....	251
Figure 182 : Régions plombifères non ou peu caractérisées (hachures) et mines (cercles noirs).....	252
Figure 183 : Analyses isotopiques d'artefacts recensées incluant : les signatures de la base de données Oxalid (en vert clair, n= 3229), les analyses recensées (en vert foncé : n=4804).....	253
Figure 184 : Précision de la datation des artefacts par périodes précédemment définies.....	257
Figure 185 : Répartition des artefacts mals datés pour l'ensemble des périodes considérées.....	257
Figure 186 : Répartition des artefacts relativement bien datés pour l'ensemble des périodes considérées.....	258
Figure 187 : Répartition spatiale et par période des scories et minerais de plomb.....	259
Figure 188 : Répartition spatiale et par période des scories et minerais de cuivre.....	260
Figure 189 : Répartition spatiale et par période des artefacts cuivreux à fortes teneurs en plomb.....	263
Figure 190 : Composition des artefacts analysés par grandes périodes : les alliages de cuivre au plomb ne dépassent 15 % des artefacts analysés qu'à partir de 1500 av. J.-C. et 30 % à partir de 1300 av. J.-C.....	263
Figure 191 : Répartition spatiale et par période des artefacts cuivreux analysés.....	264
Figure 192 : Perles en plomb néolithiques du sud de la France.....	265
Figure 193 : Répartition spatiale et par période des artefacts en plomb analysés.....	266
Figure 194 : Répartition par catégories fonctionnelles des artefacts en plomb recensés.....	267
Figure 195 : Répartition par catégories fonctionnelles des artefacts cuivreux recensés.....	267
Figure 196 : À gauche, rapports isotopiques du plomb de gisements de cuivre de plusieurs îles des Cyclades (données issues de la base Oxalid) : les signatures s'individualisent par origine géographique même si certaines îles présentent des signatures très proches (notamment Seriphos et Anaphi mais aussi Syros et Tinos).....	269
Figure 197 : Mines (cercles) et ateliers (losanges) des grandes régions minières définies en partie 1.....	270
Figure 198 : Exemple de test de Grubbs réalisé sur le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de signatures de gisements bulgares. Deux valeurs aberrantes ont été identifiées suite à ce test : les analyses 11 et 38. Source : Tomczyk <i>et al.</i> , 2019.....	271
Figure 199 : Dendrogramme des signatures des minerais de Linares montrant clairement les quatre grandes classes dans lesquels se répartissent les signatures et les sept autres valeurs considérées comme aberrantes.....	272
Figure 200 : Projections 3D des regroupements créés par CAH sur les rapports historiquement utilisés en archéométrie (à gauche) et sur les rapports normalisés sur le ^{204}Pb (à droite). Le code couleur utilisé est le même que celui utilisé du dendrogramme (Figure 199). Les signatures s'isolant dans le dendrogramme sont représentées en rouge, orange et jaune.....	273
Figure 201 : Projection des signatures de minerais d'Iskar Vratsa (carrés) et des artefacts analysés (triangle).....	275
Figure 202 : Comparaison des signatures isotopiques du plomb des gisements scandinaves et de l'ensemble des artefacts de la base de données. L'observation du diagramme $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montre qu'aucune correspondance ne peut être mise en évidence : les artefacts analysés ne peuvent pas être issus de gisements du	

bouclier scandinave (la signature de ces gisements diffère fortement des autres gisements européens du fait de leur âge très ancien (Anders Nord et Billström, 2018)).....	276
Figure 203 : Projections des rapports isotopiques normalisés sur ^{204}Pb des gisements et des artefacts découverts dans le sud de la Croatie et le nord de la Bosnie.....	277
Figure 204 : Signatures isotopiques du plomb de minerais prises en compte par périodes ; référentiel pour le cuivre. Les régions cerclées en gris présentent des signatures hétérogènes, celles cerclées en noir présentent des signatures homogènes.	283
Figure 205 : Signatures isotopiques du plomb de minerais prises en compte par périodes ; référentiel pour le plomb. Les régions cerclées en gris présentent des signatures hétérogènes, celles cerclées en noir présentent des signatures homogènes.	285
Figure 206 : Haches à rebord médocaines, photographie prise dans les réserves du musée d'Aquitaine.	289
Figure 207 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins (données issues de la compilation réalisée dans le cadre de ce travail de thèse).	290
Figure 208 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins, des Alpes de l'Ouest, de Sardaigne, du sud de la péninsule Ibérique, du Pays de Galles et du Massif central ; données normalisées sur le ^{204}Pb	291
Figure 209 : Comparaison des signatures des haches médocaines analysées et des gisements cuprifères centre-alpins, des Alpes de l'Ouest, de Sardaigne, du sud de la péninsule Ibérique, du Pays de Galles et du Massif central ; données normalisées sur le ^{206}Pb	292
Figure 210 : Histogrammes de répartition des modèles-âges calculés à partir des signatures isotopiques des gisements compilées dans le cadre de cette thèse (n=7289).....	294
Figure 211 : Graphiques Quantile-Quantile de chaque rapport isotopique du plomb pour les districts miniers du Laurion (Grèce) et de Timna (Israël) et les gisements de Moutoula (île de Seriphos, Grèce) et Kostobe (Kazakhstan). Ces exemples ont été choisis, car ils sont caractérisés par un nombre important de signatures isotopiques (respectivement 116, 111, 73 et 45). Parmi ces 4 exemples, seules les signatures des rapports normalisés sur le ^{204}Pb du Laurion et le rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ du gisement de Moutoula présentent une distribution normale (les points s'alignent avec la bissectrice du plan).	295
Figure 212 : Distributions des densités de probabilité de signatures isotopiques du plomb de gisements chinois. Source Hsu <i>et al.</i> (2018).....	296
Figure 213 : Exemple de dendrogramme (obtenu après une CAH) cherchant à définir l'origine de scories de cuivre alpines : les gisements correspondant à des sources potentielles s'individualisent dans de grandes classes statistiques. Il est ici possible d'obtenir une prédiction de provenance à l'échelle d'une grande région géologique et parfois même d'une mine. Source du diagramme : Tomczyk <i>et al.</i> , 2021b.	298
Figure 214 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD réalisée sur 1944 signatures de minerais (Cu major et minor) en considérant les grandes régions minières comme groupes en entrée du modèle. Les points sont très regroupés et beaucoup de points de régions éloignées se chevauchent.	300
Figure 215 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD réalisée sur 222 signatures de minerais issues de 23 districts miniers sélectionnés au hasard. Le pourcentage de reclassement correct de l'ensemble des données prises en compte est de 66,67%. Ce pourcentage diminue avec l'ajout de nouvelles données et en particulier l'ajout de signatures de districts miniers aux signatures très hétérogènes (c'est notamment le cas de la mine de Ballycummisk dont les 8 signatures sont éparpillées dans ce diagramme).	302
Figure 216 : Projection des facteurs 1 et 2 de l'AFD des mêmes 1944 signatures de minerais que précédemment (Figure 215), mais en considérant cette fois les groupements de signatures des minerais créés par CAH en données d'entrée.	303

Figure 217 : Interface du logiciel XLSTAT pour la réalisation des AFD.....	305
Figure 218 : Exemple d'AFD prédisant l'appartenance d'artefacts (carrés) à une classe constituée de signatures de minerais (au centre du graphique). Certains artefacts prédits comme appartenant à la classe 7 (en bleu clair) se projettent en haut à droit du graphique. Leur provenance est douteuse, car ces points se projettent largement au-delà du barycentre de la classe 7 : leurs coordonnées factorielles sont beaucoup trop importantes.....	306
Figure 219 : Projection sur les deux premiers facteurs de l'AFD : toutes les signatures d'artefacts (carrés) ne se projettent pas clairement dans une classe constituée de signatures de minerais (cercles).	308
Figure 220 : Zoom sur les classes 4, 8 et 10 de la Figure 219.....	309
Figure 221 : Zoom sur les classes 1, 2 et 6 de la Figure 219.....	309
Figure 222 : Cercle de corrélation commenté (découpage de la sous-classe 2 du fichier 3000-2000 Cu).....	312
Figure 223 : Analyse en Composantes Principales (ACP) de lingots sardes avec pour données d'entrée les abondances naturelles de ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb et ^{204}Pb . Source : Tomczyk et Żabiński, 2023.....	313
Figure 224 : Précision de l'attribution des provenances des artefacts cuivreux par grandes périodes.	314
Figure 225 : Répartition des artefacts en cuivre (datés de 3800-3000 et 3000-2000 av. J.-C.) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).....	316
Figure 226 : Répartition des artefacts en cuivre (datées de l'âge du Bronze) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).....	316
Figure 227 : Précision de l'attribution des provenances des artefacts riches en plomb par grandes périodes.....	317
Figure 228 : Répartition des artefacts plombeux (datés de 3800-3000 et 3000-2000 av. J.-C.) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).....	318
Figure 229 : Répartition des artefacts plombeux (datés de l'âge du Bronze) pour lesquels une provenance fiable (« ok ») a pu être définie (en gris) et dont la provenance est indéterminée « x » (en noir).....	318
Figure 230 : Projection des signatures de minerais (carrés) des Alpes centrales considérées dans notre étude et des artefacts affectés à cette provenance (triangles) pour la période 2000-1600 av. J.-C.	319
Figure 231 : Projection des signatures de minerais (carrés) du Massif central des artefacts affectés à cette provenance de manière considérée fiable (« ok ») (petits triangles noirs) et douteuse (grands triangles gris) pour la période 2000-1600 av. J.-C.	320
Figure 232 : Sites où des lingots de type peau de bœuf ont été découverts. Données issues de Kaiser (2013), Liard (2010), Ling et Stos-Gale (2015) et Sabatini (2016a).	324
Figure 233 : Projection bivariée des rapports isotopiques du plomb $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des gisements chypriotes et de Timna et des lingots de type peau de bœuf.	325
Figure 234 : Similarité (« overlaps ») de signatures entre la zone minière de Cerro Minado (péninsule Ibérique) et une partie des minerais de Rhodope (Balkans). La provenance des nombreux artefacts se projetant dans la sous-classe « 3-3-3-1 » ne peut pas être tranchée.	326
Figure 235 : Provenances fiables identifiées. Les étoiles correspondent aux zones minières considérées, celles grisées indiquent les zones minières pour lesquelles aucune exportation n'a pu être identifiée.	327
Figure 236 : En haut : localisation des artefacts pour lesquels une provenance karstique est supposée, en bas : productions théoriques des mines d'Asturies.....	330
Figure 237 : Productions de cuivre supposées dans les Alpes centrales et de l'est et grands axes d'exportation identifiés entre 2000 et 800 av. J.-C.....	367
Figure 238 : Production de cuivre supposée du Pays de Galles et grands axes d'exportation	368

Figure 239 : Production de cuivre supposée en péninsule Ibérique et grands axes d'exportation	369
Figure 240 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) du IV ^e millénaire av. J.-C.	370
Figure 241 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour la période 3800-3000 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels (le cuivre est exporté depuis la zone de production vers (pointe de la flèche) la zone de consommation) sont représentés en rouge. Un axe bidirectionnel (du cuivre est à la fois exporté et importé) reliant l'Égée au sud des Balkans est représenté par une double flèche verte.	371
Figure 242 : Matériaux constituant les haches échangées sur de grandes distances au V ^e millénaire av. J.-C.. Source : Klassen <i>et al.</i> , 2017 p.945.....	372
Figure 243 : Tracé des routes de circulation possibles pour les outils massifs en cuivre à la fin du Ve et au début du IV ^e millénaire av. J.-C. La route la plus septentrionale est, selon les auteurs, la moins probable, contrairement à celle localisée au sud. Source : Klassen <i>et al.</i> , 2017.....	373
Figure 244 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) du III ^e millénaire av. J.-C.....	375
Figure 245 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour le.....	376
Figure 246 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 2000-1600 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.	379
Figure 247 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour la période.....	380
Figure 248 : Distribution spatiale du cuivre dit de groupe 2 (As > 0.1 %, Sb, Ni, et Ag < 0.1%)	382
Figure 249 : Distribution spatiale du cuivre du groupe 16 (As, Sb, Ni, et Ag > 0.1 %) au début du II ^e millénaire av. J.-C. Source : Pollard, 2018 p.103 (à partir de la base de données FLAME (Perucchetti <i>et al.</i> , 2021)).	383
Figure 250 : Répartition des découvertes d'ambre européen de l'âge du Bronze ancien (ici 2200-1600 av. J.-C.) d'après Meller (2017) et synthèse des axes d'échange du cuivre précédemment supposés.....	384
Figure 251 : Carte du haut : régions minières où des objets en ambre de la Baltique ont été découverts ; carte du bas : Routes de commerce par lesquelles transiteraient du cuivre et de l'ambre. Source : Ling <i>et al.</i> , 2013.	385
Figure 252 : Types d'artefacts contenant du cuivre chypriote, d'Abu Matar ou de Timna découverts à plus de 2000 km du lieu d'extraction du cuivre (soit en Angleterre, France, Portugal, Espagne, Allemagne, République tchèque, Autriche, Suisse, Suède et au Danemark).	386
Figure 253 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 1600-1300 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.	388
Figure 254 : Carte interprétée des principaux axes d'échange précédemment définis pour la période.....	389
Figure 255 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 1600-1300 av. J.-C. Les flèches représentent les principaux axes d'échange au départ des régions minières.	390
Figure 256 : Hypothèses d'échanges triangulaires : carte de gauche par Ling <i>et al.</i> , 2019 ;.....	391
Figure 257 : Localisation des artefacts présentant une signature compatible avec les gisements du Levant	392
Figure 258 : Répartition des découvertes d'ambre européen de l'âge du Bronze moyen d'après Meller (2017).	392
Figure 259 : Artefacts pour lesquels une provenance a pu ou non être supposée et grands complexes culturels de l'âge du Bronze tel que défini par Patrice Brun	393
Figure 260 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 1300-800 av. J.-C.	394
Figure 261 : Carte interprétée des principaux axes d'échange du cuivre précédemment définis pour la période 1300-800 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge.....	396
Figure 262 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 1300-800 av. J.-C.	397

Figure 263 : Carte interprétée des principaux axes d'échange du plomb précédemment définis pour la période 1300-800 av. J.-C. Les axes d'exports unidirectionnels sont représentés en rouge.....	398
Figure 264 : Grandes zones minières exportatrices de cuivre (étoiles) pendant la période 800-450 av. J.-C.	399
Figure 265 : Grandes zones minières exportatrices de plomb (étoiles) pendant la période 800-450 av. J.-C.	400
Figure 266 : Fiabilité des provenances par catégories fonctionnelles des artefacts en cuivre (1300-800 av. J.-C.)	401
Figure 267 : Destination supposée des productions plombifères (flèches) et grandes zones de production stannifères entre 1300 et 800 av. J.-C. Le fait que les axes par lesquels transitent les productions de plomb ne se prolongent pas dans les secteurs produisant de l'étain est clairement à relier à l'absence d'analyses isotopiques d'artefacts dans ces régions.....	402
Figure 268 : Pourcentage de correspondances entre les signatures des minerais et des artefacts ayant pu être clairement définies (« ok », en vert) et n'ayant pas été définies (« x », en gris) par catégories d'artefacts et par tranche d'âge.	403
Figure 269 : Distance de la source supposée du cuivre pour les artefacts dont une provenance a pu être supposée (« ok ») par catégorie d'artefact pour la période 2000-1600 av. J.-C.....	404
Figure 270 : Distance de la source supposée du cuivre pour les artefacts dont une provenance a pu être supposée (« ok ») par catégorie d'artefact pour la période 1300-800 av. J.-C.....	404
Figure 271 : Prestige de plusieurs catégories d'artefacts. Modifié d'après (Kuijpers, 2012). À partir de 2000 av. J.-C., les armes ne sont découvertes que dans les tombes d'un certain prestige (Kuijpers, 2012 ; Schwarz, 2014 ; Knoll et Meller, 2016).....	404
Figure 272 : Répartition spatiale des différentes catégories d'artefacts contenant du cuivre probablement extrait à plus de 1000 km de leur zone de découverte pour la période 2000-1600 av. J.-C. La carte de droite montre une répartition inégale des haches, lingots et bijoux alors que la carte de gauche permet de constater que des armes et des outils façonnés à partir de cuivre lointain sont plus uniformément répartis.....	405
Figure 273 : Nombre d'artefacts par grands types de fonctions et par provenance supposée (le Massif central, le Levant, Chypre et la péninsule Ibérique) découverts à plus de 1000 km de leur source théorique.....	406
Figure 274 : Répartition spatiale des différentes catégories d'artefacts contenant du cuivre ayant supposément été extrait à plus de 1000 km de leur zone de découverte pour la période 1300-800 av. J.-C.	406
Figure 275 : Nombre d'artefacts par grands types de fonctions et par provenance supposée pour la période 1300-800 av. J.-C. Le cuivre les constituant est supposé avoir été extrait à plus de 1000 km du lieu de leur découverte. Nous ne présentons ici que les provenances auxquelles le plus d'artefacts ont été rattachés.....	407
Figure 276 : Fréquences cumulées des distances à vol d'oiseau séparant différentes grandes régions minières et les lieux de découverte d'artefacts contenant du cuivre probablement issu de ces régions minières (provenances « ok ») pour la période 1600-800 av. J.- C.....	409
Figure 277 : Courbes de densités des distances d'export du cuivre par grande région minière pour la période 1300-800 av. J.-C. Les courbes ont été tracées à partir des distances précédemment calculées à l'aide d'une matrice de distances.....	412
Figure 278 : Axes d'échange et grandes zones de production de cuivre, étain, or, plomb et (plomb)argent connus pour la période 1300-800 av. J.-C. et axes d'exportation de cuivre supposés (flèches rouges et vertes) à partir des principales zones minières (étoiles rouges).....	417
Figure 279 : Grandes régions de production de métaux, grandes régions d'échange préférentiel du cuivre et axes interrégionaux supposés pour la période 1300-800 av. J.-C.....	419

Figure 280 : Limites d'une « Hyper-région » afro-eurasiatique qui s'étendait de l'ouest du Pacifique aux côtes atlantiques à l'âge du Bronze. Source : Vandkilde, 2019.....	422
Figure 281 : Localisation des trois zones de découverte des artefacts analysés ainsi que des grandes régions de production et d'échange définies pour la fin de l'âge du Bronze.	423
Figure 282 : Relevés LiDAR et analyse géochimique (pXRF) de sols à l'échelle d'une vallée (travaux menés dans le cadre du PCR Le Minier, Aveyron). Les teneurs de surface en plomb (chaque point blanc correspond à un dosage pXRF) ont révélé l'existence de haldes aujourd'hui recouvertes, de tranchées minières (en rouge) et d'un atelier de minéralurgie où les minerais étaient concassés.	431

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des différents types de gisements de cuivre primaires, d'après Arndt et Ganino (2009).	12
Tableau 2 : Principaux minéraux de cuivre associés aux différents contextes d'altération supergène.....	18
Tableau 3 : Comparaison des processus métallurgiques pour d'obtenir un objet en cuivre arsénié ou en bronze.	24
Tableau 4 : Poids des maillets et piochons de quelques mines de cuivre préhistoriques européennes.	37
Tableau 5 : Résumé des processus métallurgiques utilisés à la Protohistoire. Tableau : Céline Tomczyk.	47
Tableau 6 : Distinction des assemblages des sites de métallurgie extractive et d'élaboration des métaux non ferreux. Traduit de Hoffmann et Miller, 2014.....	52
Tableau 7 : Pourcentage des mines découvertes en Europe de l'Ouest datées par radiocarbone.	72
Tableau 8 : Nombre de mines d'Europe de l'Ouest dont la datation antérieure à l'âge du Fer n'est supposée que par la présence de maillets en pierre.	72
Tableau 9 : Classement des mines recensées selon la quantité et la fiabilité des informations récoltées.	75
Tableau 10 : Classement des ateliers de métallurgie extractive recensés selon la quantité et la fiabilité des informations récoltées.	75
Tableau 11 : Performance des moyens de transports terrestres à la Protohistoire. Traduit de Brodie, 2008.....	104
Tableau 12 : Découpage chronologique basé sur l'étude des zones minières précédemment menée.	115
Tableau 13 : Métaux exploités dans les grandes zones de production entre 1300 et 800 av. J.-C.	117
Tableau 14 : Techniques et outils miniers à mobiliser selon le type d'exploitation.....	125
Tableau 15 : Répartition des mines par forme d'exploitation.	126
Tableau 16 : Nombre de mines par dureté d'encaissant.....	127
Tableau 17 : Exemples de teneurs mesurées dans des galènes et jarosites possiblement exploitées.	130
Tableau 18 : Mines d'étain, d'or et de plomb-argent dont des tonnages extraits ont été calculés.....	142
Tableau 19 : Mines de cuivre dont des tonnages extraits ont été calculés.....	142
Tableau 20 : Ateliers de métallurgie extractive du cuivre dont des tonnages extraits ont été calculés.	143
Tableau 21 : Densités prises en compte pour les principaux minéraux de cuivre (la densité prise en compte correspond à l'ensemble de l'assemblage décrit dans les proportions publiées).....	146
Tableau 22 : Exemple de comparaison des productions de cuivre estimées et précédemment publiées. L'estimation de la production de l'Irlande reste très hypothétique du fait de la difficulté à trouver des informations de volume sur la mine de Ross Island, pour la mine d'El Aramo la seule donnée indiquée est le volume de vides mesuré (4 670 m ³).....	148
Tableau 23 : Résultats d'expérimentations d'abattage par le feu réalisées en extérieur.	167
Tableau 24 : Résultats d'expérimentations d'abattage par le feu réalisées en souterrain.	167
Tableau 25 : Mois de travail maximum par an calculés pour les mines abattues par le feu bien documentées. Les données en rouge et orange sont des informations peu précises.	169
Tableau 26 : Résumé des éléments pris en compte pour chaque catégorie et fiabilité des observations.....	174
Tableau 27 : Courte description des deux épisodes de minéralisation à l'origine des deux types de gisements dont les minerais ont été retrouvés sur le site du Planet (d'après Milesi, 1982 et nos observations de terrain).	222

Tableau 28 : Liste non exhaustive de recyclages d'artefact cuivreux avérés au Bronze final. Ces recyclages concernent en majorité la totalité des artefacts (impliquant une refonte pour obtenir un nouvel objet) mais les deux derniers ne sont cependant que partiels (impliquant le travail « à chaud », ou mécanique, d'un artefact pour le réparer ou en créer un nouveau).	228
Tableau 29 : Éléments à prendre en compte avant de réaliser une analyse isotopique du plomb.	237
Tableau 30 : Exemple de doublon présentant des rapports isotopiques différents :	242
Tableau 31 : Nombre d'entrées de la base de données pour le cuivre et le plomb en fonction de la richesse du gisement analysé. Un gisement peut être à la fois riche en cuivre et en plomb (c'est le cas pour 60 % des analyses) ou ne contenir qu'une seule de ces deux substances.	244
Tableau 32 : Exemple de doublon marqué par de légères différences de rapports isotopiques.	254
Tableau 33 : Exemple de doublon présentant une différence de site de découverte.	254
Tableau 34 : Extrait du tableau de correspondance utilisé pour traduire certaines datations relatives en datations absolues lorsqu'aucune date n'était indiquée dans la publication source.....	256
Tableau 35 : Exemple de datations très imprécises concernant un même site	256
Tableau 36 : Nombre total de signatures recensées par métal constituant les artefacts.	268
Tableau 37 : Coefficients de corrélation de Pearson pour l'ensemble de la base de données de signatures de gisements. La valeur la plus proche de l'indépendance à $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	288
Tableau 38 : Résultat d'analyse de 7 haches médocaines ; la hache d'Ygos présente la particularité d'avoir été percée par un clou en fer (Roussot-Larroque et Queffelec, 2014).	289
Tableau 39 : Correspondances présentant les meilleures corrélations avec la hache médocaine portant l'identifiant 2009.1.60 d'après l'application AMALIA (Rodríguez <i>et al.</i> , 2023).	297
Tableau 40 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée sur 1944 signatures isotopiques de minerais issues de 12 grandes régions d'Europe. Simplification des noms de régions : O. Alpes = Ouest des Alpes, Aram = Asturies (grande mine d'El Aramo ; NO de la péninsule Ibérique), Carp = Carpates, Chyp = Chypre, GB = Pays de Galles, Ir = Irlande, MCentral = Massif central, Sard = Sardaigne, PIbé = péninsule Ibérique.	301
Tableau 41 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée sur les mêmes 1944 signatures isotopiques de minerais que précédemment, mais avec des groupes définis par CAH.	304
Tableau 42 : Exemples de rapports isotopiques d'artefacts présentant des projections aberrantes.	306
Tableau 43 : Matrice de confusion des 11 sous-classes définies par la CAH	307
Tableau 44 : Coefficients de corrélation de Pearson correspondants au cercle de corrélation en Figure 222.....	312
Tableau 45 : Provenance des scories de réduction de cuivre : pour 15 à 61 % des scories analysées une provenance « ok » a été supposée, les déterminations correctes parmi ces provenances supposément fiables varient : toutes les provenances sont correctes pour la période 1600-1300 av. J.-C. (100% de provenances locales) mais seules 25% des scories ont été attribuées à leur région de production pour la période 800-400.....	321
Tableau 46 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre de provenance « lointaines » dont la provenance est supposée fiable (« ok ») : peu d'attributions sont correctes du fait de l'absence de caractérisation des gisements.	321
Tableau 47 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes au Proche-Orient dont la provenance est supposée fiable (« ok »).	322
Tableau 48 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes en Europe dont la provenance est supposée fiable (« ok »).	322

Tableau 49 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes en Europe dont la provenance a été déterminée comme douteuse (« gris »).	323
Tableau 50 : Attribution de provenance des scories de réduction de cuivre découvertes dans différentes régions d'Europe dont la provenance a été déterminée comme fiable (« ok »). Les scories considérées prennent en compte l'ensemble des périodes à partir de 3800 av. J.-C.	323
Tableau 51 : Pourcentage de provenances chypriotes pour les lingots de type peau de bœuf dont la provenance a été déterminée comme fiable (« ok »).	324
Tableau 52 : Précision des attributions supposées pour les lingots peau de bœuf.	325
Tableau 53 : Nombre d'artefacts présentant des signatures isotopiques du plomb indiquant que le cuivre qui les compose a été formé récemment.	329
Tableau 54 : Datation des trois grandes mines asturiennes implantées dans des cavités karstiques.	329
Tableau 55 : Récapitulatif des similarités des provenances prédites.	330
Tableau 56 : Critères pris en compte pour la détermination de la provenance la plus probable dans le cas où plusieurs sources possibles ne peuvent pas être différenciées statistiquement.	332
Tableau 57 : Pourcentage d'artefacts pour lesquels une provenance apparaît nettement plus pertinente suite à la prise en compte de critères permettant de trancher entre deux provenances possibles.	333
Tableau 58 : Périodes de croissance et de décroissances par pas de 50 ans et par grandes régions d'Eurasie. Source : Beaujard (2010).	421
Tableau 59 : Mélanges de sources estimés en utilisant un modèle bayésien (précision globale du modèle : 0,69) appliqué aux signatures d'artefacts découverts à proximités de fleuves en façade atlantique.	425

Résumé de la thèse

Définir la provenance d'un objet est une question centrale dans l'étude des interactions entre les sociétés humaines du passé. Il est toutefois très complexe de tracer des échanges à l'échelle de l'Europe en particulier à l'âge du Bronze.

Nous argumentons que la détermination de provenance d'objets métalliques doit être appuyée par une meilleure connaissance des zones de production minière et de leurs minéralisations. Peu de données étant disponibles pour les productions d'étain, de plomb-argent et d'or, notre étude porte principalement sur le cuivre. Nous avons mis en évidence un changement dans la localisation des mines entre la fin du Néolithique et la fin de l'âge du Bronze : les mines de cuivre, initialement présentes dans de nombreuses régions, ont progressivement disparu pour ne laisser subsister que quelques grandes zones de production vers 1600 av. J.-C ; les îles Britanniques, la péninsule Ibérique, les Alpes (centrales et de l'est), Chypre et le Levant (dans une zone s'étendant des côtes israéliennes au désert oriental). Une estimation de la quantité de cuivre extrait de ces zones minières montre que leur production n'est pas égale et que certaines d'entre elles produiraient en quantité beaucoup plus importante.

Bien que les techniques minières et métallurgiques employées aient varié selon les contextes géologiques, elles ont été globalement toutes maîtrisées en Europe. L'absence d'exploitation minière dans certaines régions ne peut donc pas être attribuée à un manque de compétences techniques, mais plutôt à des facteurs économiques que nous nous proposons d'étudier en traçant les chemins empruntés par les productions métalliques au fil du temps.

Les réseaux d'échanges par lesquels transitaient le cuivre et le plomb produits ont été étudiés à l'aide de l'isotopie du plomb. Nous avons comparé des milliers de signatures d'artefacts aux signatures des zones de production précédemment identifiées. Certaines régions manquent encore cruellement d'analyses géochimiques pour caractériser leurs minéralisations et d'autres présentent des signatures très hétérogènes. Cette dispersion des signatures complique la détermination des provenances en raison de correspondances possibles avec d'autres régions. Pour surmonter ces difficultés, les bases de données des signatures isotopiques de minerais et d'artefacts ont été soumises à des analyses statistiques multivariées.

Nous avons tracé des cartes montrant les exportations de minerais par grandes périodes. Il en ressort que la majorité des grands axes d'exportation de l'âge du Bronze seraient hérités du III^e millénaire av. J.-C. Il y aurait donc peu de changements dans les réseaux de commerce du métal, et seules de grandes crises à la fois économiques, sociales, politiques et environnementales entraîneraient des modifications des réseaux d'échanges.

La question du développement de certaines exploitations, en particulier de l'étain à la défaveur des exploitations de cuivre, peut alors être discutée. Nous formulons l'hypothèse que de nouvelles ressources seraient produites du fait de la pérennisation des axes d'échanges, permettant aux populations de se spécialiser dans de nouvelles activités tout en important les ressources nécessaires à leur développement, en particulier le cuivre.