



UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE

École Doctorale de Géographie de Paris

LGP, UMR 8591 CNRS



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE
Discipline : Géographie

Mathias BOUN HENG

LA SÉDIMENTATION DANS LES LACS DE BARRAGE À JAVA, INDONÉSIE PROCESSUS, RYTHMES ET IMPACTS.

Sous la direction de Franck LAVIGNE et Charles LE COEUR



Thèse soutenue publiquement le
22 mars 2013

JURY:

Franck LAVIGNE, Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Charles LE COEUR, Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Gilles ARNAUD-FASSETTA, Professeur Université Paris-Diderot
Pierre-Gil SALVADOR, Professeur Université Lille 1
Michel MIETTON, Professeur Université Lyon 3
Michel LARUE, Ingénieur de recherche IRD

Directeur
Co-Directeur
Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur



UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE

École Doctorale de Géographie de Paris

LGP, UMR 8591 CNRS



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE

Discipline : Géographie

Mathias BOUN HENG

LA SÉDIMENTATION DANS LES LACS DE BARRAGE À JAVA, INDONÉSIE PROCESSUS, RYTHMES ET IMPACTS.

Sous la direction de Franck LAVIGNE et Charles LE COEUR



Thèse soutenue publiquement le
22 mars 2013

JURY:

Franck LAVIGNE, Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Charles LE COEUR, Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Gilles ARNAUD-FASSETTA, Professeur Université Paris-Diderot
Pierre-Gil SALVADOR, Professeur Université Lille 1
Michel MIETTON, Professeur Université Lyon 3
Michel LARUE, Ingénieur de recherche IRD

Directeur
Co-Directeur
Président du jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur

SOMMAIRE

Sommaire	1
Résumé.....	4
Avant-propos.....	5
Remerciements	6

Introduction.....	7
--------------------------	----------

Chapitre premier : La sédimentation dans les lacs de barrage - état de la question

I. État de l'art de la littérature sur la sédimentation des réservoirs de barrage	13
A. Pour une meilleure connaissance de la sédimentation dans les réservoirs de barrage	13
B. Pour une meilleure évaluation des rythmes de sédimentation.....	22
II. Des taux et des rythmes de sédimentation hétérogènes à l'échelle mondiale	35
A. Présentation des résultats bibliographiques	35
B. Analyse des données de sédimentation pour les barrages étudiés.....	39
III. Les facteurs de la sédimentation dans les réservoirs de barrage	43
A. Les facteurs physiques	43
B. Les facteurs anthropiques.....	48
IV. Un enjeu pour une gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin.....	52
A. Les bailleurs de fonds - financeurs des grands barrages mondiaux.....	53
B. La gestion intégrée des ressources en eau	56

Chapitre 2 : Présentation du cadre d'étude : les principaux bassins fluviaux de java.....

I. Un cadre favorable à la production sédimentaire	67
A. Une topographie escarpée en amont s'ouvrant sur de vastes plaines alluviales	67
B. Un cadre géologique marqué par le volcanisme et des sols contrastés	69
C. Un climat tropical qui favorise l'ablation des matériaux	74
II. Des enjeux élevés.....	81
A. Une pression démographique de plus en plus forte.....	81
B. Des besoins agricoles croissants qui entraînent une mutation de l'occupation des sols	85
C. L'industrialisation galopante et ses conséquences hydriques	90
III. La construction des barrages pour répondre aux besoins javanais face à la gestion de l'eau	92
A. Barrages du bassin du Citarum	92
B. Barrages du bassin du Solo et du Serayu	95
C. Barrages du bassin du Brantas	98

Chapitre 3 : Acquisition des données et présentation de la méthodologie101

I. Acquisition des données.....	101
A. Acquisition des données sédimentaires : état des données.....	101
B. Acquisition des données sur les facteurs de la sédimentation.....	117
II. Traitement des données et création des outils.....	127
A. Création et présentation de la base de données (BDD).....	127
B. Utilisation des images satellitaires pour une étude diachronique de l'occupation des sols.....	137
C. Création et présentation du système d'information géographique (SIG).....	142
III. Une approche naturaliste.....	149
A. Un suivi de la morphologie des cours d'eau.....	149
B. Une étude de la condition des versants.....	150
IV. Rencontres et entretiens avec les acteurs.....	151

Chapitre 4 : Analyse de l'évolution de la sédimentation dans les lacs de barrage155

I. La sédimentation des réservoirs de barrage – bilan pluri-décennal.....	155
A. Des taux de sédimentation variables.....	157
B. La perte moyenne annuelle de la capacité des réservoirs.....	159
C. Capacité brute restante des réservoirs.....	161
II. Rythmes de sédimentation à l'échelle pluri-annuelle.....	162
A. Étude des rythmes de sédimentation.....	162
B. Analyse des rythmes de sédimentation.....	172
C. Analogies et divergences de la sédimentation des réservoirs javanais.....	175

Chapitre 5 : Les facteurs d'évolution de la sédimentation181

I. Les facteurs naturels.....	181
A. Les précipitations, un agent érosif puissant sur les terres volcaniques de Java.....	181
B. Une forte érosion des sols.....	190
C. Le transport des sédiments fluviatiles.....	198
II. Les facteurs anthropiques.....	210
A. Un défrichement rapide et non maîtrisé des hautes terres.....	210
B. Les activités humaines impactant la sédimentation des réservoirs.....	220

Chapitre 6 : La gestion des grands bassins hydrologiques javanais en question231

I. De nombreux acteurs impliqués.....	231
A. Les organismes internationaux.....	231
B. Les organismes gouvernementaux.....	235
C. Les entreprises publiques.....	237
D. Les centres de recherche.....	238
II. L'organisation nationale du territoire, source de nombreuses problématiques.....	239
A. La gestion de la ressource en eau en Indonésie.....	239
B. La gestion des bassins javanais face à la décentralisation.....	244
III. La mise en eau des réservoirs à la source d'une perturbation des zones amonts.....	247
A. L'étude du déplacement forcé des populations.....	247
B. L'impact du déplacement des populations sur les taux de sédimentation.....	250

Conclusion	252
Références bibliographiques	257
Table des figures.....	272
Table des tableaux.....	276
Liste des sigles	277
Annexes.....	279
Table des matières.....	294

RÉSUMÉ

Java, l'île principale de l'archipel indonésien a vu la construction, depuis les années 60, de nombreux grands barrages. Leurs rôles sont multiples, passant du contrôle des flux liquides (écrêtage des crues et soutien des étiages) à l'approvisionnement en eau des grandes agglomérations urbaines et des terres agricoles. Ils jouent également le rôle important de fournisseur d'énergie. Depuis leur mise en eau, on assiste à un comblement rapide des réservoirs lié à des taux d'érosion qui figurent parmi les plus élevés au monde. La diminution importante de leur efficacité entraîne par conséquent de nombreuses répercussions néfastes sur le milieu et les sociétés. Les objectifs de cette recherche sont ainsi de déterminer, avec des approches multiples (SIG, télédétection, base de données hydro climatiques, sondages lacustres...), les taux et les rythmes de remplissage de ces réservoirs, agissant comme indicateurs de l'érosion dans leur bassins-versants respectifs. Il s'agira de mettre en évidence les facteurs principaux influant sur cette forte sédimentation et de mettre en place des outils permettant de venir en aide aux organismes chargés de la gestion des bassins-versants javanais.

Mots clés : sédimentation, barrages, déforestation, Java, Indonésie.

Since the Sixties, a large number of dams have been built in the Indonesian archipelago's main island, Java. Their roles are multiple, going from liquid flows control (flood - peak shaving and low flow support) to water supply of great urban areas and agricultural lands. They also are an important energy supplier. After their watering, a fast filling of the tanks related to rates of erosion that appear among the highest in the world, has been observed. This significant efficiency decrease involves multiple negative impacts on environment and utilities. Through a multiple approach (GIS, remote sensing, hydroclimatic databases, lake surveys...), the objectives of this research are to determine the sedimentary transfer rates and pace within the studied basins, which act as erosion indicators in their respective basins. The key determinants affecting this high sedimentation will be highlighted and a software will be developed with the aim to provide Javanese river basins authorities with new tools.

Key words: sedimentation, dams, deforestation, Java, Indonesia.

AVANT-PROPOS

Mon premier séjour en Indonésie concernait déjà l'étude de la sédimentation dans les réservoirs de Java pour mes recherches de mémoire en master.

Cette thèse lui répond aujourd'hui avec une recherche qui dépasse les frontières du bassin de la Konto à Java-Est et dont les paysages sont encore gravés en moi comme synonyme de mes premiers questionnements sur cette thématique. Désormais, c'est Java toute entière qui s'est offerte comme terrain de recherche afin d'interroger mes conclusions de jeune chercheur de l'époque et surtout de les confronter à des territoires toujours plus vastes et plus peuplés.

Les barrages m'ont toujours fasciné du fait que l'Homme tente par la construction de ces ouvrages de dompter la Nature et, plus encore, d'en contrôler ce sang d'eau douce irriguant alors tout son corps minéral.

Les barrages sont aussi des créateurs de liens très forts poussant les hommes et les femmes vivant en amont et en aval à se retrouver, afin de cohabiter vertueusement et de profiter des avantages qu'offre une certaine maîtrise de ces flux liquides dans un environnement aussi capricieux que l'Indonésie. Capricieuse, l'île de Java l'est à coup sûr. N'est-ce pas elle qui m'a réveillé un matin en faisant trembler les murs ? N'est-ce pas elle que j'ai vu se manifester en abatant des pluies diluviennes jusqu'à ce que plus une seule rue du quartier ne soit inondée ? N'est-ce pas elle qui a enseveli Kinahredjo sous les cendres ? Ce petit village perché sur le Merapi que j'aimais tant. Les missions effectuées à Java m'ont façonné en tant que chercheur, mais aussi en tant qu'homme.

J'espère, par ces recherches, rendre une petite partie de tout ce que cette île a pu m'apporter.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adresse tout d'abord à Franck Lavigne qui pendant ces longues années a continué à croire en moi, même lorsque moi-même je n'y croyais plus vraiment. Aujourd'hui je prends enfin pleinement conscience qu'une recherche ne se fait pas seul, il était temps ! Merci pour tous ces conseils et remarques qui ont contribué à rendre ce travail possible. Je tiens aussi à remercier Charles Le Cœur avec qui cette aventure a commencé lors d'un stage de terrain en Auvergne sans savoir, à ce moment-là, que le prochain serait en Indonésie. Merci pour votre soutien et d'avoir su guider ma réflexion.

Merci au Laboratoire de Géographie Physique de Meudon où j'ai fait mes premiers pas de chercheur et qui n'a cessé de m'accompagner depuis le début de mon master.

Merci à tous mes collègues de l'UPEC avec qui j'ai continué à enseigner et partager le fruit de mes recherches.

Un terrain à l'étranger offre aussi de belles rencontres, tant personnelles que professionnelles. Ce travail n'aurait non plus été possible sans l'aide précieuse de : Pak Basuki, Pak Tjoek, Pak Djendam Gurusinga, Pak Herman Idrus, Pak Raharjanto, Pak Surono, Michel Larue et toutes les institutions qui m'ont reçu lors de mes différentes missions. Merci à vous pour votre aide précieuse qui m'a apporté une meilleure compréhension des problématiques javanaises.

Et enfin, mes dernières pensées et remerciements vont à ma famille et à mes proches.

Mes parents, mes frères et mes cousins qui avez toujours été à mes côtés,

Justine pour ta présence au quotidien et aux projets futurs qui nous attendent,

Pauline pour avoir partagé une partie de cette page de vie,

Delphine G., Julie M. et Émilie pour vos ultimes relectures,

À Tamara, Julie G., Delphine F., Audrey, Éric et Linda, Marco et Enrique, Florian V. et Ruth, Christophe, Damien, Vivien, David, Benjamin, Caroline, François, Damien et Catherine, Philippe, Marie, Florian G., pour les souvenirs mêlés d'odeurs de clous de girofle.

À tous mes amis qui m'ont encouragé durant toutes ces années en se demandant parfois quand j'allais finir cette thèse.

Ce jour là est enfin arrivé !

INTRODUCTION

Concepts et enjeux

La gestion de la ressource en eau est l'un des grands enjeux de ce début de siècle puisque « l'or bleu » représente une ressource vitale dont la gestion se place au cœur des préoccupations contemporaines. L'étude des barrages et de leurs réservoirs est ainsi un rouage essentiel à l'apport de réponses à cette problématique, elle-même accentuée par une croissance démographique et un développement économique fort à l'échelle mondiale. En effet, les barrages représentent des obstacles artificiels s'opposant à l'écoulement naturel de l'eau et sont ainsi construits afin de répondre à une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- créer des réserves d'eau pour l'irrigation, la production d'énergie hydroélectrique, l'alimentation en eau domestique ou industrielle, la maîtrise des crues, l'alimentation des canaux de navigation, etc. ;
- relever des plans d'eau afin de créer des hauteurs de chute utilisables par des usines hydroélectriques de pied de barrage ou afin de dériver des rivières vers des canaux, des galeries ou des conduites ;
- créer des plans d'eau pour la navigation, les loisirs, etc. ;
- empêcher des remontées d'eaux marines afin de protéger des terres contre les grandes marées, maintenir des réserves d'eau douce, créer des polders, etc.

À travers les multiples fonctions présentées ci-dessus, nous comprenons mieux que la protection des barrages présente d'importants intérêts d'ordre aussi bien politiques, qu'économiques mais aussi environnementaux.

Bien que la construction de ces barrages remonte à l'antiquité, c'est réellement à partir des années 50 que de nombreux gouvernements ou, dans certains pays, des entreprises du secteur privé ont construit un nombre conséquent de grands barrages¹ dans leurs formes modernes (Fig.1). Ceux de l'île de Java feront ainsi l'objet de cette recherche.

¹ Est considéré comme grand barrage un édifice d'une hauteur de 15 mètres ou plus (à partir de la fondation). Ceux d'une hauteur de 5 à 15 mètres et ayant un réservoir d'un volume supérieur à 3 millions de m³ sont également classés dans les grands barrages. (*International Commission Of Large Dams - ICOLD*)

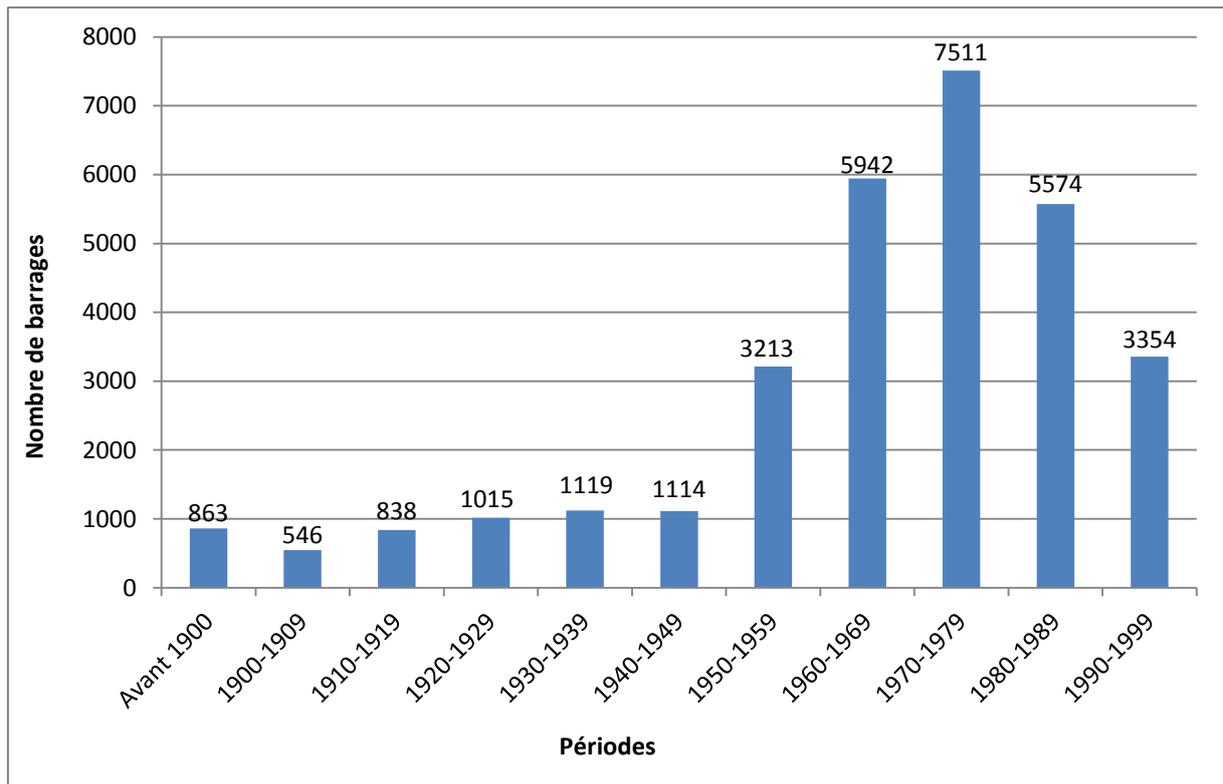


Figure 1 : Mise en service des barrages par décennie dans le monde (source : ICOLD)

À l'heure actuelle, pas moins de 50 000 grands barrages ont été construits pour satisfaire les besoins en eau et en énergie pour une capacité de stockage d'environ 7 000 km³ (Varma., 2002). Près de la moitié des fleuves dans le monde comptent au moins un grand barrage. Actuellement, pour un tiers des pays au monde plus de 50% de la consommation électrique proviennent de l'hydroélectricité, et les grands barrages produisent 19% de l'électricité mondiale. La moitié des grands barrages construits l'a été exclusivement ou principalement pour l'irrigation, et 30 à 40% des 271 millions d'hectares irrigués dans le monde le sont grâce à ces ouvrages (ICOLD) (Fig.2).

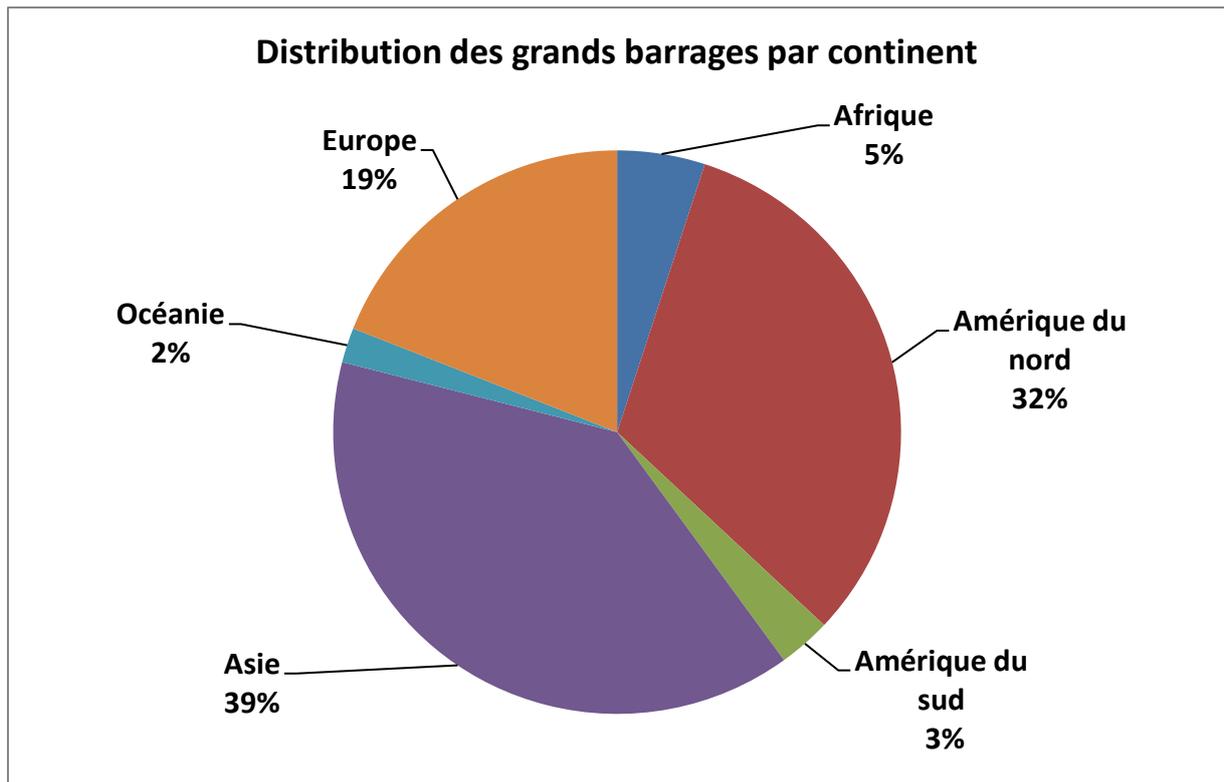


Figure 2 : Distribution des grands barrages par continent en 2010 (ICOLD)

Ces édifices segmentent le bassin-versant dans lequel ils s’inscrivent en deux parties distinctes ; une partie amont qui détermine le fonctionnement du barrage et une partie aval qui est soumise à l’influence directe de ce dernier. Cette recherche s’intéressera aux conditions amont qui vont directement influencer la gestion du barrage, principalement par le transport de matière solide dans les cours d’eau. Cette charge solide est le fait de la dégradation des sols, qu’elle soit d’origine naturelle ou accélérée par l’homme. Ces éléments solides arrivent alors dans le réservoir, s’y déposent et réduisent ainsi de manière sensible la capacité de stockage de ce dernier.

À terme, tout réservoir est destiné à être comblé par des sédiments (Linsley et al., 1992), constat posant alors la question de la durée de ces processus contribuant aux comblements de ces réservoirs. Cette accumulation de sédiments dans les réservoirs risque ainsi de fortement porter préjudice aux politiques de gestion des ressources en eau, en particulier dans un contexte où la demande en eau est chaque jour plus forte.

Les chiffres qui suivent résument à eux seuls l'intérêt qu'il faut porter au devenir de ces ouvrages. Les meilleures estimations suggèrent que 20×10^9 t.an⁻¹ de sédiments sont charriés vers les océans (Walling and Webb, 1996) et qu'environ 25% de la charge solide des cours d'eau est bloquée par les barrages (Vorosmarty et al., 1997) soit 5×10^9 t.an⁻¹. On estime que plus de 40% du débit fluvial dans le monde est actuellement réduit par de grands barrages et que 0,5 à 1% du volume mondial de stockage des réservoirs de barrage est annuellement perdu (White, 2005).

Un réservoir de barrage fait donc intégralement partie du système de gestion de la ressource en eau du bassin dans lequel il est installé. C'est pourquoi l'évaluation et le suivi périodique des dépôts sédimentaires et des capacités de stockage disponibles apparaissent comme des aspects incontournables de la gestion intégrée d'un bassin-versant.

Cadre général de la recherche

Le choix de l'Indonésie, et de l'île de Java en particulier, comme terrain de recherche, relève de plusieurs facteurs spécifiques. Cette île présente un cadre physique propice – dû à l'origine volcanique de l'archipel – qui va induire une forte production de matériaux facilement mobilisables. Les fortes pentes des reliefs montagneux de l'île, associées à un climat tropical de mousson aux précipitations brusques et importantes, favorisent l'érosion des versants et un transport rapide des matériaux érodés vers l'aval.

L'aspect anthropique étant également un facteur très important dans la compréhension des risques et les enjeux de l'interaction entre l'homme et son milieu, Java se prête aussi, à cet égard, parfaitement à cette étude. En effet, les densités de population y sont extrêmement fortes (> 1 000 hab./km²) et une grande partie des Javanais vit encore de l'agriculture.

Acteurs mais aussi victimes de la sédimentation des réservoirs, la population javanaise, en augmentation constante, contribue à une pression de plus en plus forte sur le milieu rendant nécessaire la recherche de stratégies de gestion du milieu adaptées pour être en mesure de supporter une production toujours plus rapide et en quantités toujours plus importantes.

Objectifs de la recherche

La recherche menée dans le cadre de ce travail a pour objectif d'apporter des éléments de réponse quant aux rythmes et aux processus de sédimentation dans les lacs de barrage sur l'île de Java.

Nos hypothèses de travail partent du postulat que de nombreux facteurs physiques interviennent dans la production de matériaux et dans leurs migrations vers les thalwegs mais aussi que différentes actions anthropiques tendent aussi à accélérer cette production sédimentaire et à en favoriser leur mobilisation. Les évolutions climatiques et environnementales perturbent à leur tour ces cycles qui influenceront les rythmes et les processus de sédimentation dans les réservoirs de barrage.

Pour répondre à ces hypothèses de travail, plusieurs outils ont été pensés et développés afin d'analyser les données recueillies sur le terrain et de pouvoir ainsi contribuer à une meilleure compréhension des différentes dynamiques sédimentaires des bassins étudiés.

Structure de la thèse

Cette recherche dresse dans une première partie un état de l'art consacré à la question de la sédimentation dans les lacs de barrage. Il s'agit de présenter successivement les connaissances, méthodologies et résultats obtenus dans ce domaine afin de faire ressortir les enjeux et les intérêts d'une telle étude. L'objectif de ce premier chapitre est ainsi de dresser un bilan de ces recherches et de montrer en quoi celles-ci se révèlent être l'une des grandes thématiques environnementales pour les prochaines décennies à venir en Indonésie.

Le second chapitre ancre l'étude dans sa dimension spatiale et dresse les grands traits morpho-climatiques de l'île de Java avant de nous intéresser, plus en détails, aux bassins-versants étudiés. Les caractéristiques du milieu ainsi que les principaux traits humains qui permettent de mieux comprendre les dynamiques de ces bassins vont être présentées.

Le troisième chapitre détaille la méthodologie utilisée au cours de cette recherche et dévoile les outils mis en place tout au long de ces années de recherche pour analyser les rythmes de sédimentation des réservoirs javanais. Cette présentation complète montre en quoi ces outils présentent un intérêt majeur dans la compréhension des phénomènes et le rôle déterminant qu'ils peuvent jouer dans les processus de décision à venir.

Le quatrième chapitre décrit les données de sédimentation des réservoirs étudiés acquises et collectées lors des différentes missions de terrain. Une description de chacun des réservoirs permet de les comparer entre eux afin d'en tirer des hypothèses d'une part et mais aussi leurs tendances d'évolution communes.

Le cinquième chapitre, quant à lui, apporte l'explication des différentes phases d'évolution de sédimentation des lacs de barrage en croisant facteurs physiques et humains. Cela permettra de voir si les tendances dégagées dans le chapitre précédent sont dépendantes ou non de facteurs particuliers.

Le dernier chapitre s'intéresse à la gestion des bassins-versants d'un point de vue institutionnel et décrypte le jeu des acteurs intervenants dans les décisions de planification et de conservation des bassins-versants et des barrages en Indonésie. Les différents niveaux de décisions sont présentés de façon horizontale et verticale afin de mettre en lumière les problèmes actuellement rencontrés.

CHAPITRE PREMIER : LA SÉDIMENTATION DANS LES LACS DE BARRAGE - ÉTAT DE LA QUESTION

Afin de contextualiser cette étude, ce premier chapitre est consacré à l'état des connaissances sur les travaux réalisés à ce jour sur la sédimentation des réservoirs de barrage. Une présentation de la littérature sur ce sujet sera dressée avant de revenir sur les principaux résultats, afin de déterminer les enjeux constituant cette recherche.

I. État de l'art de la littérature sur la sédimentation des réservoirs de barrage

La sédimentation dans les réservoirs de barrage est un vaste champ d'étude puisque celui-ci demande de s'intéresser aux nombreux processus intervenants en amont de ces ouvrages jusqu'à leur mode de sédimentation dans les réservoirs. Située au carrefour de plusieurs disciplines, la quantification des sédiments déposés dans les réservoirs fait appel aux sciences de l'ingénieur tandis que les sciences humaines étudient, quant à elles, les impacts réciproques de la sédimentation sur le milieu et les sociétés. C'est à travers différentes approches – mais cependant complémentaires – que le géographe va pouvoir construire son analyse. Il s'agira d'estimer et/ou de quantifier de façon précise les volumes sédimentaires qui seront stockés dans les réservoirs afin d'en discerner les enjeux liés à la question. Pour cela, une étude des publications sur la thématique apparaît alors indispensable.

A. Pour une meilleure connaissance de la sédimentation dans les réservoirs de barrage

1. Les types de publications

Depuis que les barrages modernes existent, de nombreux chercheurs ont tenté, par des suivis plus ou moins réguliers, de comprendre le fonctionnement et l'évolution de la sédimentation dans les réservoirs au fil du temps. Couvrant une période assez longue (jusqu'à cent ans pour certains), ils ont permis une compréhension plus fine des mécanismes contribuant aux dépôts des sédiments dans les lacs de barrage. Ces différents travaux ont donné lieu à des publications sous différentes formes qui vont être détaillées ci-dessous.

a. Le faible nombre d'ouvrages généralistes sur le sujet

Ces connaissances ont été compilées dans des ouvrages (Tab.1) englobant toutes les thématiques rattachées à la sédimentation des réservoirs. Tous les processus y sont étudiés, du détachement des particules sur les versants (par l'érosion des sols) au stockage des sédiments. Ces ouvrages témoignent des progrès de la discipline sur ces quarante dernières années à travers l'amélioration des modèles et la quantification des matériaux solides venant à se déposer dans les réservoirs.

Auteurs	Titre	Année	Revue	Éditeur
Borland, W. M.	Chap. 29, "Reservoir Sedimentation"	1971	In H. W. Shen (editor), <i>River Mechanics</i> . Water Resources	Publications, Fort Collins, Colo.
Annandale G. W.	Reservoir sedimentation	1987	Developments in water sciences 29	Elsevier 221p.
Gregory L. Morris, Jiahua Fan	Reservoir sedimentation handbook	1997		McGraw-Hill Professional, 848 p.
Yazdandoost F., Attari J.	Hydraulics of Dams and River Structures:	2004	Proceedings of the International Conference, Tehran, Iran, 26-28 April 2004	Taylor & Francis, 460 p.
García Marcelo H.	Sedimentation engineering: processes, management, modeling, and practice	2007	American Society of Civil Engineers. ASCE Task Committee to Expand and Update Manual 54	ASCE Publications, 1132 p.

Tableau 1 : Liste des ouvrages généraux sur la sédimentation des réservoirs de barrage

Tous ces ouvrages abordent la gestion des sédiments sous un angle mécanique et hydraulique permettant une compréhension plus fine des mécanismes de sédimentation dans les réservoirs. Cependant peu d'entre eux s'interrogent sur la provenance et les rythmes de ces sédiments. C'est lors de la phase de transport de ces derniers que tous commencent leurs études.

b. Une littérature plus fournie dans les études de cas et les rapports d'étude

Malgré le nombre limité d'ouvrages généralistes dédiés à ce sujet, on trouve une littérature bien plus conséquente à travers les rapports d'étude. En effet, une majorité des informations réunies sur la sédimentation des lacs de barrages l'ont été par ce biais. Généralement, il ne s'agit pas d'études spécialement consacrées à cette thématique mais de projets concernant un ou plusieurs bassins où l'intérêt est porté sur la gestion intégrée de

ces derniers. Ces travaux sont menés par des groupes de recherche universitaire ainsi que par des experts, financés principalement par des organismes internationaux (Tab. 2).

Auteurs	Titre	Année	Revue	Éditeur
Sichingabula Henry M.	Problem of sedimentation in small dams in Zambia	1997	Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of the rabat Symposium, April 1997)	IAHS
Remini W., Remini B.	La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord	2003	Larhyss Journal, n°02, Juin 2003, pp. 45-54	
Kashiwai J.	Reservoir Sedimentation and Sediment Management in Japan	2004	Rapport de l'institut de recherche des travaux publics (PWRI)	
El-Moattassem M. and al.	Modelling of sedimentation process in Aswan High dam reservoir	2005	Report of FRIEND/Nile Project	UNESCO
Izhar-ul-Haq, S. Tanveer Abbas	Sedimentation of Tarbela & Mangla Reservoirs	2007	Pakistan Engineering Congress, 70 th Annual Session Proceedings	
Ministère de l'énergie iranien	Sedimentation in the Reservoir of Large Dams in Iran	2007		

Tableau 2 : Liste non exhaustive des rapports et articles consultés au sujet de barrages à travers le monde

2. Une thématique dominée par les sciences de l'ingénieur

Au regard de cette littérature, on note que les sédiments sont souvent considérés comme une composante de l'eau en transfert. Il apparaît aussi qu'une distinction s'opère entre les processus érosifs et les processus sédimentaires et que peu d'études lient les deux phénomènes. Les sédiments en transport sont intégrés comme un facteur supplémentaire dans les nombreux modèles mathématiques tentant d'appréhender le transfert des flux liquides. Les ingénieurs – à l'origine de ces modèles – cherchent ainsi à quantifier le plus précisément possible le volume de sédiments en jeu afin d'évaluer les impacts de ces derniers sur les structures et les ouvrages. L'objectif étant de pouvoir mettre en place les mesures adéquates par une meilleure connaissance de ces taux afin de prolonger l'efficacité des structures et des éléments hydroélectriques, mais aussi de pouvoir en proposer les aménagements adéquats. Pour ce faire, les débits des cours d'eau et les caractéristiques des sédiments en transport (taille et propriétés des matériaux) constituent les éléments essentiels de cette approche.

a. Une approche hydraulique des processus

La sédimentation dans les réservoirs – étant le résultat d’une interruption du transfert des flux liquides – modifie la morphologie des cours d’eau par le dépôt de matériaux temporaires ou définitifs. Ces transferts sédimentaires sont donc sources de nombreux problèmes qu’il est essentiel d’analyser avec précision pour obtenir des prévisions réalistes. Il s’agit de pouvoir évaluer correctement les lâchés d’eau nécessaires à l’évacuation de la charge de fond et ainsi de déterminer les conditions d’érosion et de dépôts de ces derniers tout au long du cours d’eau. En effet, la prise en compte de ces problématiques est une condition nécessaire à l’aménagement du cours d’eau en aval des barrages afin de localiser correctement les zones sensibles et de pouvoir, en priorité, les protéger. De nombreux logiciels de transport de sédiments comme Ribasim ou Tideda ont ainsi été créés afin de répondre à cette question, en tentant d’évaluer le plus correctement possible la charge de fond en transport qui demeure, à l’heure actuelle, le facteur le plus difficile à quantifier.

b. Les modèles mathématiques et physiques au cœur des préoccupations

L’étude du transport sédimentaire reste un domaine complexe mais quelques ouvrages permettent de rendre compte des connaissances sur le sujet. Yang (1996) dresse un état général de la question concernant le transport sédimentaire en comparant la théorie et les équations. L’approche de Julien (1995), différente de celle de Yang, présente un panorama des équations fondamentales et de leurs applications. Chang (1988) traite du transport sédimentaire en insistant, quant à lui, sur l’aspect quantitatif des processus fluviaux et sur la morphologie de chenaux alluviaux. Simons et Senturk (1994) ainsi que Vanoni (1975) offrent, pour leur part, une vision globale sur les approches des ingénieurs dans le thème de la sédimentation.

Auteurs Organismes	Titre	Année	Éditeur
Yang, C. T.	Sediment Transport: Theory and Practice	1996	McGraw-Hill
Simons, D. B., and Senturk, F.	Sediment Transport Technology	1992	Water Resources Publications
Julien, P. Y.	Erosion and Sedimentation	1995	Cambridge University Press
Kadlec, R. H., and Knight, R. L.	Treatment Wetlands	1995	Lewis Publishers
Chang, H. H.	Fluvial Processes in River Engineering	1988	John Wiley and Sons
Vanoni, V. A.	Sedimentation Engineering	1975	ASCE
Graf, W. H.	Hydraulics of Sediment Transport	1971	McGraw-Hill

Tableau 3 : Liste des ouvrages consultés sur la thématique du transport sédimentaire en ingénierie

c. De meilleures connaissances au service de la gestion durable des ouvrages

Les modèles se sont alors affinés et rendent désormais plus fidèlement compte du volume sédimentaire en jeu. Tous les résultats issus de ces recherches permettent une meilleure compréhension du phénomène et donnent des réponses réellement plus efficaces dans la prévention d'un dépôt trop rapide de sédiments dans les réservoirs. Ces derniers offrent des chiffres plus cohérents permettant aux décideurs d'adopter la stratégie la plus adéquate à l'évacuation de ces sédiments. Même si la conservation de la capacité de stockage est la grande priorité des décideurs, leurs intérêts se portent également au pouvoir corrosif des sédiments lors de leur passage dans les turbines des barrages dotés d'infrastructures hydroélectriques. Il s'agit alors pour eux de pouvoir évaluer le plus précisément possible les capacités d'obstruction des conduits, ainsi que l'abrasion des turbines et machines hydroélectriques qui a pour principale conséquence une baisse de leur efficacité mais aussi celle d'une augmentation de leur coût de maintenance.

3. L'émergence des préoccupations environnementales et sociales

« Les barrages, importants pour la production d'énergie, l'approvisionnement en eau et l'irrigation modifient aussi le débit des cours d'eau et le transport des sédiments. De nombreuses études locales l'ont déjà montré. Mais que sait-on de leur impact à l'échelle globale de la planète ? ». Cette citation issue de l'édito de la revue *La Recherche* de juin 2005 résume bien les nouvelles problématiques liées à l'installation de barrages sur les cours d'eau.

a. Un point de vue nouveau sur les barrages

Ces dernières décennies ont vu naître de grandes controverses au sujet de l'impact des barrages hydroélectriques. Celles-ci ont alors provoqué l'effondrement de leurs financements du début des années 1990 jusqu'en 2000. On peut même aller jusqu'à dire que la taille de l'ouvrage est souvent devenue proportionnelle aux nombreuses critiques émises à son sujet. Ce fut ainsi le cas du barrage des Trois Gorges en Chine ou encore celui du Belo Monte au Brésil qui se sont heurtés à une forte hostilité à leurs phases de projet. Deux grands types d'impact sont ainsi à mettre en relation directe avec la construction d'un barrage : d'une part les nombreux impacts environnementaux directs du milieu (migration des espèces aquatiques, pollution) et d'autre part le déplacement des populations se situant

en amont de l'ouvrage dans la zone ennoyée par le lac de retenue. Face à ces critiques, les instigateurs de ces grands projets avancent l'urgence qu'ont certains pays (dont une majorité en voie de développement) à étendre leur parc énergétique. Un autre argument avancé est celui des avantages liés à de telles constructions de par leur capacité à mieux contrôler les débits des grands fleuves ainsi que l'irrigation. C'est dans ce climat tendu que les nouveaux projets de construction de barrage se mettent en place, partagé entre respect de l'environnement et des populations autochtones d'une part, et course vers le développement énergétique de l'autre. Leurs implantations sont désormais de plus en plus réglementées par les états, imposant des normes de plus en plus strictes.

b. La priorité des enjeux environnementaux

Depuis près d'une dizaine d'années on note que l'approche environnementale se trouve au cœur des réflexions. À titre d'exemple, les études environnementales précédant la construction du barrage de Belo Monte (début des travaux en 2010) se sont élevées à environ 30 millions d'euros et auront duré près de 5 ans. L'aspect environnemental des barrages retient désormais toutes les attentions et se place au cœur des discussions. Pour qu'un nouvel ouvrage puisse être réalisé, il est désormais inévitable que ce dernier respecte de stricts critères environnementaux. Ces nouvelles normes apparaissent aussi en réponse aux nombreuses publications de ces dernières décennies, mettant en cause les barrages dans la modification des écosystèmes. Par exemple, la Commission mondiale sur les barrages (CMB ou WCD *World Commission of Dams*) a constaté que tous les réservoirs, étudiés à ce jour par les scientifiques, produisent des gaz à effet de serre, avec des émissions très variables selon le lieu et l'historique de la zone. Ces gaz produits – en raison de la décomposition de la végétation inondée et des apports en carbone du bassin-versant – sont naturellement beaucoup plus importants dans les régions chaudes. Toujours d'après leurs estimations, 1 à 3 milliards de tonnes de carbone seraient ainsi enfermées dans les sédiments retenus. Ce carbone n'est pas le seul à être tenu pour responsable puisque les réservoirs mondiaux émettent aussi 70×10^6 t/an de CH₄ (méthane) et $1\,000 \times 10^6$ t/an de CO₂ selon de récentes recherches canadiennes. Plusieurs études locales ont aussi démontré que les nutriments, nitrates, phosphates sont à leur tour « piégés », fragilisant les écosystèmes sans même évoquer l'accumulation de polluants (pesticides, métaux lourds...)

dans les réservoirs. On peut citer pour exemple l'accumulation de mercure (Hg) dans les sédiments des réservoirs situés en aval des zones de production aurifère.

En Guyane française, les chiffres officiels font état du rejet de 230 tonnes entre 1857 et 1992, sur la base de 1,3 kg de Hg pour 1 kg d'or produit ; toutefois, ces données traduisent une forte sous-estimation des rejets, étant donné l'importance des activités clandestines dans ce domaine. Il est aujourd'hui certain que les milieux aquatiques se sont déjà transformés sous l'effet des activités humaines, et ce, environ cent fois plus vite qu'au cours des 10 000 dernières années.

Les barrages piègent aussi une quantité importante de sédiments (Fig.3). Ces derniers vont provoquer un déficit des apports solides qui ne compenseront pas les pertes dues à l'érosion, entraînant une modification des chenaux en aval des ouvrages et une régression des zones deltaïques à l'embouchure. Les barrages construits ces cinquante dernières années ont fortement réduit la quantité de sédiments atteignant les littoraux de $1,4 \times 10^9$ t/an ($\pm 0,3 \times 10^9$) (Walling, 2003). Cette baisse est d'autant plus préoccupante que la quantité de sédiments charriés par les cours d'eau a globalement augmenté de $2,3 \times 10^9$ t/an ($\pm 0,6 \times 10^9$) en raison de l'érosion accrue des sols liée aux activités humaines.

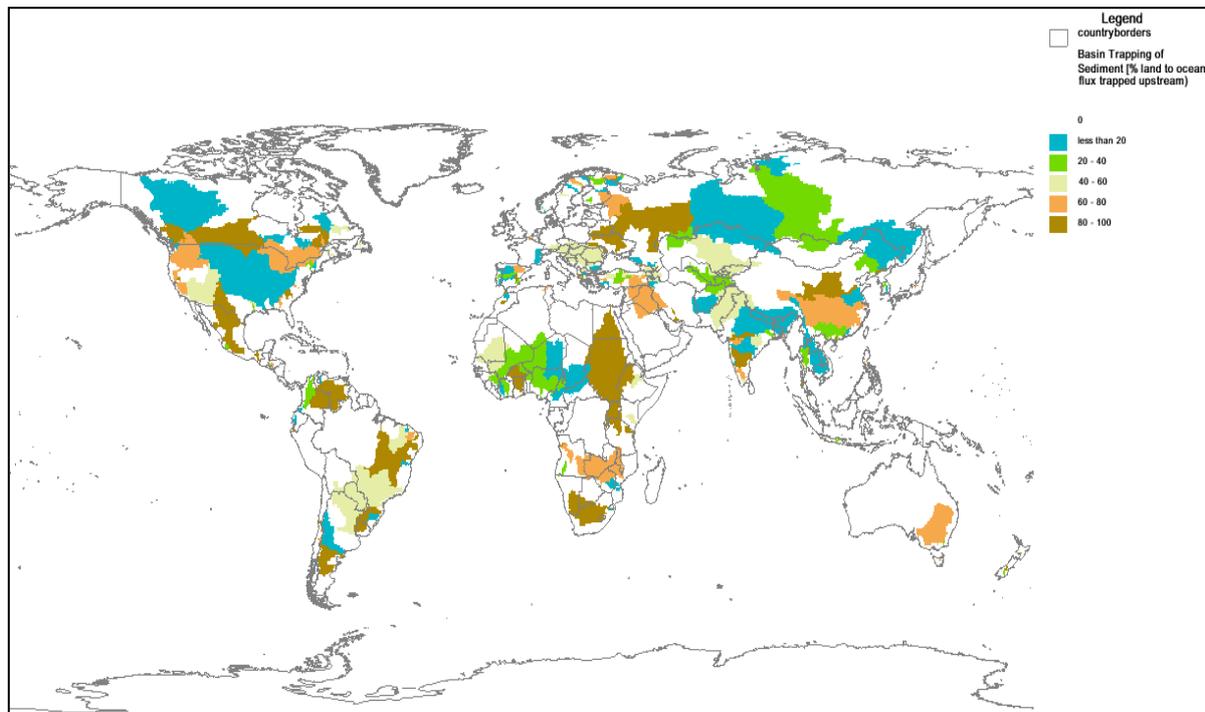


Figure 3 : Piégeage des sédiments à l'échelle des bassins (Vörösmarty et al., 2003)

Malgré les problèmes évoqués ci-dessus, on assiste à un redémarrage des projets de barrages depuis le début des années 2000, sur la base de standards écologiques plus ou moins élevés. C'est avec la prise en compte de cette nouvelle donne que la Banque mondiale a repris le financement des barrages en 2003, après dix ans de contestation et de suspension de projets. A l'avenir, l'énergie hydroélectrique risque d'accroître son influence face à la diminution des sources d'énergie non renouvelable telle que le pétrole et la remise en cause croissante de la filière nucléaire suite à la catastrophe de Fukushima en mars 2011.

Les figures 4 et 5 résument parfaitement les impacts que peuvent produire l'installation des barrages sur le milieu, à la fois en amont et en aval de ces ouvrages. Ces perturbations sont des éléments importants dont il faut tenir compte lors des études d'impacts environnementaux préalables à la construction des barrages sous peine de se retrouver confronté à de graves problèmes de gestion.

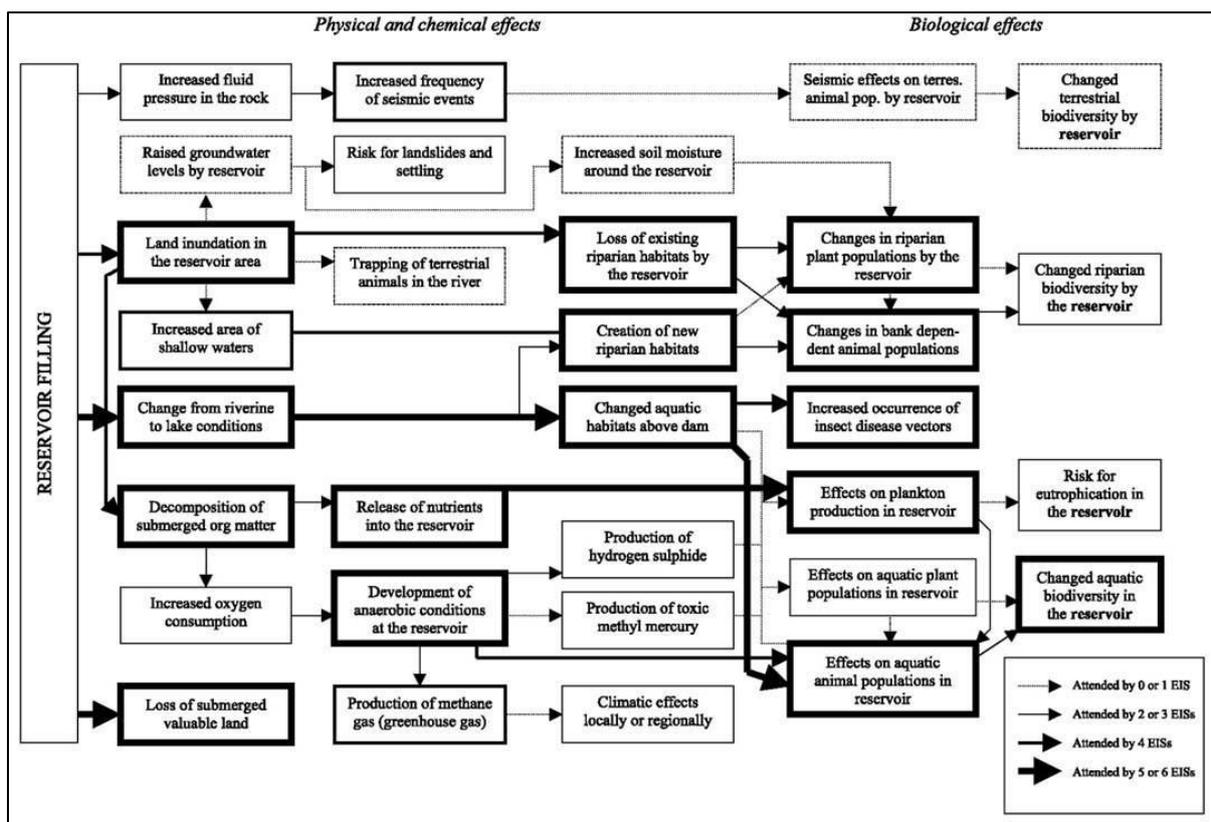


Figure 4 : Effets en amont des réservoirs dans la zone ennoyée (Brismar, 2004)

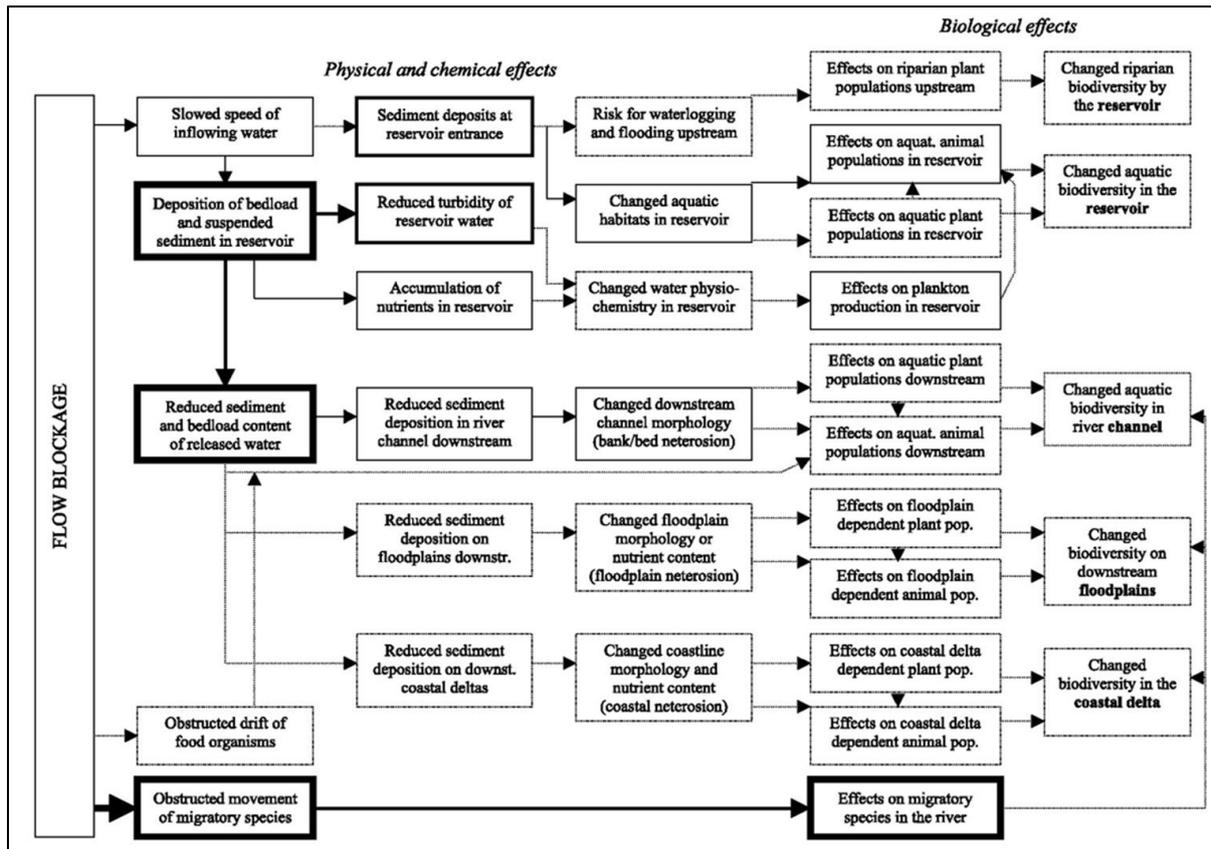


Figure 5 : Effets en aval des réservoirs (Brismar, 2004)

c. Une meilleure prise en compte des enjeux sociaux

Si les barrages peuvent entraîner la disparition de plantes, d'animaux et ainsi réduire la biodiversité aquatique, ces derniers ont également des répercussions graves sur les populations humaines : quatre millions de personnes seraient déplacées, chaque année, dans le monde entier, par des projets de construction de barrages (Banque mondiale). Le barrage des Trois Gorges en Chine aurait entraîné à lui seul la migration forcée de presque deux millions d'habitants provoquant ainsi une importante restructuration au niveau régional (Padovani, 2004). La CMB avait déjà conclu en 2002 que si « les barrages ont contribué de manière importante et significative au développement de l'humanité, et si leurs bénéfices ont été considérables (...), dans de trop nombreux cas, un prix inacceptable et souvent inutile a été payé, en particulier en termes sociaux et environnementaux, par les personnes déplacées, les communautés de l'aval, les contribuables et l'environnement naturel. » Appliquer une approche purement comptable pour évaluer les coûts et les bénéfices des grands barrages, en estimant que les pertes d'une partie de la population seront compensées par les avantages qu'en retire une autre partie, est aujourd'hui considéré comme inacceptable.

Ainsi, les projets actuels se heurtent souvent à de vives manifestations des personnes déplacées et relogées parfois à des centaines de kilomètres de leurs terres d'origine dans des conditions pouvant être aussi extrêmement précaires (Fig.6).



Figure 6: Village d'accueil des populations déplacées par le barrage des Trois Gorges, Yichang, Chine (octobre 2004)

Habitats construits à la hâte pour servir de modèle de relogement des autorités locales où l'on note que seuls les bâtiments donnant sur la rue (a) ont fait l'objet de soins particuliers tandis que derrière ces derniers (b) loge dans un habitat précaire. Dans les deux cas, la population s'avère mécontente d'avoir été déplacée de force et d'abandonner des terres cultivées depuis plusieurs générations.

B. Pour une meilleure évaluation des rythmes de sédimentation

L'étude des transferts sédimentaires se situe à l'interface de plusieurs thématiques de recherche impliquant la prise en compte de plusieurs processus qui vont se relayer à différentes échelles de temps et sur un territoire plus ou moins vaste. Ainsi, certaines de ces recherches portent plus particulièrement leur attention sur l'origine des sédiments qui se déposent dans les lacs de barrages. Ces études s'articulent alors autour des trois thèmes suivants : la libération de matériel dans les secteurs amont à travers les processus d'érosion (ablation des sols), le transport des flux solides dans les cours d'eau et la quantification des sédiments déposés dans les réservoirs. Ces études présentent aussi le très grand intérêt d'être à même de pouvoir évaluer la quantité de matériel en jeu. La communauté scientifique a ainsi apporté des éléments de compréhension importants à travers leurs travaux autour de ces trois thèmes.

1. L'érosion des sols

L'érosion, premier de ces trois thèmes, est dans son acceptation la plus stricte, le processus qui contribue au détachement de matériaux d'une surface en raison de l'impact des gouttes de pluie, de l'écoulement de surface ou du vent (Morgan, 1995). Une étude précise du phénomène permet donc de déterminer quels sont les facteurs majeurs de la dégradation des sols et d'étudier l'influence respective de ces derniers. Les scientifiques disposent de plusieurs moyens pour tenter de quantifier, avec plus ou moins de précision, les volumes en jeu en produisant des résultats représentatifs d'une surface et d'une durée variable en fonction de la méthode adoptée. Il est largement reconnu que les aléas climatiques et les changements d'occupation du sol peuvent agir comme facteurs déclenchants dans l'augmentation de l'érosion des sols et de la sédimentation. Les effets néfastes incluent un appauvrissement des sols, une augmentation de la sédimentation des réservoirs, une déstabilisation des chenaux fluviaux et une perte des habitats aquatiques (Sundborg, 1983 ; Tejwani, 1984 ; Larson and Albertin, 1984 ; Kessel, 1985).

a. Les programmes de conservation des sols

Ces études, très nombreuses, traitent du phénomène sur des terrains et des conditions extrêmement variées (climat, topographie, sols etc.) permettant ainsi de rendre compte des facteurs intervenants les plus importants. Ces études présentent également les principaux types d'érosion ainsi que les formes laissées par ces phénomènes dans le paysage. Ces recherches appartiennent généralement à des programmes qui ne se limitent pas uniquement à ce domaine. Il s'agit principalement d'études s'inscrivant dans un bassin-versant où sont à la fois étudiés les processus à l'origine de cette perte de sols ainsi que les conséquences de ces derniers. La prise en compte de l'érosion se justifie par des raisons de gestion durable d'un territoire donné ou par la nécessité d'avoir une lisibilité à moyen terme, essentielle à la rentabilité d'un investissement foncier ou agricole.

En Indonésie ces travaux apportent leur contribution à :

- L'amélioration de la connaissance des processus d'érosion ainsi que des sources de l'érosion en milieu volcanique, avec des précipitations intenses, une topographie raide et une pression démographique forte (Ambar et Wiersum, 1980; Bols, 1979 ; Bons, 1990 ; Critchley et Bruijnzeel, 2000 ; Diemont, et al. 1991 ; Bruijnzeel et Critchley, 1996 ; Kumia, 1983, 1986 ; Rijdsdijk et Bruijnzeel, 1990, 1991 ; Wiersum, 1985 ; Van der Linden, 1978, 1979 ; Yuniato, 1982).
- Le développement et l'essai de mesures spécifiques de conservation, le plus souvent à l'échelle de la petite parcelle (Agus et al., 1998 ; Arsyad, 1989; Kamir Brata, 1995; Suwardjo and Sofijah, 1985; Sinukaban et Adnyana, 1992; Sinukaban and al., 1994; Sinukaban et Banuwa, 1995).

Ces programmes de recherche sur l'érosion et la conservation des sols sont essentiels. Ils apportent une compréhension nouvelle, des technologies et des alternatives aux décisionnaires, aux planificateurs et aux agriculteurs, afin de favoriser la conservation des sols et le développement des ressources des zones montagneuses.

b. Les parcelles expérimentales

Les travaux sur parcelles expérimentales (Fig.7) consistent à instrumenter une surface (plus ou moins étendue) afin de pouvoir quantifier tous les paramètres intervenants dans la perte de sols. Cette instrumentation a connu de grandes avancées sous l'impulsion des pédologues et agronomes par leurs travaux sur la conservation des sols, notamment en direction des terres agricoles. En effet, il s'agit pour eux d'avoir une plus grande visibilité sur plusieurs éléments :

- la perte en eau (c'est-à-dire le volume d'eau ruisselé) ;
- la perte en terre (c'est-à-dire le volume ou le poids de terre érodé) ;
- les changements physiques et chimiques se produisant dans le sol ;
- le rendement des cultures.

Tout comme les programmes de conservation des sols, les travaux sur les parcelles expérimentales ont été lancés sur de nombreux sites afin de mieux faire état de la diversité des processus en fonction du milieu d'étude. Nombre d'installations tentent aussi de répondre à la question de la capacité de certaines cultures à retenir les sols permettant ainsi un développement agricole d'une part et une bonne protection des terres d'autre part.

Cette méthode nécessite l'installation de nombreux capteurs et s'avère alors assez coûteuse. C'est pourquoi ces parcelles expérimentales sont implantées sur des surfaces peu étendues. Le choix du terrain est donc primordial afin que les résultats puissent donner du sens à une plus grande échelle. Un nombre important de travaux mené par Roose et De Noni au sujet de cette méthode a été traité par l'IRD (ex. ORSTOM) notamment en Afrique et en Amérique du Sud.



Figure 7 : Parcelle expérimentale installée dans le cadre du projet de conservation du bassin de Wonogiri (JICA, 2005)

Beaucoup de problèmes présentés pourraient être en partie résolus avec de meilleures mesures de l'érosion sur de petites parcelles avant l'application des mesures de conservation (Lal, 1988 ; Amphlett, 1988). L'effet de ces mesures est plus facilement visible à l'échelle de petits bassins-versants puisque ceux-ci présentent des conditions climatiques et édaphiques uniformes. Aussi, leur temps de réponse relativement court entre l'érosion et son apport de sédiments en aval permet d'observer rapidement l'efficacité des mesures de conservation de sol. Cependant d'autres d'expériences sur le terrain et rigoureusement conçues seraient nécessaires, combinant des observations au niveau de la parcelle avec des mesures de l'écoulement et de la charge sédimentaire à la sortie du système, à des échelles de plus en plus grandes (Amphlett, 1988 ; Bruijnzeel et Purwanto, 1997 ; Van Noordwijk, et al. 1998). L'information issue de telles expériences est fondamentale pour évaluer l'efficacité des mesures de conservation de sol en général et des programmes de reboisement (*regreening project*) en particulier.

c. Les modèles empiriques pour l'estimation des taux d'érosion des sols

Comme nous l'avons montré dans la partie précédente, ayant très tôt compris l'enjeu économique de la conservation des sols, de nombreux travaux ont tenté de quantifier l'érosion des sols à travers le développement de modèles à partir des paramètres réunis sur le terrain. Il existe ainsi une multitude de modèles dont nous allons brièvement présenter les plus couramment utilisés dans les travaux récents concernant l'érosion des sols.

USLE (*Universal Soil Loss Equation, Wischmeier, Smith, 1978*)

USLE est une équation empirique développée à partir d'études portant sur de nombreux bassins-versants aux États-Unis. Elle est fondée sur un grand nombre de mesures de terrain et prévoit alors l'érosion annuelle moyenne pour des parcelles de terrain ou des champs mais en négligeant la sédimentation. L'équation de base est une simple multiplication d'un certain nombre de paramètres que sont l'érosivité des pluies et des sols, la topographie et le couvert végétal. Comme le montrent Haan et al. (1994), les différents facteurs peuvent être cependant calculés de plusieurs manières en fonction du terrain d'étude, comme dans sa version révisée (RUSLE, Renard et al., 1997). C'est actuellement le modèle le plus répandu en Indonésie dans les travaux portant sur la quantification de l'érosion des sols.

RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1995*)

L'équation RUSLE est basée sur la même formule qu'USLE, mais présente plusieurs améliorations dans la détermination des paramètres. Elle inclue une approche variable dans le temps pour le facteur d'érodibilité des sols ; une approche comportant des sous-facteurs pour évaluer le facteur d'occupation des sols ; une nouvelle équation pour refléter la longueur et le degré de pente ; et de nouvelles valeurs concernant les pratiques agricoles (Renard, et al., 1995).

Erosion plot et 3 NBEP (*Non imposed Boundary Erosion Plots*)

Ces deux méthodes sont issues de mesures directes faites sur des parcelles représentatives et apportent des informations quantitatives sur l'érosion des sols du terrain ayant fait l'objet de ces mesures.

AGNPS (*Agricultural Non Point Source Pollution Model, RA. Young et al., 1987*)

Le modèle AGNPS a été développé pour l'analyse de la pollution des sources dans les champs agricoles. Il estime la qualité de l'écoulement d'eau en surface et la compare à la qualité prévue par d'autres stratégies de gestion des sols. AGNPS est un modèle basé sur des événements simples, bien que des versions fondées sur des simulations continues soient en cours de développement. AGNPS emploie un ensemble d'équations modifiées d'USLE dans la détermination des facteurs d'érosion.

ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation, Beasley et al., 1977*)

Le modèle hydrologique ANSWERS est un modèle distribué et événementiel conçu pour simuler les processus d'écoulement, d'érosion et de transport des sédiments dans un bassin-versant agricole. Le modèle définit successivement l'interception de la pluie par la végétation, l'infiltration et la détention superficielle, le ruissellement en nappe et, enfin, l'écoulement concentré dans le réseau hydrographique. En parallèle, le détachement des particules par la pluie puis le transport de ces particules, leur dépôt ou leur reprise en charge sont également simulés. Le fonctionnement hydrogéologique est caractérisé par une loi de récession uniforme pour l'ensemble du bassin-versant. La présence de retenues d'eau ou d'aménagements hydro-agricoles peut être prise en compte. Les facteurs d'érosion dans ANSWERS sont semblables à ceux du modèle CREAMS.

WEPP (*Water Erosion Prediction Project, Nearing et al., 1989*)

WEPP est un modèle continu de simulations qui peut également être employé pour des événements simples sur de grandes surfaces. Mais puisque s'agissant d'un modèle continu, celui-ci fait appel à bien plus de paramètres, inutiles dans le cadre des modèles basés sur un événement unique. Par exemple, on doit ainsi tenir compte ici de la gestion et des changements des propriétés des sols au cours de la saison. Le nombre minimum de paramètres d'entrée exigés pour utiliser ce modèle est approximativement d'une centaine (Brazier et al., 2000).

Toutes ces approches permettent :

- de quantifier le phénomène d'érosion sous de multiples conditions du milieu naturel ;
- de comparer la valeur conservatrice des méthodes et pratiques préconisées ;
- de mesurer ainsi le bénéfice tiré de l'application des méthodes de lutte ;
- de déterminer au final quels sont les systèmes de conservation les mieux adaptés pour répondre aux problèmes se posant dans la mise en valeur d'un lieu aux caractères géographiques, pédologiques et économiques donnés.

Malgré l'intérêt précoce porté à l'érosion des sols, ces techniques et méthodes présentent des faiblesses, où les résultats peuvent alors apparaître discutables pour certaines régions du monde, notamment celles connaissant un climat tropical humide. Il faudra donc interpréter avec précaution ces résultats. En effet, chacun de ces modèles a été développé et testé dans un contexte particulier et des superficies différentes. Les observations concernent habituellement la perte de sol de petites parcelles de terrain rarement uniformes et normalement protégées en surface (Van der Linden, 1979; Bruijnzeel, 1983; Bons, 1990). Bien que les résultats de telles expériences soient utiles dans des hypothèses sur les effets des traitements intrinsèques, des difficultés surgissent lorsque ces mêmes résultats ont besoin d'être transférés à d'autres échelles comme des champs, des versants ou des bassins-versants plus vastes (Van Noordwijk, et al, 1998). En effet, les résultats pour les moyens et grands bassins-versants sont trop influencés par les variations spatiales de la géologie, du relief et des précipitations (Hewlett, 1983 ; Bruijnzeel et Bremmer, 1989 ; Purwanto et Donker, 1991), pour rendre aisée l'évaluation de l'effet du changement d'occupation des sols. Les résultats de ces études sont alors à prendre avec précaution, en tenant compte du fait qu'elles ne sont que très peu représentatives d'un bassin-versant dans son intégralité. Aussi, la majeure partie des recherches sur l'érosion en conditions tropicales humides a été réalisée à partir d'USLE, or ces prévisions souffrent d'incertitudes au niveau des résultats (Wischmeier et Smith, 1978 ; Anonyme, 1989). C'est notamment le cas de la valeur du facteur de protection P pour les terrasses (El-Swaify, et al. 1982) qui tend à surestimer la quantité prévue d'érosion de sol dans de telles conditions (Harper, 1988). Aussi, les bancs de terrasses construits sur les pentes raides de Java en Indonésie génèrent des problèmes significatifs quant au calibrage et à l'utilisation des équations de ce type (Purwanto, 1999; Critchley, 2000).

Des estimations faites d'après USLE dans le bassin-versant de la Ciliwung (Java-Ouest) donnaient une perte de sols annuelle de 200 t/ha/an, alors que les taux calculés d'après le modèle Morgan ne donnaient que 30 t/ha/an (Diemont, 1991). Ceci démontre bien que selon la méthodologie employée, les différences peuvent s'avérer très élevées. Tous ces travaux, au-delà de ne pas être réellement adaptés aux conditions de Java, ont été réalisés à partir de différentes méthodes rendant difficile la comparaison des résultats entre eux et donc de leur interprétation. Ainsi, une étude sur le Cilutung tribulaire du Cimanuk à Java-Ouest en Indonésie (Ambar, 1986) apporte des indications sur l'évolution des taux d'érosion lors du siècle dernier, mais qui calculés à partir de méthodes différentes, apparaissent donc au final incomparables : 1911 : 0,9 mm/ha ; 1934 : 1,9 mm/ha ; 1973 : 5,0 mm/ha.

L'étude la sédimentation dans les réservoirs de barrages permet alors de rendre compte des volumes érodés en amont des ouvrages et ainsi fournir des valeurs permettant d'évaluer la cohérence des résultats des travaux sur l'érosion des sols.

2. Le transport fluvial des sédiments

Après la phase de détachement des matériaux sur les versants, ces derniers sont pris en charge par les cours d'eau qui les transportent vers l'aval. Les caractéristiques de ces sédiments en transfert constituent ainsi un facteur essentiel à la détermination des mesures les plus adéquates à leur gestion. On distingue deux types de charge inhérents à la taille des éléments les constituants, à la matière en suspension (MES) et à la charge de fond.

a. L'importance de la connaissance des propriétés des sédiments

Plusieurs éléments sont à prendre en considération pour avoir une bonne approche des sédiments en transfert qui se déposent dans les réservoirs. La classification de taille des sédiments est le premier d'entre eux (Fig.8). Selon ce critère il est possible de différencier le mode de transport, à savoir en surface ou en fond de lit. Les sédiments en transport par l'eau peuvent être classés en sept catégories, allant de l'argile aux blocs. Ainsi la taille des sédiments en transport dans l'eau est le paramètre essentiel à leur étude. De nombreuses classifications nationales existent pour décrire la taille caractéristique de chaque grain. Nous utiliserons dans cette recherche la classification française.

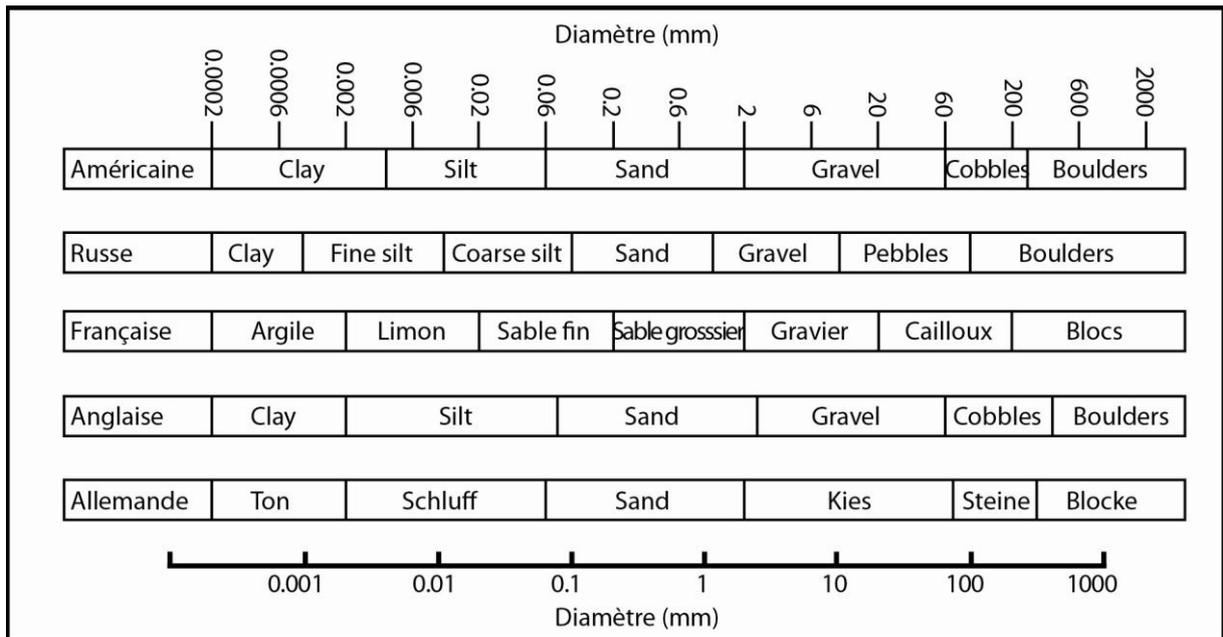


Figure 8 : Comparaison des classifications nationales de tailles des particules (d'après Morris, Fan, 1997)

Un deuxième élément concerne la forme des particules (Fig.9). En fonction de la taille, de l'arrondi et du tri de ces derniers, la vitesse de déplacement s'en trouvera plus ou moins accélérée. Les matériaux fraîchement érodés ont une structure anguleuse prononcée et deviendront plus arrondis au fil de leur parcours vers l'aval. Cette donnée est importante notamment pour déterminer l'abrasion que connaîtront les équipements hydrauliques.

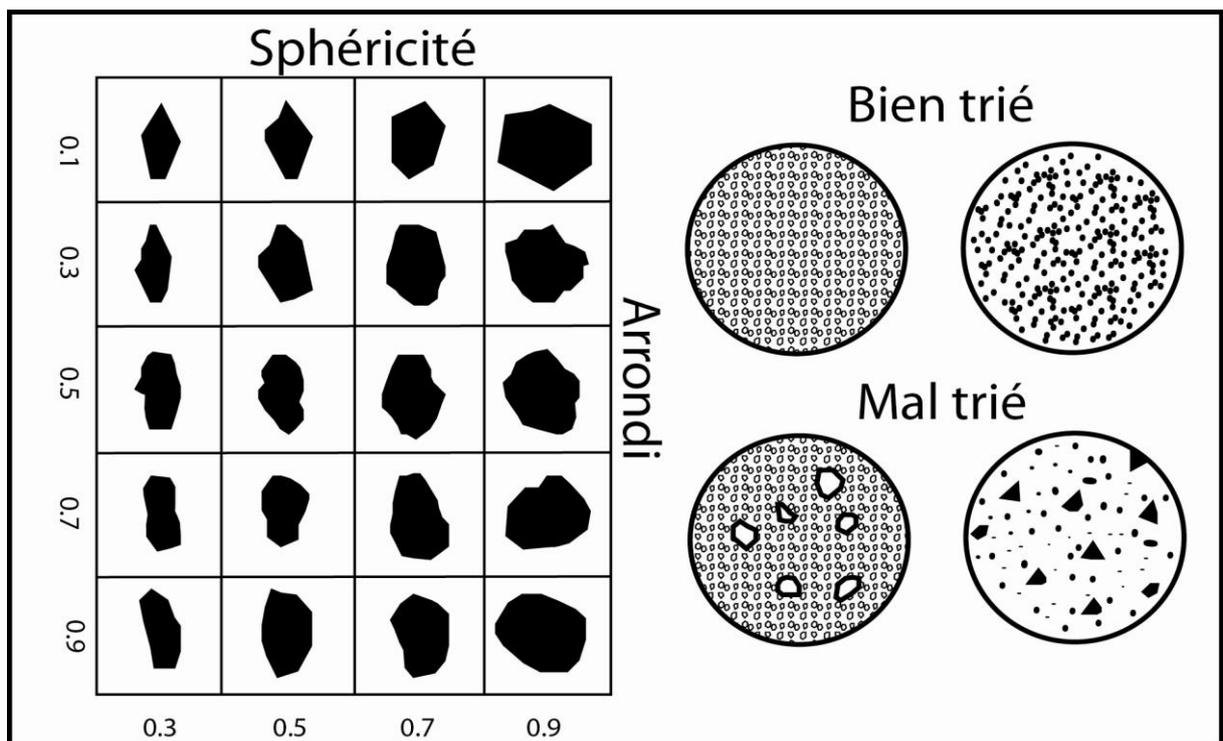


Figure 9 : Sphéricité, arrondi et tri des sédiments (d'après Morris, Fan, 1997)

b. La matière en suspension (MES)

La MES ne concerne que les éléments les plus fins des matériaux transportés généralement en suspension, par les cours d'eau sans réelle interaction avec le fond du lit (Fig.10). Ces derniers se trouvent dans la tranche supérieure de la lame d'eau et connaissent un déplacement rapide. Les éléments en suspension constituent la fraction la plus importante des sédiments en transfert mais ne représentent qu'une faible proportion de la masse totale en déplacement (environ 10%).

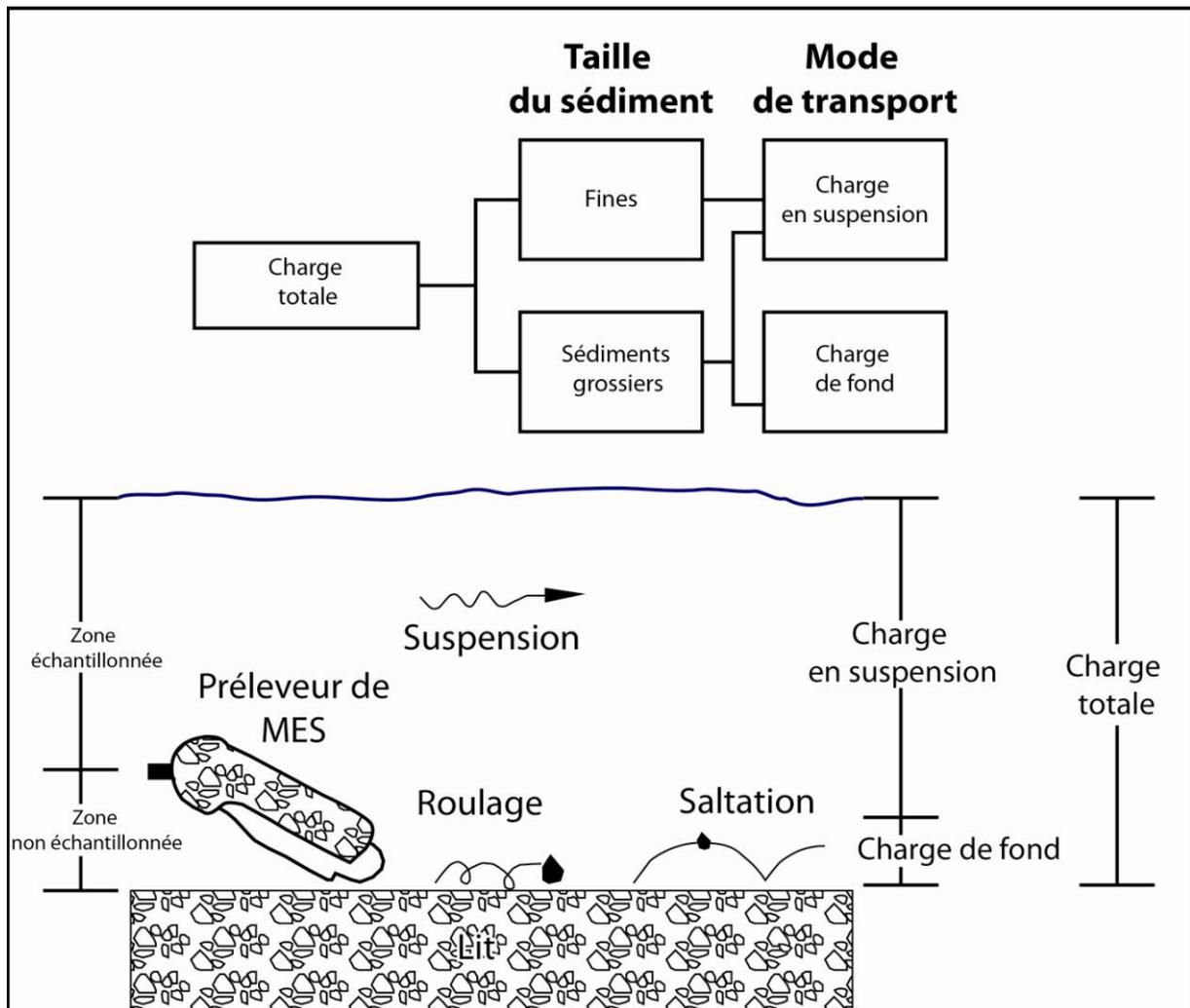


Figure 10 : Distinction entre la charge en suspension et la charge de fond (d'après Morris, Fan, 1997)

Les premiers éléments à être transportés par les cours d'eau sont aussi les matériaux les plus simples à échantillonner en suivant la procédure décrite dans le chapitre 3 et grâce aux préleveurs présentés dans la figure 11. L'intérêt de mesurer avec précision la MES est d'obtenir une bonne évaluation de la charge fine en transport car elle constitue la partie la plus importante des sédiments qui vont s'accumuler dans les réservoirs de barrages.

Ces mesures sont requises afin d'établir des estimations et modélisations fiables des taux de sédimentation. De nombreux travaux s'intéressant à ce sujet sont compilés dans les travaux publiés par l'IAHS en particulier ceux de Walling.

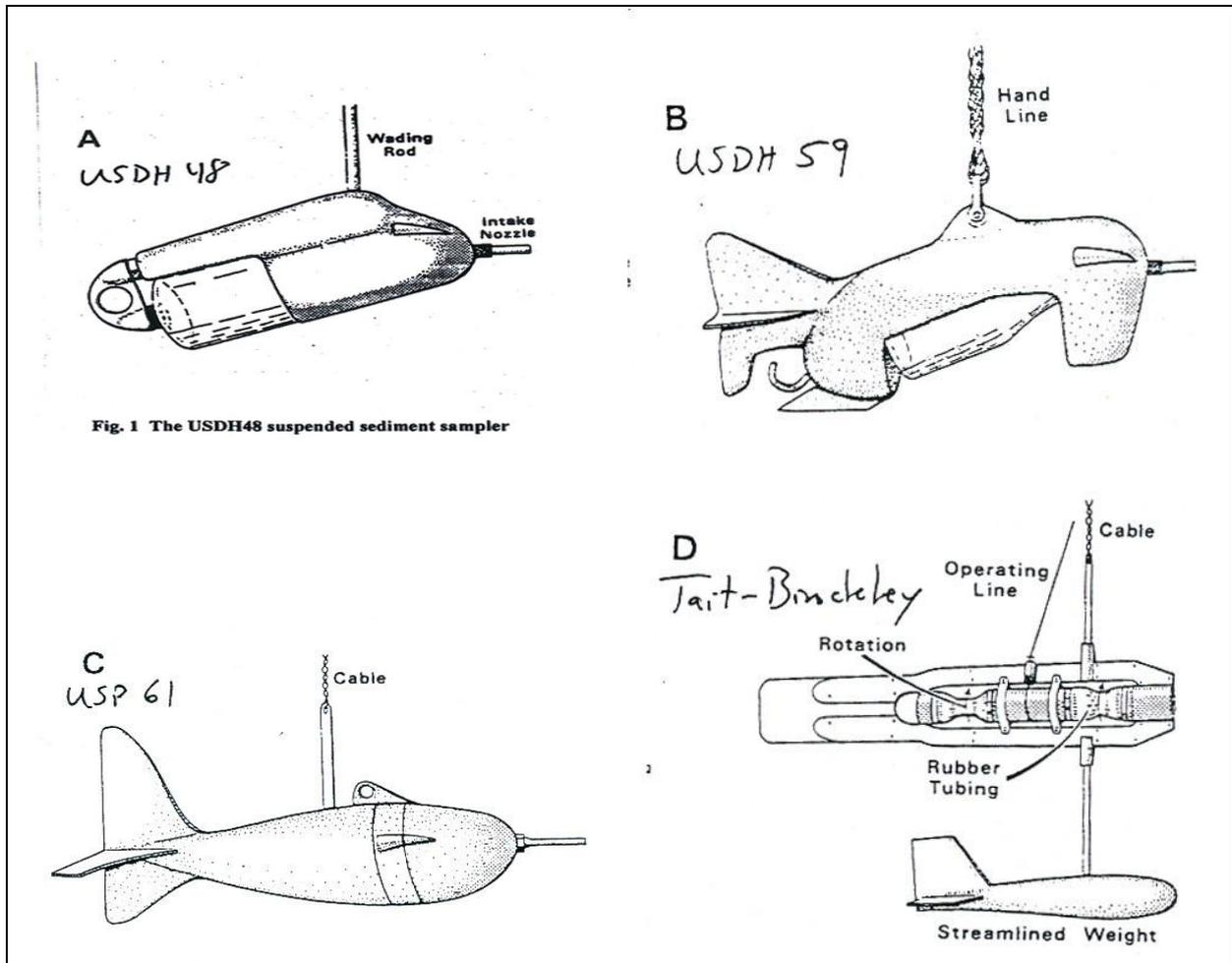


Figure 11 : Différents modèles de préleveurs d'échantillons de MES (Morris, Fan, 1997)

c. La charge de fond

La seconde partie des matériaux pris en charge par les cours d'eau concerne la charge de fond qui désigne les matériaux grossiers se déplaçant en continue (roulement ou glissement) ou de manière intermittente en contact avec le fond du lit (saltation). Dans une grande majorité des cours d'eau la charge de fond correspond à une petite fraction (moins de 15%) de la charge totale. Cependant, on constate des taux inférieurs en milieu tropical sauf pour les cours d'eau de volcans actifs où les taux sont bien plus élevés. Leur déplacement est plus lent que les sédiments en suspension mais peut devenir plus rapide lors d'épisodes de crue.

Ces sédiments plus grossiers, une fois capturés dans le réservoir, vont être plus difficilement remobilisables lors des lâchés d'eau et constituent alors une perte nette de la capacité des réservoirs.

Ces derniers restent difficilement quantifiables du fait de leur déplacement en fond de lit. De nombreux moyens existent pour échantillonner la charge de fond, chacun ayant un degré d'efficacité propre en fonction de la condition du lit et du débit. Aussi, certains matériaux peuvent être collectés par inadvertance. Le modèle Helley Smith (modèle C dans la figure 11) est le plus souvent utilisé (Emmet, 1981). Il consiste en un filet attaché à un orifice en métal, placé à contre courant, servant à piéger les matériaux. Un chronomètre pour enregistrer le temps de mesure y est aussi associé, en sachant que plus la durée d'échantillonnage sera longue, plus l'échantillon sera représentatif des conditions sédimentaires réelles. Tout comme les échantillons de MES, l'échantillonnage doit s'effectuer à intervalle régulier. Une fois l'échantillon collecté, on pourra alors peser ce dernier afin d'en déterminer la masse de sédiment par unité de temps. La figure 12 présente différents modèles servant à échantillonner la charge de fond. De nombreux ouvrages traitent de la question et s'interrogent sur les différentes méthodes de prélèvement (Rijn, 2007 – Kondolf & Piégay, 2003).

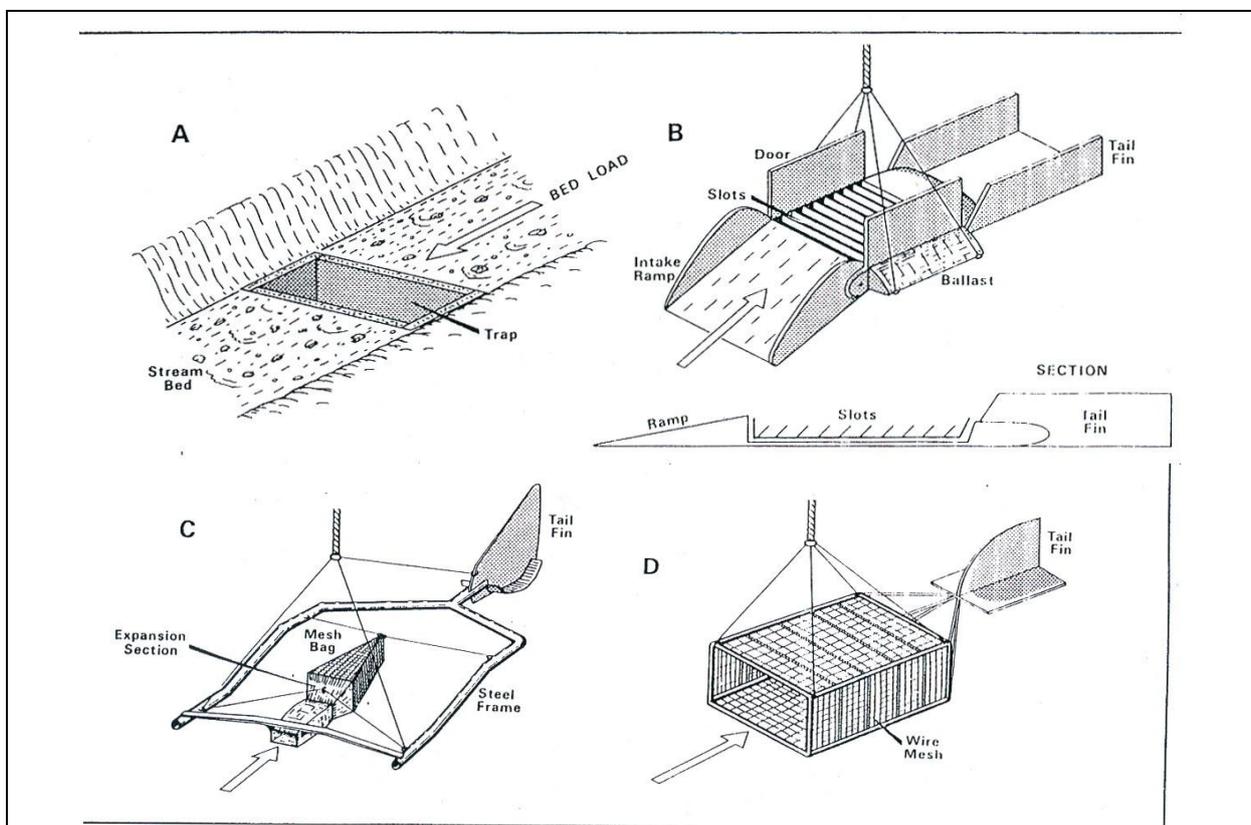


Figure 12 : Présentation des modèles servant à échantillonner la charge de fond (Morris, Fan, 1997)

Dans les cours d'eau tropicaux et volcaniques, on note une spécificité de la charge solide du fait d'une MES importante, due à l'altération forte des sédiments des berges mais aussi d'une charge de fond importante par l'apport de matériaux sains venant de l'amont (volcans actifs). Il s'agit enfin d'être conscient que la comparaison des données de charge sédimentaire entre bassins-versants est difficile, aussi bien pour les mesures comme que pour les méthodes (Walling et Webb, 1981 ; Rijdsdijk et Bruijnzeel, 1990), les conditions physiques (taille du bassin-versant notamment) variant de site en site.

3. Le dépôt des matériaux

Les éléments en transport dans les cours d'eau, en fonction des obstacles rencontrés (naturels ou anthropiques) sont amenés à soit se déposer temporairement – avant une remobilisation ultérieure –, soit définitivement lors d'une phase d'accumulation – ce qui est généralement le cas dans les réservoirs.

a. Les dépôts temporaires

Tout au long du cours d'eau, il est possible d'y identifier des secteurs propices aux dépôts de matériaux. Dans le cas des cours d'eau qui présente un profil méandreux, l'accumulation sur les rives concaves a pour effet de stocker une partie des matériaux issus de l'amont. Ce schéma peut être perturbé lors des périodes de crues où les matériaux déposés seront remobilisés et continueront vers l'aval. Des obstacles naturels tels que les embâcles peuvent aussi contribuer à un dépôt de matériaux avant d'être remis en transport lors de la rupture de ce dernier. Selon le profil du cours d'eau les zones de sédimentation sont donc plus ou moins nombreuses et influencent alors le temps de réponse entre la dégradation des sols sur les versants en amont et la sédimentation dans les réservoirs en aval.

b. Les dépôts définitifs

Le dépôt définitif de matériaux a lieu essentiellement dans des dépressions topographiques où l'on retrouve généralement une accumulation d'eau (lacs), ou bien en amont d'ouvrages barrant transversalement le cours d'eau. Les barrages influencent ainsi fortement le bilan sédimentaire qui devient dès lors déficitaire, pouvant affecter le style fluvial du cours d'eau ainsi que les deltas qui alors, moins alimentés, régressent. Le rôle des grands barrages dans

le piégeage des sédiments en transit représente un outil de premier choix pour apprécier de manière quantitative les processus érosifs qui interviennent en amont de ces ouvrages.

II. Des taux et des rythmes de sédimentation hétérogènes à l'échelle mondiale

Il s'agira dans cette partie de présenter la variabilité de la sédimentation dans les réservoirs de barrages à l'échelle mondiale en s'appuyant sur les études déjà menées sur le sujet. La grande majorité de ces publications font référence à des travaux menés par des chercheurs ou groupes de recherche sur les réservoirs de différents pays. Ces résultats permettent de rendre compte des disparités régionales dans la vitesse de sédimentation.

A. Présentation des résultats bibliographiques

Une synthèse bibliographique a été effectuée afin de collecter un nombre significatif de données sur les taux de sédimentation à travers le monde. Ces chiffres issus de publications internationales sont analysés ci-dessous et présentés de manière complète dans l'annexe 1.

1. État des données collectées : une représentation régionale de la sédimentation des réservoirs.

Nos recherches ont abouti au recensement de 162 barrages dans 15 pays différents qui ont pu nous fournir des données quant à la sédimentation de leur réservoir.

Sur cet échantillon, 126 disposent de données complètes sur lesquelles se basera notre comparatif. La répartition régionale de ces données est présentée sur la figure 13.

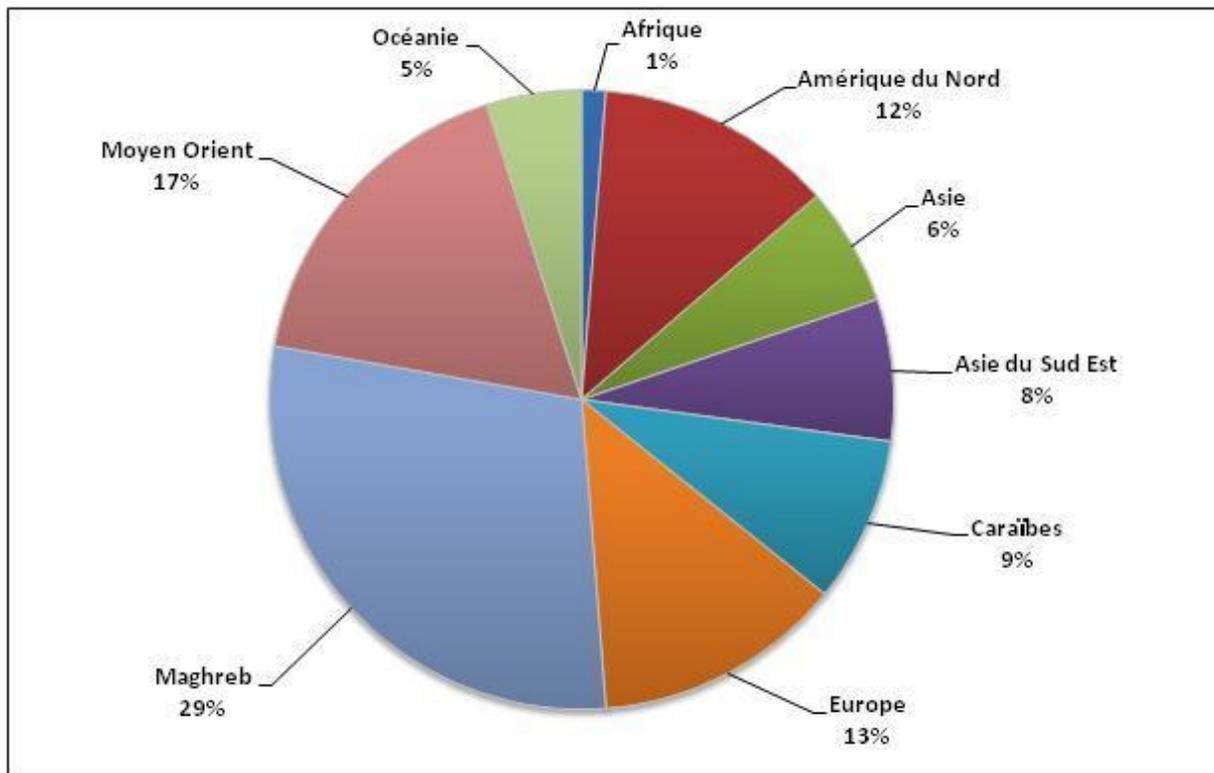


Figure 13 : Répartition régionale des différents barrages (ICOLD)

Le Maghreb représente près de 30% des données du fait des nombreux travaux dans la région suivi par le Moyen-Orient (17%) puis l'Europe (13%) et l'Amérique du Nord (12%). Les autres régions du monde contribuent à moins de 10% de l'échantillon total. Malgré l'hétérogénéité régionale des données, il est cependant possible d'entrevoir si certaines régions, plus que d'autres, connaissent des taux de sédimentation élevés.

2. Distribution des barrages étudiés par surface de drainage

Il s'agit ici de dresser la distribution de la surface des bassins étudiés afin de rendre compte de leur répartition (Fig.14). S'intéresser à la taille des bassins permet de situer ainsi les bassins indonésiens par rapport aux autres.

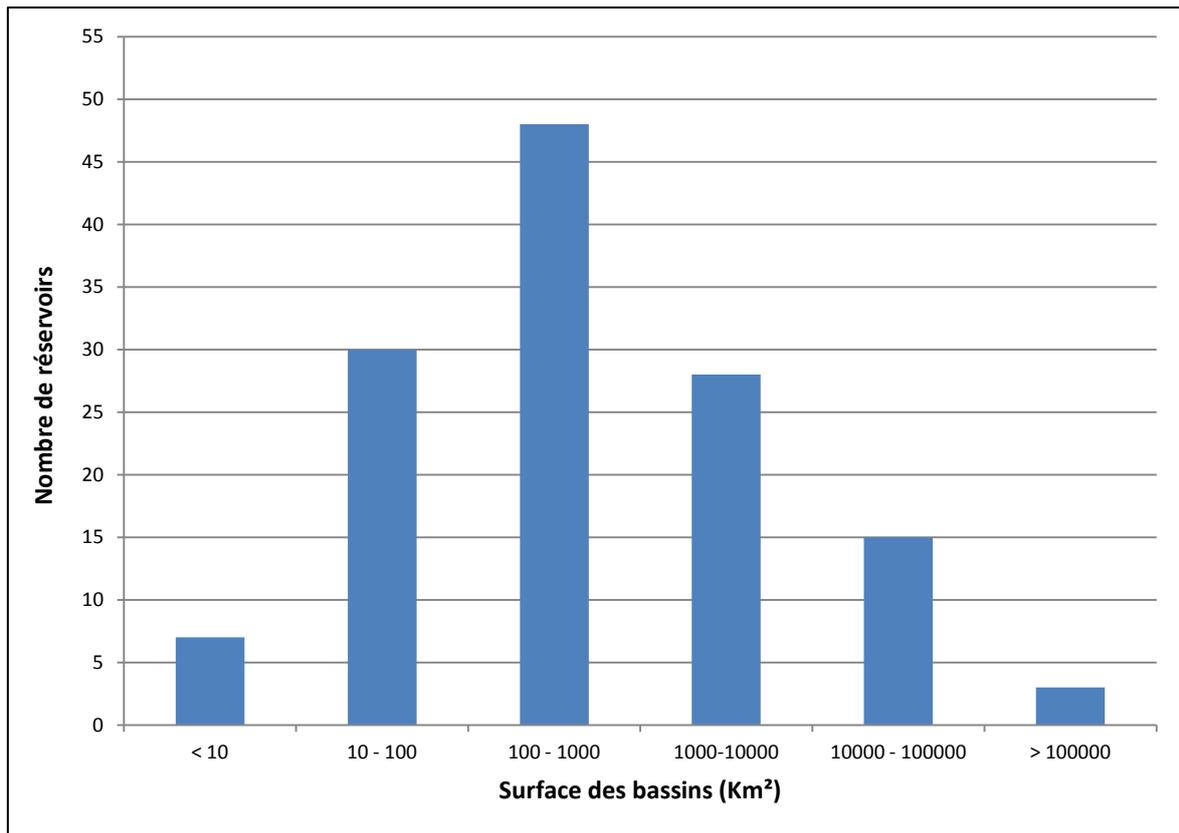


Figure 14 : Distribution des barrages en fonction de la taille du bassin (ICOLD)

On constate ici que les barrages les plus représentés sont ceux qui possèdent un bassin compris entre 100 et 1 000 km² (48 barrages) suivi de ceux compris entre 10 et 100 km² (30) puis ceux compris entre 1 000 et 10 000 km² (28).

3. Distribution par volume initial des réservoirs

Le volume des réservoirs (Fig. 15) permet d'observer un potentiel rapport entre vitesse de sédimentation et taille de réservoirs. Il est ainsi possible de constater quels peuvent être les réservoirs connaissant la sédimentation la plus rapide.

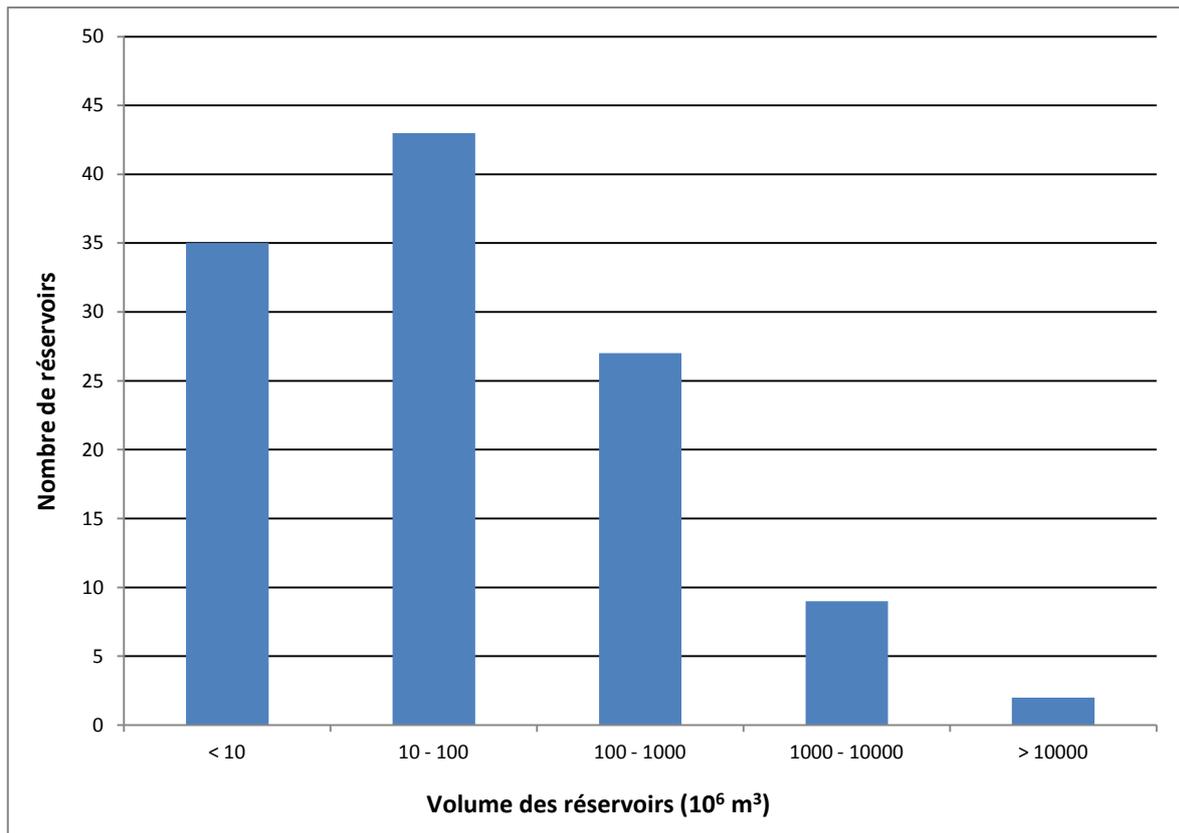


Figure 15 : Distribution des barrages en fonction du volume initial du réservoir (ICOLD)

Sur les 162 barrages étudiés, seuls 116 possèdent des données quant à leur volume initial. La catégorie la plus fournie est celle des réservoirs ayant une capacité comprise entre 10 et $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ avec 43 barrages.

Les trois figures présentées ci-dessus permettent de faire état de la distribution des données acquises. Selon la région, la taille du bassin versant ou encore la taille des réservoirs, les données auront plus ou moins de pertinence. Par exemple, il n'y a que très peu de données sur les petits bassins ($< 10 \text{ km}^2$) ainsi que pour les plus vastes d'entre eux ($> 100\,000 \text{ km}^2$). Les bassins de grande taille sont plus difficiles à étudier – avec des volumes de sédiments plus difficiles à quantifier – alors que les plus petits bassins présentent un intérêt moindre car peu exploitables pour l'hydroélectricité ou l'irrigation. Cependant, la partie suivante par croisement et lissage des données, va nous permettre une exploitation plus poussée des données afin d'en dégager les grandes tendances propres à chacune des régions du monde représentées.

B. Analyse des données de sédimentation pour les barrages étudiés

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur le taux de sédimentation. La représentation des données sous forme graphique permet de comparer plus aisément les différents barrages et d'entrevoir si des éléments peuvent jouer un rôle majeur dans la compréhension des rythmes de sédimentation. Afin de représenter les données dans un même tableau, il est nécessaire qu'elles soient comparables entre-elles. Pour cela, il faut alors rapporter les volumes de sédiments déposés à la taille du bassin versant, en tenant compte de la durée du suivi de chacun des barrages. Les chiffres sont donc présentés en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. Cette méthode permet alors de faire mettre en évidence les pays où peut être constaté une vitesse de sédimentation élevée ainsi que le nombre de barrages concernés.

1. Étude des taux de sédimentation

Le tableau 4 montre la répartition des données par pays et par classes de vitesse de sédimentation. Ainsi apparaît le nombre de barrages étudiés par pays ainsi que les taux de sédimentation pour chacun d'entre eux (du vert pour les taux faibles, au rouge pour les taux élevés). Le premier constat qui peut être apporté est que la grande majorité des barrages (75%) se situe dans les deux premières classes avec des taux assez modérés (inférieurs à $2\,000\text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$). Pour les réservoirs qui connaissent des taux de sédimentation supérieur à $2\,000\text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$, plusieurs pays se démarquent. L'Algérie présente ainsi 4 réservoirs (soit 17% de l'effectif étudié pour ce pays) avec ce type de taux de sédimentation, ainsi que la Tunisie avec la moitié de ses 14 réservoirs au-dessus de cette valeur. Ces résultats montrent combien la sédimentation est particulièrement active dans le Maghreb. En Asie, Taiwan semble connaître les taux de sédimentation les plus forts puisque les 5 réservoirs pour lesquels nous disposons de données ont des taux supérieurs à $4\,000\text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. Enfin, l'Indonésie aussi est soumise à des taux élevés avec 2/3 des réservoirs étudiés au-dessus des $2\,000\text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ (8 réservoirs sur 12).

	< à 1000 m ³ /km ² /an	1000-2000 m ³ /km ² /an	2001-3000 m ³ /km ² /an	3001-4000 m ³ /km ² /an	4001-5000 m ³ /km ² /an	5001-6000 m ³ /km ² /an	6001-7000 m ³ /km ² /an	7001-8000 m ³ /km ² /an	8001-9000 m ³ /km ² /an	9001-10000 m ³ /km ² /a	> à 10000 m ³ /km ² /an	Total
Algérie	17	3		1		2		1				24
Australie	6	2										8
Autriche		2					1					3
Chine	2											2
Egypte	1											1
Etats-Unis	16										1	17
Ethiopie			1									1
France		1										1
Gde Bretagne	1											1
Inde		1										1
Indonésie	3	1	2	2	3		1					12
Iran	1	2										3
Italie	5	1		1								7
Maroc	4											4
Pologne	2											2
Porto Rico	7	4	2	1								14
Roumanie	4	2										6
Taiwan					1		1	1		1	1	5
Tunisie	3	4	2	3	2							14
Total	72	23	7	7	6	2	3	2	1	1	2	126

Tableau 4 : Répartition des barrages étudiés par taux de sédimentation

2. Rapport taille du bassin versant / vitesse de sédimentation

À la lumière du tableau précédent, il s'agit désormais de comprendre ce qui provoque des remplissages aussi rapides pour les réservoirs mis en évidence. La taille du bassin-versant peut-elle contribuer à la vitesse de sédimentation ? Existe-t-il une disparité régionale pour les réservoirs ayant un bassin de surface quasi-égale ? La figure 16 se fonde sur les données extraites du tableau présenté en annexe 1 pour répondre à ces questions.

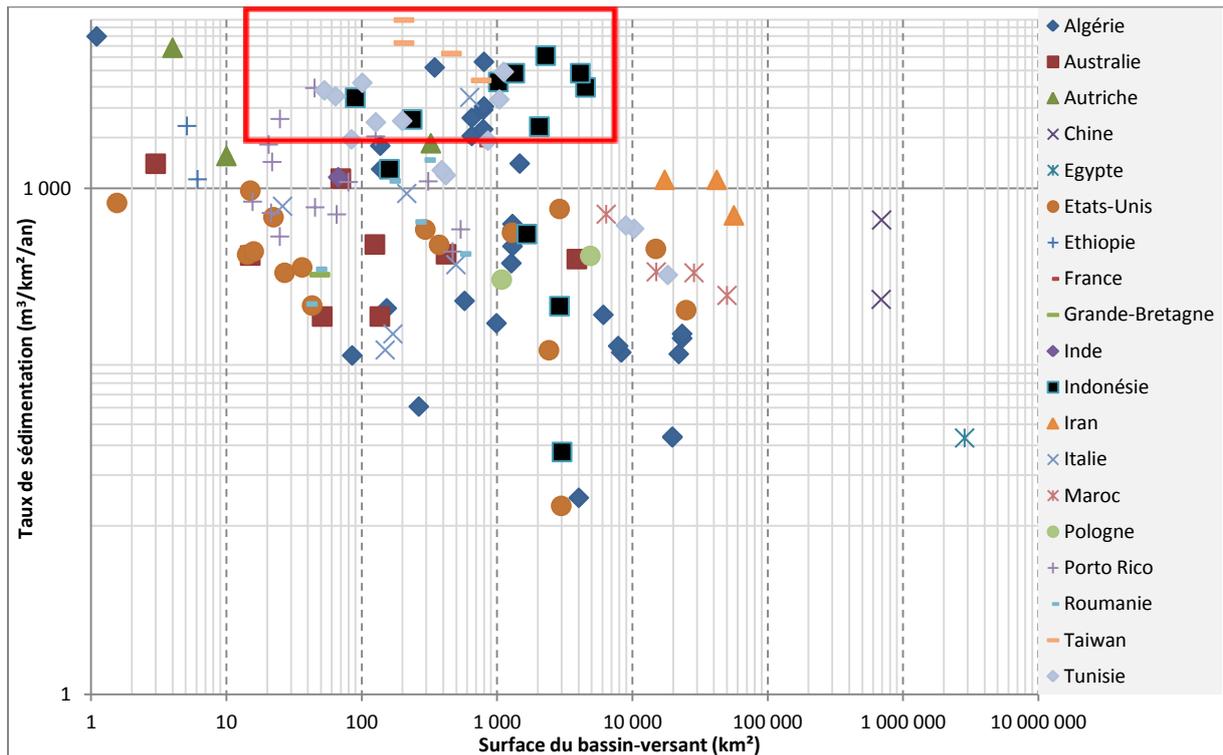


Figure 16 : Vitesse de sédimentation et surface du bassin-versant

(Dans le rectangle rouge taux > à 2000 m³/km²/an)

En fonction de la taille du bassin nous pouvons suivre les vitesses de sédimentation pour les différents pays analysés. On retrouve un taux de sédimentation élevé dans les bassins de petite taille alors que lorsque la taille du bassin augmente les taux diminuent. Ceci est bien visible pour l'Algérie, Taiwan ou encore l'Iran. En classant les barrages en fonction de la superficie de leur bassin-versant respectif il est possible de distinguer quels pays, à surface de bassin égale, présentent les taux de sédimentation les plus importants. En se concentrant sur les 3 classes les mieux représentés d'après la figure 16, il apparaît que les pays présentant les vitesses de sédimentation les plus élevées sont l'Indonésie avec 8 barrages (sur 12), l'Algérie avec 8 barrages (sur 28) et la Tunisie avec 7 barrages (sur 14). Il s'agira de comprendre ce qui explique des chiffres si élevés dans ces pays, en particulier en Indonésie.

3. Rapport durée du suivi / vitesse de sédimentation

En fonction de la durée de suivi des réservoirs, les données sont plus ou moins représentatives de la sédimentation moyenne (Fig.17). En effet, si le suivi n'est que de quelques années, il se peut que les données concernent une période sédimentaire anormalement faible ou anormalement forte causée par un ou plusieurs évènements « exceptionnels ». Au contraire certains barrages suivis dès leurs mises en eau permettent, quant à eux, de refléter correctement les conditions sédimentaires « naturelles » du bassin.

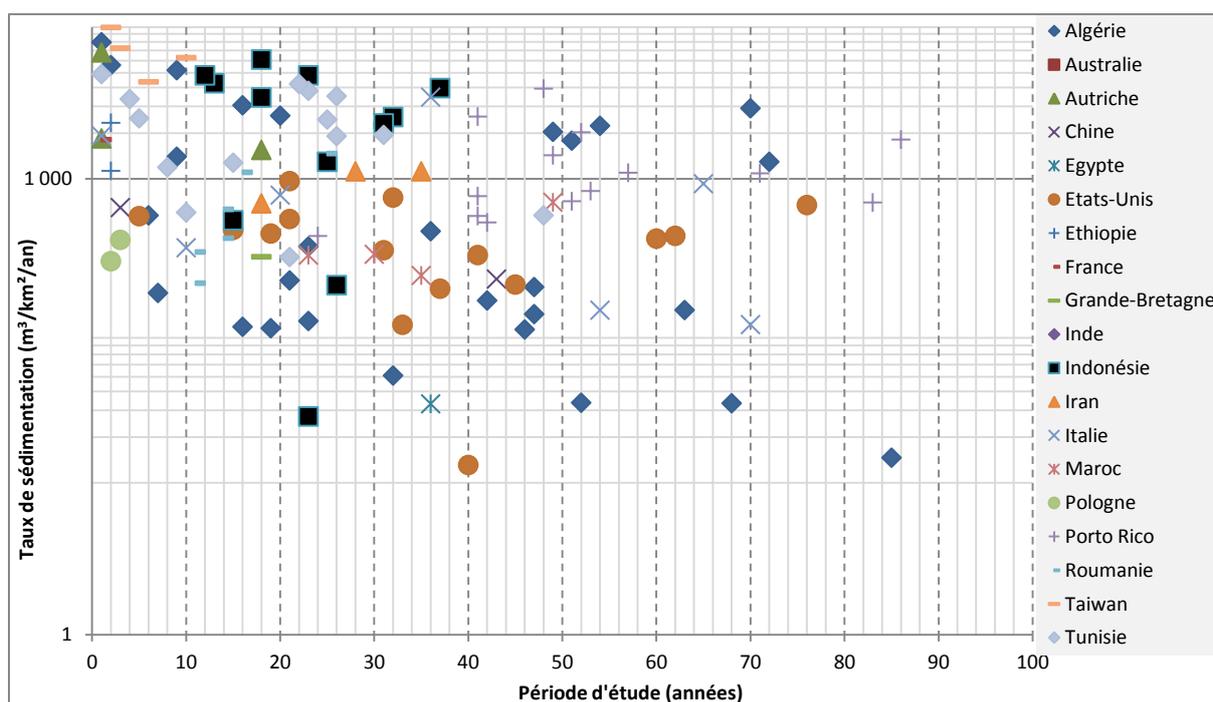


Figure 17 : Vitesse de sédimentation et période d'étude

Il faut cependant distinguer ici les barrages dont les données de périodes d'étude sont complètes (dates de début et de fin du suivi connues) de ceux dont les données de périodes sont incomplètes. Ainsi, pour pallier à ce manque, la période d'étude adoptée est celle de la date de mise en eau du réservoir jusqu'aux dernières données acquises. La grande majorité des réservoirs est suivie sur une période comprise entre 10 et 30 ans, période assez longue pour être considérée comme représentative. L'objectif étant ici de voir si les barrages qui présentent ci-dessus des vitesses de sédimentation élevées sont associés à des périodes d'étude assez longues pour pouvoir tenir compte de ces résultats. La sédimentation des réservoirs de barrage réduit progressivement leur capacité utile et affaiblit à la longue leur fonction régulatrice à des degrés variés dans le monde. Dans les pays les plus touchés par ce phénomène, 10 à 20 % de la capacité initiale des réservoirs aménagés est ainsi déjà perdue.

La perte moyenne annuelle actuelle de capacité serait de l'ordre de 1 % à l'échelle mondiale (ICOLD). Malgré le caractère inéluctable de la perte de stockage dans le temps, il est cependant primordial de comprendre quels sont les facteurs qui y contribuent et de pouvoir les quantifier le plus précisément possible afin d'adapter les stratégies de gestion adéquates.

III. Les facteurs de la sédimentation dans les réservoirs de barrage

La partie précédente a permis de mettre en lumière la variabilité spatiale du phénomène en tenant compte de la durée de la période étudiée. Ces résultats nous montrent que certaines conditions favorisent des vitesses de sédimentation élevées. Cette partie va tenter de présenter quels sont les facteurs favorables à une forte production sédimentaire, à l'origine du remplissage rapide des réservoirs.

A. Les facteurs physiques

1. Un climat aux précipitations fortes

Les phénomènes climatiques sont des agents majeurs dans le déclenchement des processus érosifs. L'érosion est un processus naturel de la terre, il peut être un processus lent, ou encore prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable. L'intensité des précipitations et le ruissellement participent à l'érosion hydrique des sols.

L'impact des gouttes de pluie peut briser les agrégats et disperser les particules de sol pour ensuite les entraîner vers les points bas. Cette érosion par les gouttes de pluie est habituellement la plus forte lors d'orages de courte durée et de grande intensité. Même si l'érosion causée par des pluies de faible intensité et de longue durée n'est pas aussi spectaculaire ni aussi visible que celle produite par les orages, la perte de sol occasionnée peut être réellement significative après un certain temps. Le ruissellement se produit lorsque l'eau sur une pente ne peut s'infiltrer assez vite dans le sol ou être interceptée par des obstacles naturels. Le taux de ruissellement est souvent accru si l'infiltration est diminuée par la compaction ou la formation d'une croûte. On comprend alors que, sous un climat connaissant de fortes précipitations, l'érosion hydrique sera nécessairement forte. Dans la partie précédente nous avons vu que Taiwan est l'un des pays où les taux de sédimentation sont parmi les plus forts au monde avec des taux compris entre 4 366 et 10 838 m³/km²/an. Ce pays connaît une pluviométrie annuelle forte du fait que l'île se situe au niveau du tropique du Cancer où l'on retrouve un climat chaud tropical à saisons de

pluies. Les précipitations annuelles y sont supérieures à 2 500 mm causées par la mousson et accentuées par la présence de massifs montagneux. La côte connaît, quant à elle, beaucoup de typhons (trois à quatre par an) arrivant plutôt en juillet, août et septembre et pouvant déverser plus de 1 000 mm en une seule journée (ex : Typhon Morakot en 2009). 80% des pluies tombent au moment de la mousson d'avril à octobre alors que de la mi-mai à la mi-juin, il s'agit davantage d'orages de fin d'après-midi.

On constate ainsi que sous un climat ayant une forte pluviométrie avec alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, la quantité de sédiments mobilisée est alors importante. Ce processus est accentué dans les régions soumises à des phénomènes climatiques majeurs provoquant une intensité forte de précipitations dans un temps limité.

2. Des sols meubles facilement mobilisables

Le type de sol est aussi un facteur important dans la compréhension des phénomènes érosifs. En fonction de leurs compositions et de leurs structures, la vulnérabilité des sols varie considérablement face à l'érosion.

a. La texture et la stabilité structurale des sols

La texture du sol est définie par la grosseur des particules qui le composent. La figure 18 permet de classer les textures de sols en fonction de la composition en graviers, sable, limon et argile. Celles-ci sont exprimées en pourcentage.

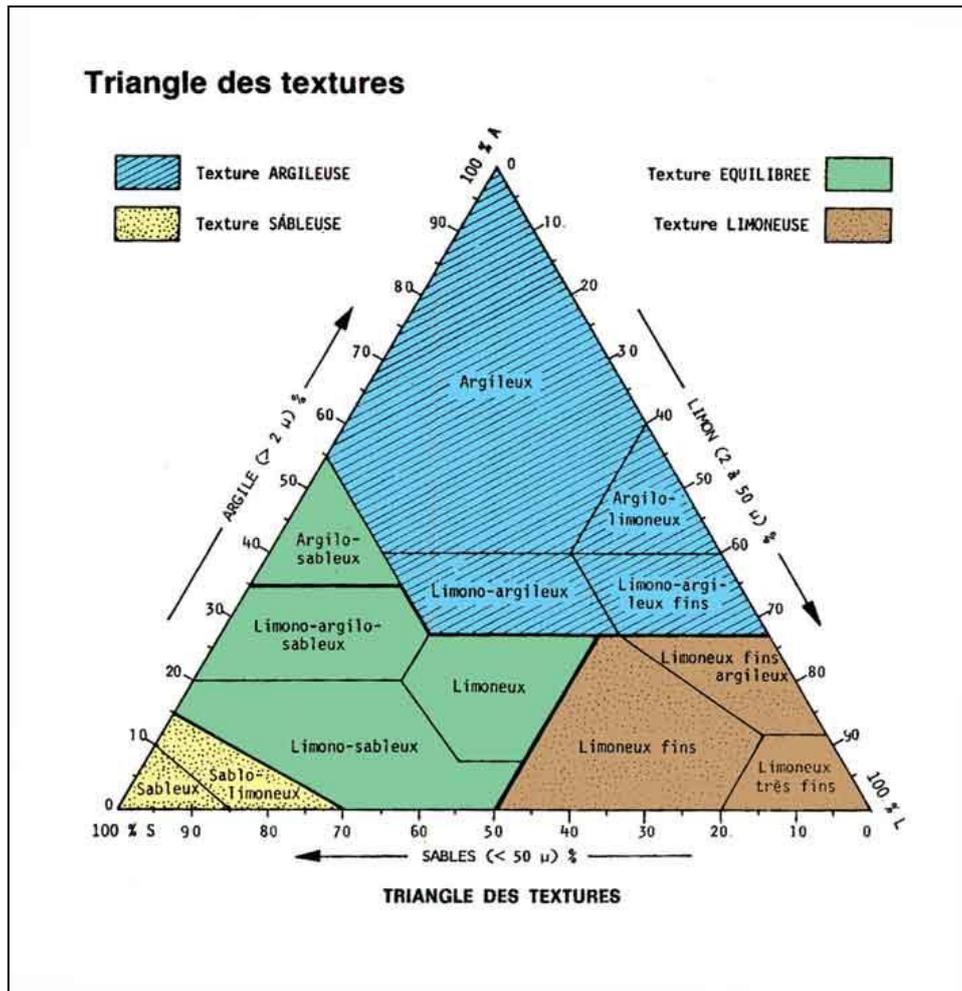


Figure 18 : Les différents types de sols

Les sols les plus sensibles sont les sols riches en limons et/ou sables fins, donc de particules à faible cohésion, facilement détachables et transportables par les eaux de ruissellement. Les sols sableux, avec leurs particules relativement espacées, permettent à l'eau de s'écouler rapidement. Leur structure instable (de faible cohésion) les rend très sensibles à l'érosion hydrique. Bien que tous les sols soient sujets à une éventuelle érosion hydrique, les sols limoneux sont les plus menacés. Sur les pentes longues ou abruptes, l'érosion par l'eau s'intensifie alors et le ruissellement peut atteindre une vitesse réellement importante. La structure superficielle des sols argileux, quant à elle, peut se dégrader et former une croûte de battance. Un sol argileux mouillé a tendance à se compacter et ainsi limiter l'infiltration, processus favorisant le ruissellement. Une forte sensibilité des sols à l'érosion associée à une pluviométrie forte contribue par conséquent à des taux de sédimentation élevés comme dans le cas de Taiwan, présenté à la page précédente.

L'érodibilité des sols désigne la facilité avec laquelle le sol va être érodé. Cette dernière dépend surtout de sa « stabilité structurale », c'est-à-dire de la résistance à la désagrégation d'un sol mettant en relief les propriétés qui donnent une cohésion au sol. La stabilité structurale est probablement le meilleur indice de l'érodibilité d'un sol.

Elle intervient dans le rôle joué par plusieurs facteurs influençant le taux d'érosion, notamment :

- sur la taille des produits de la désagrégation : une faible stabilité structurale conduit à une désagrégation plus intense. Dans ce cas, les produits de la désagrégation (les micro-agrégats) sont petits et donc plus facilement détachés et transportés,
- sur la formation d'une croûte de battance : la désagrégation des agrégats à la surface du sol crée une couche fine à la surface où la porosité se réduit et où, en revanche, la densité apparente sera plus importante.

Presque tous les sols sans couvert végétal forment une croûte de battance. Les sols à faible stabilité structurale sous l'impact des gouttes de pluie formeront très rapidement ces croûtes, tandis que ces dernières se formeront plus lentement sur des sols à forte stabilité structurale. Les sols pauvres en argile et/ou riches en limon ou en sable fin sont ainsi très sensibles à la battance.

D'autres caractéristiques intrinsèques au sol le rendent plus sensible à l'érosion comme pour les sols limoneux à faible teneur en matières organiques. En effet, la matière organique du sol est composée de débris organiques frais ou en décomposition, d'organismes vivants et d'humus. La matière organique est constamment accumulée et décomposée. Elle joue donc un rôle central dans l'entretien du sol et sa stabilité structurale permettant notamment de lutter contre l'érosion, d'améliorer la capacité de rétention en eau et de limiter la compaction du sol. Ainsi, elle crée des conditions aérées favorables à la fixation des plantes. L'érosion entraîne une perte irréversible de sol et limite alors ses capacités ultérieures de production.

b. Un cas d'école : le plateau des loess en Chine centrale

Le plateau des loess (Fig. 19) est un territoire vaste d'environ 275 000 km² (Zhang et al., 1991). Il constitue l'empilement de dépôts éoliens le plus important existant à la surface de la terre avec des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.

Ces loess poreux et friables provenant de la déflation dans les déserts d'Asie centrale connaissent une érosion des sols très active. Le Huang Ho ou Fleuve Jaune – couleur causée par la couleur de l'eau chargée de sédiments – est le cours d'eau où la charge spécifique de matières en suspension est la plus élevée du monde avec un encaissement de sa vallée de plusieurs centaines de mètres. Selon Douglas (1989), l'érosion du bassin-versant du Huang Ho a été estimée à 2 100 t/km²/an à laquelle on attribue pour 90% la part de la contribution du plateau des loess. Ce sont environ 1,6 milliards de tonnes de sédiments qui sont charriés annuellement par le fleuve. C'est ainsi que les dispositifs servant à retenir les sédiments dans le bassin du Fleuve Jaune en ont accumulé 329,5 x 10⁶ m³/an entre 1952 et 1995 (Zeng et al., 1999), démontrant bien que les réservoirs se remplissent à des vitesses extrêmement élevées dans les régions aux sols très sensibles à l'érosion.



Figure 19 : Érosion massive du plateau loessique chinois, province du Shaanxi, Chine - Octobre 2007 (JC Richardson)

La perte annuelle en sol à l'échelle mondiale serait actuellement de 5 à 7 millions d'hectares par an selon l'Organisation mondiale pour l'agriculture et l'alimentation (FAO)

3. Une topographie marquée accélérant le déplacement des matériaux mobilisés

Tous les processus érosifs connaissent une accélération importante sur les versants du simple fait de la gravité. En effet la topographie du terrain conditionne directement la gravité de l'érosion. Ainsi, plus le gradient de la pente sera élevé et plus l'érosion sera

facilitée. L'inclinaison de la pente est l'aspect topographique le plus important du fait que le débit – et en particulier la vitesse d'écoulement – détermine à quel moment les processus érosifs vont débiter. La vitesse dépend d'une part de la rugosité du sol et d'autre part de l'inclinaison de la pente, comme le montre les équations de Chezy (1769) et Manning (1889). La transition entre érosion diffuse et érosion linéaire est donc en partie déterminée par l'inclinaison de la pente.

L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente qui occasionne un ruissellement plus rapide et, dès lors, un plus grand lessivage des sols. Son rôle est moindre sur de très courtes pentes (quelques mètres) que sur de plus longues puisque le ruissellement a besoin d'une certaine distance pour atteindre sa vitesse d'écoulement maximale. Toutefois la longueur de pente a un impact plus limité que l'inclinaison. Au-delà d'une centaine de mètres, la longueur a peu d'influence puisque la vitesse d'écoulement maximale a déjà été atteinte. Un certain équilibre s'opère entre les apports d'eau venant de l'amont et les départs d'eau en aval.

B. Les facteurs anthropiques

1. Une pression démographique forte

La présence humaine sur un territoire a pour conséquence de modifier ce dernier. Par l'occupation qu'elle en fait, le milieu peut être soumis à une dégradation rapide des sols selon la manière dont ils sont exploités. La densité démographique incite à augmenter la fréquence des récoltes sur une parcelle donnée par l'intensification de l'utilisation du sol. En effet, si la pression démographique augmente, le temps de jachère diminue et le sol se dégrade progressivement. Cette dégradation est provoquée par un glissement des systèmes extensifs d'utilisation du sol vers des systèmes plus intensifs : sur une même superficie, les récoltes ont alors lieu à intervalles plus rapprochés. Certains auteurs prétendent que l'érosion augmente en fonction de la densité de la population. Il est vrai que dans un système agricole donné, si la population dépasse un certain seuil, les terres viennent à manquer et les mécanismes de restauration des sols se grippent (Pieri, 1989). Ainsi, en zone soudano-sahélienne, dès que la population dépasse 20 à 40 hab./km², le temps de jachère diminue et devient inefficace : on parle alors de zone dense dégradée dès que la population atteint une centaine d'habitants par kilomètre carré.

En revanche, dans d'autres zones tropicales plus humides, à deux saisons culturales ou sur des sols plus riches – volcaniques – comme à Java, on ne parle de forte densité qu'au-delà de 250 à 750 hab/km². En un siècle et demi, la jachère-forêt a disparu au profit de terres irriguées et de la constitution de terrasses alors que la population a été multipliée par dix. Ceci montre que des populations en expansion sont capables d'adapter leurs méthodes de production pour améliorer la fertilité du sol. Afin de mieux appréhender ce phénomène, il convient donc de prendre en compte les qualités intrinsèques des sols et les techniques de mise en valeur pour pouvoir juger des conséquences négatives de l'augmentation de la densité de population.

2. Le défrichement massif des surfaces boisées

Pour répondre aux besoins croissants d'espaces en faveur de l'installation humaine et de l'agriculture, les surfaces boisées tendent dans toutes les régions du monde à décroître fortement. Ces surfaces défrichées n'offriront plus le rempart nécessaire à la protection des sols et les exposeront donc plus facilement aux agents érosifs.

a. Une ressource en danger

Les forêts, sont des formations végétales indispensables à la vie sur Terre. Ce sont des sources de nourriture, de refuge, de combustibles, de vêtements et de médicaments pour de nombreuses populations. Ainsi, selon la FAO, 60 millions de personnes dépendent presque entièrement des forêts ; 300 millions vivent dans ou aux alentours des forêts et plus de 1,6 milliard de personnes dépendent à divers degrés des forêts pour vivre. Les forêts abritent aussi de nombreux "points chauds" de biodiversité et jouent un rôle prépondérant dans la fixation du CO² que nous émettons massivement et qui perturbe dangereusement notre climat : 40% du carbone terrestre est stocké dans les sols des forêts et la végétation. D'après les conclusions d'une enquête mondiale par télédétection, la superficie totale des forêts du monde totalisait 3,69 milliards d'hectares en 2005, soit 30% de la superficie mondiale (FAO, 2011). Selon le *World Resources Institute*, 80% de la couverture forestière mondiale originelle a été abattue ou dégradée, essentiellement au cours de ces 30 dernières années.

b. Une accélération de la déforestation

Entre 1990 à 2000, la FAO considère que plus de 14,2 millions d'hectares de forêts ont disparu entraînant des conséquences quasi irréversibles à notre échelle.

Cette tendance s'est alourdie puisque de 2000 à 2005, 15,2 millions d'hectares de forêts ont été détruits, soit l'équivalent de 40 terrains de football par minute (FAO, 2011). Ces pertes sont cependant en partie compensées par le reboisement. Ainsi, la perte nette de superficies boisées fut de 4,9 millions d'hectares par an de 1990 à 2000, contre 6,4 millions d'hectares par an dans les années 1990. Le déclin s'accélère et la reforestation ne peut compenser, dans un temps court, les pertes d'espèces qui vivaient dans les forêts défrichées. Aussi, le reboisement volontaire masque trop souvent la plantation d'espèces non adaptées à leur milieu ou ne favorisant pas une richesse de biodiversité. La déforestation cause de nombreux problèmes aussi bien pour l'Homme que pour les autres espèces puisque on estime que 27 000 espèces animales et végétales disparaissent chaque année à cause de celle-ci. La déforestation touche toutes les forêts tropicales, en particulier celles d'Amazonie, d'Afrique équatoriale et d'Asie du Sud-est. Le déboisement détruit également les sols, rendant les terres improductives, particulièrement en zones tropicales et les expose au ruissellement, source d'inondations. Sans compter que les forêts jouent également un rôle essentiel dans le cycle de l'eau, qu'elles stockent et régulent.

c. Les principales causes de la déforestation

L'expansion agricole est la principale cause de déboisement dans le monde : les plantations de palmiers à huile, le développement des cultures pour l'élevage industriel, l'exploitation minière de métaux et de minéraux précieux constituent des causes majeures de déboisement. Beaucoup de petits agriculteurs pauvres et itinérants, participent aussi à la déforestation : ils défrichent et brûlent les forêts pour ensemercer de petites parcelles de terres. Ainsi, au Brésil, les forêts primaires sont détruites pour cultiver le soja qui alimente le bétail et cultiver la canne à sucre afin de produire du bioéthanol, tandis qu'en Indonésie, les forêts sont rasées pour au bénéfice de l'huile de palme qui inonde déjà les produits de nos supermarchés et pourrait bientôt alimenter nos voitures. Enfin, l'extraction du pétrole et du gaz y joue aussi un rôle puisque de vastes étendues de forêts sont régulièrement endommagées par les forages et la pose de pipelines, sans parler des fuites régulières de pétrole ou encore l'exploitation des sables bitumineux... L'exploitation illégale du bois joue également un rôle important dans la déforestation mais reste difficilement quantifiable faute de chiffres précis quant aux surfaces touchées. Toutefois, des travaux mettent bien en

évidence la relation entre déforestation et augmentation des taux de sédimentation (Paiva, 1988 - Tuan, 1993).

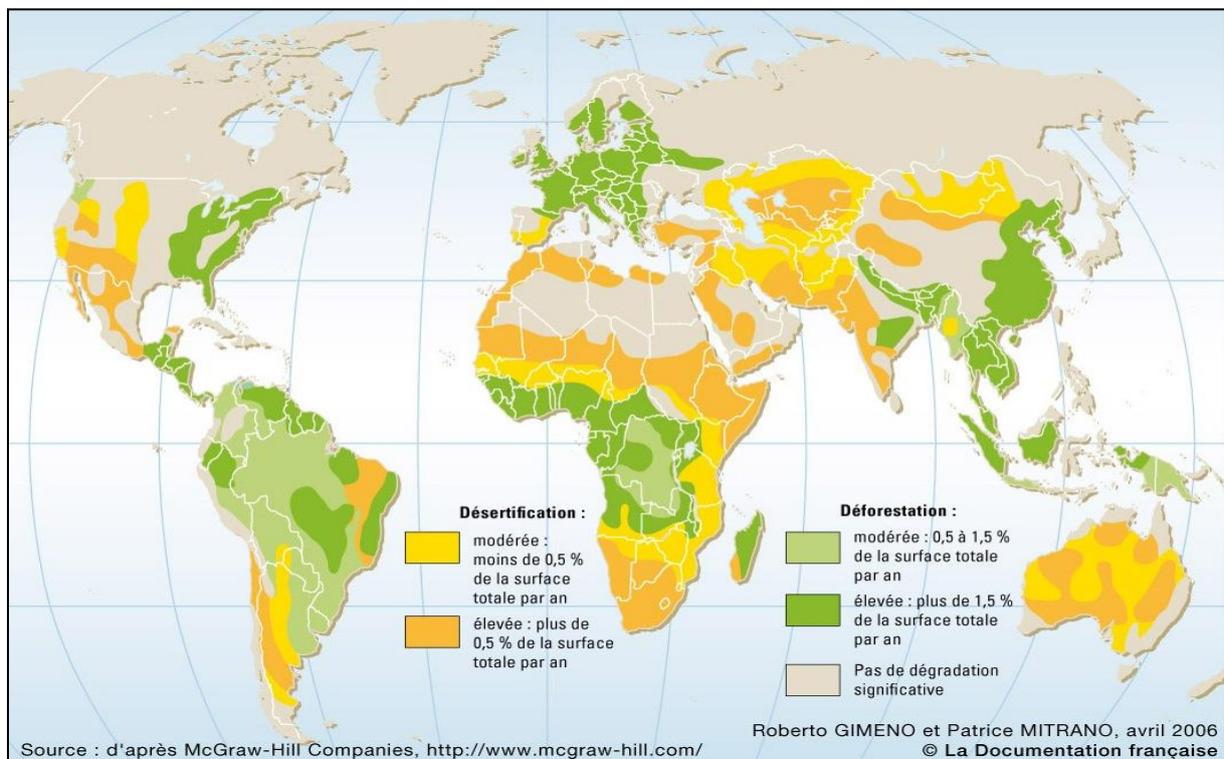


Figure 20 : Pertes des surfaces forestières mondiales

3. Des politiques agricoles qui influencent les taux d'érosion

La mise en place de vastes zones de cultures, pour répondre aux besoins croissants des populations, peuvent elles aussi favoriser et accélérer les processus érosifs, lorsque celles-ci n'ont pas été pensées de manière raisonnées.

Les sols ont de tout temps été confrontés au problème d'érosion. Ces dernières années cependant, face à l'évolution de l'agriculture, le phénomène semble s'être amplifié sur les terres agricoles, nécessitant une meilleure gestion de ces dernières destinées à en limiter l'impact. La couverture non-permanente de toutes les terres agricoles et la récolte de plantes sarclées combinée à des averses intenses (qui frappent localement certaines régions) contribuent à l'accroissement de l'érosion. Outre la perte de terres fertiles et de son impact direct sur la qualité des sols et des rendements agricoles, le phénomène érosif génère d'importantes conséquences en aval : de nombreuses régions sont régulièrement touchées par des coulées boueuses causant parfois des dégâts très importants aux infrastructures publiques et privées, ainsi que des pertes humaines. Une partie significative de ces

matériaux d'érosion, chargée d'engrais ou d'autres produits, peut même terminer son parcours dans des cours d'eau ou des réservoirs.

En plus des facteurs physiques, les acteurs « sociétaux » peuvent influencer le risque érosif. Certaines cultures sont plus sensibles à un risque d'érosion que d'autres. Il existe un éventail important de mesures de lutte contre l'érosion. Elles peuvent être subdivisées en mesures relatives aux pratiques culturelles, en mesures structurelles et en mesures d'occupation du sol. Les mesures prises sur les terres qui ont pour but de limiter le déplacement des matériaux, doivent évidemment être préférées par des choix politiques aux mesures ayant pour but de combattre les symptômes.

IV. Un enjeu pour une gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin

On définit la gestion intégrée de la ressource en eau de la manière suivante : une approche globale considérant l'eau comme une ressource unique ayant des utilisations concurrentes et des interactions avec les systèmes écologiques, sociaux et économiques (Banque africaine de développement). En effet, de plus en plus de projets consistent à gérer les bassins-versants – et spécialement ceux dotés de grands barrages – de manière intégrée (*Integrated watershed management*) en tenant compte des objectifs sociaux, économiques et environnementaux. Ils cherchent également à satisfaire, de manière équilibrée, ces besoins interdépendants. En ce sens, les sols, la végétation, les animaux et les êtres humains font partie d'un bassin-versant et seront donc des facteurs à prendre en compte. Les bassins qui possèdent de grands barrages sont généralement très étendus et possèdent des fleuves qui ont une importance majeure pour la région dans lesquelles ils s'inscrivent. La construction de ces ouvrages, ainsi que leur gestion, requiert donc des moyens colossaux que les pays en voie de développement ont parfois du mal à assumer. C'est pourquoi de nombreux acteurs – le plus souvent internationaux – participent financièrement à la mise en place de ces grands projets tout en assurant un support technique sur le terrain. Cette approche est bien décrite dans les manuels de la Banque africaine de développement (2000) et du Partenariat mondial de l'eau, le *Global Water Partnership* (2009). Face à ces investissements impressionnants, on comprend dès lors l'importance de trouver des stratégies durables de lutte contre la sédimentation.

A. Les bailleurs de fonds - financeurs des grands barrages mondiaux

1. Les bailleurs de fonds multilatéraux

Il s'agit d'institutions internationales qui regroupent des banques multilatérales de développement en relation avec les gouvernements, des organisations rattachées à l'ONU mais aussi des organisations régionales. On peut citer, parmi elles, la Banque mondiale qui à travers ses deux principales institutions que sont la Banque internationale pour la reconstruction et le développement (BIRD) et l'Association internationale pour le développement (AID) dédit une grande partie de ses activités aux pays en développement ou aux pays bénéficiaires. Cette aide se traduit par l'accord de prêts ou de crédits sans intérêts et de dons pour des grands projets d'infrastructures comme la construction de barrages. Les Banques multilatérales de développement (BMD) sont des institutions qui fournissent un appui financier et de conseils sur des activités de développement économique et social aux pays en développement. Le terme « banque multilatérale de développement » désigne généralement le groupe de la Banque mondiale et les quatre banques régionales de développement ci-après :

- Banque africaine de développement
- Banque asiatique de développement
- Banque européenne pour la reconstruction et le développement
- Groupe de la Banque interaméricaine de développement

Ces banques ont de nombreux membres qui peuvent aussi bien être des pays en développement emprunteurs que des pays développés bailleurs de fonds et qui ne se trouvent pas nécessairement dans la région géographique couverte par l'institution.

Ces grandes institutions internationales jouent un rôle majeur pour la construction des barrages dans les pays en développement par leur financement mais aussi par leur soutien technique aux pays par l'envoi de nombreux experts. Sous l'impulsion des banques multilatérales de développement, différents pays ont pris des mesures pour mettre en place des politiques, des stratégies et des mécanismes pour une meilleure gestion des ressources en eau, basée sur l'approche de gestion intégrée. L'examen du travail effectué sur l'élaboration de politiques de gestion intégrée par un certain nombre d'institutions multilatérales de développement et de bailleurs de fonds a permis de tirer des leçons de leurs expériences afin d'adapter leurs politiques. La Banque mondiale dans le secteur de l'eau se base fortement sur le retour d'expérience et a fourni des données de base utiles.

Plusieurs points font l'objet d'attentions :

- l'importance critique de l'approche intégrée qui implique une analyse des rapports intersectoriels ;
- la nécessité de tenir compte des objectifs sociaux, environnementaux et économiques ;
- l'amélioration de la gestion des ressources en eau internationales ;
- la décentralisation de la gestion au niveau des bassins fluviaux ;
- l'utilisation des coûts d'opportunité pour la fixation des tarifs de l'eau ;
- et la participation des parties prenantes.

2. L'aide bilatérale

Un second type d'aide au financement des grands ouvrages est l'aide bilatérale qui est accordée directement par un gouvernement à celui d'un autre pays. Elle constitue l'une des formes d'aide publique au développement (APD) qui représente les sommes les plus importantes. Aujourd'hui, l'aide bilatérale est caractérisée par un soutien budgétaire direct et un appui ciblant certaines activités effectuées directement en lien avec les pays bénéficiaires de l'aide. Les pays offrant un soutien bilatéral continuent de fournir une APD à partir de leurs fonds publics (souvent entre un 1% et 2% de leur PIB) au moyen de leurs propres organismes d'aide. Cependant, ils ont de plus en plus recours à l'aide indirecte offerte par des institutions multilatérales mettant en commun des ressources afin de s'attaquer à de grands projets d'infrastructures tels que la construction de grands barrages. Le groupe de la Banque mondiale travaille en partenariat avec des organismes de développement nationaux afin de mieux coordonner l'aide et atteindre de manière plus efficace les objectifs de développement. Ces travaux sont coordonnés par différents comités, dans le cadre de consultations tenues tout au long de l'année.

On peut citer les plus influents d'entre eux :

- Agence australienne pour le développement international (AusAID)
- Agence française de développement (AFD)
- Agence allemande pour la coopération technique GmbH (GTZ)
- Banque japonaise pour la coopération internationale (JBIC)
- Agence japonaise de coopération technique à l'étranger (JICA)
- Agence des États-Unis pour le développement international (USAID)

L'intervention de ces organismes pour la gestion et la conservation des bassins possédant un ou plusieurs grands barrages est de trois types : l'assistance technique, l'aide-projet et l'aide-programme. Pour ces trois interventions, il s'agit essentiellement d'une assistance technique avec apport d'expertise et de formation. Pour répondre sur le terrain aux demandes des financeurs, de nombreux experts sont appelés à mettre en œuvre les projets en concertation avec les administrations locales. Il est souvent fait appel à des ingénieurs recrutés comme consultants dans les domaines concernés. Plusieurs sociétés d'ingénierie se sont spécialisées dans l'intervention sur les programmes internationaux de gestion intégrée de bassins-versants comme *Nippon Koei* pour ce qui concerne l'Indonésie. L'aide à la construction de grands barrages par ces deux types d'aide est colossale. Par exemple, la Banque européenne d'investissement (BEI), qui est la Banque publique de l'Union européenne, a accordé depuis 2003 près de 900 millions d'euros de prêts aux grands barrages dans les pays du Sud.

Ces activités de gestion patrimoniale de la ressource exigent des financements sécurisés sur le long terme. Les organismes de bassin doivent calculer leurs coûts et les inclure dans des stratégies financières à moyen et long terme, de même que dans leurs budgets annuels.

3. L'importance du financement dans la gestion des grands bassins fluviaux

Le plan de financement fait partie intégralement du plan de gestion du bassin. Ce plan de financement indique précisément comment le plan de gestion sera financé, d'où l'argent proviendra et comment celui-ci sera dépensé. Sans une stratégie de financement, un plan de gestion par bassin est tout à fait inutile. Cependant, assurer des revenus, fiables sur le long terme, nécessite du temps. Finaliser un plan de gestion avant de trouver les financements pour le mettre en œuvre se traduit en général par un plan qui ne sera plus à jour lorsque les fonds seront enfin disponibles, voire qui devra être abandonné s'ils ne sont pas obtenus. L'expérience montre que les plans qui précisent l'origine des financements et la façon dont ils seront dépensés sont davantage susceptibles d'être mis en œuvre avec succès que des plans qui échouent à traiter cette question. Identifier les modes de financement permet également de se confronter aux réalités dès la phase d'élaboration du plan de gestion. Deux aspects de la gestion patrimoniale de la ressource nécessitent des financements. Premièrement, il est nécessaire de financer les activités institutionnelles ou non-structurelles (souvent appelées interventions « douces ») qui rendent possibles les autres actions. De telles activités sont au cœur de l'approche intégrée de la gestion des ressources en eau.

Il s'agit d'aborder les questions de gouvernance, notamment les mécanismes qui assurent la responsabilité et la transparence, les processus politiques, la planification, l'élaboration de règlements et leur application, la surveillance, la participation, le suivi, la collecte des redevances, l'acquisition et l'analyse des données, la recherche, le développement des capacités, les activités de sensibilisation et de communication. Deuxièmement, il est nécessaire de financer les tâches quotidiennes d'entretien indispensables à la « bonne santé du bassin » : collecter des données, superviser les ressources en eau, gérer les territoires, restaurer les cours d'eau, prendre des mesures préventives contre les plantes invasives et la pollution, gérer les sédiments se déposant dans les réservoirs de barrages, etc.

Ces activités de gestion patrimoniale de la ressource exigent des financements sécurisés sur le long terme notamment pour les infrastructures collectives qui peuvent concerner :

- le développement et la gestion des ressources en eau notamment par la construction de barrages de retenue et de digues pour la protection contre les inondations et les sécheresses, gestion du bassin (dont la gestion des sols, reboisement, lutte contre l'érosion), prévention contre la pollution et protection de l'environnement ;
- la fourniture de services : tels que l'hydroélectricité, les systèmes d'irrigation, l'approvisionnement en eau domestique et industrielle, l'assainissement et l'épuration, les voies d'eau navigables pour le transport fluvial, etc.

Cette partie montre bien que l'envasement des réservoirs fait partie prenante des questions auxquelles ces comités d'experts sont confrontés afin de préserver le lourd investissement financier des différentes institutions. Les gestionnaires des barrages sont en effet dépendants de ces sources de financement extérieures afin de gérer au mieux la sédimentation rapide des réservoirs.

B. La gestion intégrée des ressources en eau

Le consensus international sur la Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) développé au cours des dernières décennies, a été influencé par un certain nombre d'événements importants. Un des événements les plus significatifs est la Décennie internationale d'adduction d'eau potable et de l'assainissement des Nations unies (1981-90), également appelée la « Décennie de l'eau ». Celle-ci visait à fournir suffisamment d'eau potable et de services d'assainissement à tous.

À cette époque, l'objectif de volume suffisant d'eau potable a été fixé entre 20 à 40 litres par personne et par jour comme recommandé par l'OMS, bien que l'évaluation récente indique que le besoin minimal devrait être de 50 litres par personne et par jour réparti entre les quatre utilisations domestiques que sont : la boisson, l'assainissement, le bain et la cuisine. Suite à la Décennie de l'eau, la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement s'est tenue à Dublin en 1992. Celle-ci fut la conférence mondiale sur l'eau la plus significative depuis celle des Nations unies tenue à Mar de Plata en 1977. Cette conférence a fourni les principales données de base sur les problèmes d'eau douce pour la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (CNUED), qui s'est tenue à Rio de Janeiro en juin 1992. La CNUED visait à élaborer des stratégies et des mesures en vue de freiner et d'inverser les effets de la dégradation de l'environnement et de promouvoir un développement écologiquement sain et durable dans tous les pays. Un plan d'action global pour les années 1990 et se poursuivant au 21^{ème} siècle, appelé « Action 21 », a été élaboré comme base d'un nouveau partenariat mondial pour le développement durable et la protection de l'environnement dans un monde de plus en plus interdépendant. Les barrages édifiés dans les plus grands bassins fluviaux au monde, et plus particulièrement dans les régions tropicales, répondent à ces attentes en essayant de régulariser les stocks d'eau afin de répondre aux multiples demandes qui, pour leur part, ne cessent de croître. Mais ces barrages posent de nombreuses questions environnementales quant à leur construction et à leur impact à l'échelle du bassin. On a ainsi vu l'émergence de plusieurs institutions ces dernières décennies pour tenter de répondre à la question.

1. Le rôle essentiel de la Commission mondiale des barrages (CMB)

La Commission mondiale des barrages est une commission indépendante créée en 1997 à l'initiative de la Banque mondiale et de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) afin de résoudre les problèmes posés par la construction de barrages à travers le monde. Organe démocratique et critique, la CMB regroupe aussi bien les opposants que les acteurs engagés dans la construction des barrages (promoteurs, initiateurs, constructeurs, politiques, etc.).

Elle a pour rôle d'examiner l'impact des grands barrages en matière de développement et d'évaluer les options disponibles en ce qui concerne le développement des ressources en eau et en énergie ; et de mettre au point des critères, des lignes directrices et des normes acceptables à l'échelle internationale, concernant la planification, la conception, l'évaluation, la construction, l'exploitation et le contrôle des grands barrages, ou leur mise hors service. L'organisation vise ainsi à « instaurer une approche plus responsable de la construction des grands barrages en réalisant une étude à l'échelle mondiale de leurs coûts et avantages ». En novembre 2000, la Commission mondiale des barrages a publié son rapport final, *Barrages et développement : un nouveau cadre pour la prise de décisions*. Il s'agit du fruit d'un travail sans précédent associant les gouvernements, le secteur privé, les experts, les organisations internationales et la société civile à un processus participatif de réflexion mondiale. Cette institution internationale indépendante et pluridisciplinaire constitue depuis lors la référence à la fois en matière d'état des lieux des impacts des grands barrages mais aussi de recommandations pour la mise en œuvre des grands barrages.

2. Les organismes de bassins

Sur le terrain, l'acteur principal de la gestion intégrée de l'eau par bassin-versant est l'organisme de bassin. Ce type d'organisme regroupe tous les acteurs de l'eau d'un bassin-versant allant des représentants gouvernementaux aux citoyens. Les organismes de bassin sont en fait des tables de concertation et de planification. Leur principal rôle est l'élaboration d'un plan directeur de l'eau présentant les conditions du bassin-versant, les enjeux, les orientations et les objectifs à atteindre ainsi qu'un plan d'action pour répondre aux différents enjeux. Ces organismes ont le rôle délicat de concilier l'offre, la demande et la protection des ressources. La grande majorité des cours d'eau mondiaux jouissent d'une telle structure si bien qu'un Réseau international des organismes de bassin (RIOB) a vu le jour en 1994. Ce réseau a pour objet de promouvoir, comme outil essentiel d'un développement durable, la gestion intégrée des ressources en eau par bassin hydrographique. Dans cet objectif le RIOB s'efforce :

- de développer des relations permanentes entre les organismes chargés d'une telle gestion globale et de favoriser entre eux les échanges d'expériences et d'expertises ;
- de faciliter l'élaboration d'outils adaptés de gestion institutionnelle et financière, de connaissance et de suivi global des ressources en eau, d'organisation des banques de

données, de préparation concertée de schémas directeurs et de programmes d'actions à moyen et long terme ;

- de développer l'information et la formation des élus locaux, des représentants des usagers et des différents acteurs de la gestion de l'eau, ainsi que des dirigeants et des personnels des organismes chargés de la gestion de l'eau par bassin ;
- d'encourager l'éducation des populations sur ces questions ;
- de promouvoir ces principes dans les programmes de coopération internationale ;
- d'évaluer les actions engagées par les organismes membres et d'en diffuser les résultats.

Le terme de « gestion des bassins-versants » est un concept qui a beaucoup évolué au fil du temps. D'un sujet technique, il est devenu un programme avec de multiples facettes visant à créer une cogestion de la ressource.

Lorsque l'on considère le rôle d'un organisme de bassin, il est important de faire la distinction entre développement et gestion des ressources en eau d'une part, et fourniture des services d'eau d'autre part. La responsabilité pour le premier aspect – infrastructures associées à la gestion de la ressource – relève clairement du service public. Le second aspect en revanche – infrastructures pour les services d'eau – peut être, et est souvent, pris en charge par un éventail d'organisations publiques et privées, appartenant ou non au secteur de l'eau, et génèrent des recettes au profit du fournisseur. Le rôle de l'organisme de bassin lorsqu'il s'agit des infrastructures de services doit par conséquent être clairement délimité, au risque d'entraîner duplication ou confusion avec d'autres rôles. Par exemple, si l'organisme de bassin construit un système d'irrigation tout en étant, en même temps, chargé d'évaluer les impacts de ce système d'irrigation sur les ressources en eau et l'environnement, un conflit d'intérêt apparaît alors clairement. Il existe, bien sûr, des situations dans lesquelles la distinction est floue et les objectifs sont imbriqués les uns aux autres : c'est le cas, par exemple, lorsqu'un barrage à buts multiples sert à la fois à lutter contre les inondations et à stocker de l'eau pour l'irrigation, ou lorsque la gestion par bassin est combinée au développement de l'hydroélectricité. Ce qui importe, dans de tels cas, c'est que les organismes de bassin comprennent ces problématiques et évitent, dans la mesure du possible, les conflits d'intérêt. L'organisme de bassin sera confronté à un dilemme s'il gère à la fois des fonds de développement régional pour construire des infrastructures de services tout en recevant, en parallèle, de l'argent public pour la gestion patrimoniale du bassin.

Inévitablement, ce second rôle sera compromis. Séparer les responsabilités permet de minimiser les échecs de gouvernance et la corruption, et d'augmenter les chances d'atteindre les objectifs visés. Si l'organisme de bassin est chargé de fournir des services, il est alors préférable de confier le rôle de gestion patrimoniale de la ressource à une autorité publique de niveau supérieur.

Il est probable que l'organisme de bassin ne soit que l'un des nombreux acteurs impliqués dans la création d'infrastructures ; il devra donc travailler avec les autres acteurs. Il est possible que des mécanismes de partage des coûts soient nécessaires pour assurer une approche intégrée. Les projets de transfert inter-bassins posent des questions spécifiques en termes de financement. Le partage des coûts entre bassins ayant des implications politiques, les réponses se trouveront probablement au niveau régional ou national.

Dans certains pays, les organismes de bassin sont autorisés à recevoir et à gérer des subventions de la part de bailleurs ou à emprunter auprès de banques (locales ou internationales). Dans d'autres pays, la totalité des financements doit transiter par le gouvernement central.

Dans un cas comme dans l'autre, si les organismes de bassin sont à la recherche de financements externes de la part de bailleurs, ils doivent rencontrer ces bailleurs lors de la planification de tout programme – avec pour objectif de sécuriser un engagement de principe – et répondre aux exigences des bailleurs le plus tôt possible dans le processus d'élaboration du plan de bassin.

Dans le cas de projets d'infrastructures, des fonds doivent être identifiés et alloués non seulement pour la construction mais également pour les coûts continus d'opération et de maintenance une fois les infrastructures construites. Si l'organisme de bassin doit être chargé de l'opération et de la maintenance des infrastructures, alors ces coûts doivent être pris en compte dans les budgets de fonctionnement à long terme. C'est le cas de la lutte contre la sédimentation des réservoirs.

Traditionnellement, la responsabilité principale de nombre d'organismes de bassin a consisté à construire des infrastructures. Cependant, en raison des incidences négatives que peut avoir l'aménagement d'infrastructures sur le plan social et environnemental, certains gouvernements et agences de financement ont adopté des politiques visant à en minimiser les aspects négatifs. Pour cette raison, à la fin du 20^{ème} siècle, les agences de financement

sont devenues réticentes à l'idée de soutenir des projets portant exclusivement sur la construction d'infrastructures.

Il est toutefois possible de minimiser ces impacts négatifs tout en optimisant les avantages de projets d'infrastructures de l'eau. Ceci exige de tenir compte de l'impact de la construction d'infrastructures sur des dynamiques complexes entre société et écosystèmes, de consulter réellement tous les acteurs de l'eau et de prêter une attention particulière aux questions d'équité et de viabilité.

3. Une gestion qui tient compte des enjeux locaux et régionaux

La gestion intégrée des ressources en eau a pour fondement une approche écosystémique de la gestion des eaux basée sur les bassins-versants. Elle permet de mieux comprendre et d'expliquer les problèmes liés à la quantité et à la qualité de l'eau pour ses différentes utilisations puis de trouver des solutions s'inscrivant dans une perspective de développement durable. Cette approche permet également de mieux établir les priorités d'action en tenant compte des impacts cumulatifs sur le milieu.

La plupart des défis auxquels sont confrontés les gestionnaires de l'eau ne sont pas nouveaux. Cependant, compte tenu du fait que la nature et l'étendue des problèmes diffèrent d'une région à l'autre et d'un bassin à l'autre, les réponses varient fortement. Il n'existe pas, et ne peut exister, de solution unique. Ces défis exigent souvent des réponses de deux types : des réponses structurelles, comme le recueil des données, les infrastructures, l'opération et la maintenance des ouvrages et des réponses institutionnelles, qui traitent des questions telles que les politiques, la tarification ou les connaissances et l'information. Ces deux types de réponses sont importants et interdépendants. En raison des services qu'elles fournissent, les interventions structurelles ont tendance à être visibles, attrayantes sur le plan politique mais onéreuses. Ce sont pourtant celles-ci qui retiennent le plus d'attention. Les interventions institutionnelles, quant à elles, sont peu onéreuses, mais parfois conflictuelles d'un point de vue politique ou social et souvent moins tangibles. Malheureusement, celles-ci sont les plus négligées.

Ce chapitre montre l'enjeu d'une étude tenant compte des processus érosifs, du transport des matériaux sur les versants puis de leurs dépôts temporaires et définitifs dans les réservoirs, afin de comprendre l'impact de la sédimentation des réservoirs sur la gestion des ressources en eau. Comme dans beaucoup d'autres pays, l'état des ressources en eau en Indonésie est désormais au stade où l'action intégrée est nécessaire pour renverser les tendances actuelles de la surconsommation, de la pollution et de la menace croissante de sécheresses et d'inondations. Actuellement, plus de 5,5 millions d'hectares de terres agricoles sont irriguées par des systèmes d'irrigation techniques, alors qu'environ 1,6 million d'hectares sont irrigués par des systèmes d'irrigation traditionnels. Ceci a impliqué la construction ou la réhabilitation d'environ 12 500 structures de déviation et de 40 réservoirs (ICOLD). L'Indonésie a pu prolonger l'utilisation de ressources en eau progressivement pour soutenir ses 2 200 mégawatts issues de l'hydro-électricité, qui constituent actuellement environ 20% de la capacité électrique nationale. Les systèmes ruraux et urbains d'approvisionnement en eau livrent, quant à eux, près de 100 000 litres par seconde d'eau potable. Face aux défis liés à la croissance nationale, un meilleur contrôle de la sédimentation des réservoirs est primordial.

Le constat général est que nous assistons à un envasement rapide des réservoirs en lien avec un fort apport solide des zones amont mais actuellement peu d'études se sont intéressées aux taux et aux rythmes de cette sédimentation dont les causes sont multiples. Il est donc indispensable de se pencher sur les différents facteurs qui commandent cette production sédimentaire afin de pouvoir réellement déterminer les causes principales de cette rapide sédimentation des réservoirs, néfastes à l'utilisation optimale de ces lacs de barrage.

Parmi les aléas naturels (volcanisme, séismes, précipitations) bien présents mais difficilement contrôlables, nous nous intéresserons plus précisément à l'érosion des sols (fortement liée à ces phénomènes) ainsi qu'à ses conséquences sur la sédimentation des barrages, pièges à sédiments représentatifs de ces problèmes. Il s'agira de comprendre comment le milieu réagit face à ces perturbations croissantes (naturelles et anthropiques) à travers l'analyse du transfert des matériaux de l'amont vers l'aval.

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DU CADRE D'ÉTUDE : LES PRINCIPAUX BASSINS FLUVIAUX DE JAVA

Comme présentées dans le chapitre précédent, de nombreuses études ont été menées sur la sédimentation des réservoirs de barrage de par le monde. Différentes méthodes ont été utilisées pour quantifier les volumes bloqués par les barrages et les résultats montrent qu'ils restent cependant difficiles à évaluer (essentiellement pour une question de coûts financiers). Il a également été démontré que le phénomène s'avère plus ou moins rapide et important en fonction du pays où le phénomène est étudié. Ce second chapitre présentera le cadre d'étude de cette recherche à travers la description des grands traits morpho-climatiques et des multiples contraintes anthropiques qui font de l'île de Java un cadre naturellement propice à cette étude (Fig.21). Il est effectivement primordial de présenter les conditions dans lesquelles s'inscrivent les bassins choisis afin de comprendre en quoi ces derniers constituent un choix pertinent dans l'étude des rythmes et processus de sédimentation dans les lacs de barrage. L'échelle d'étude sera celle du bassin hydrographique. Celui-ci est, en effet, la seule unité géographique qui nous permette d'appréhender les impacts directs physiques et anthropiques sur les barrages, ainsi que les conséquences en aval de la gestion de ceux-ci. Toutefois, pour comprendre tous les tenants et aboutissants de la gestion de ces territoires, nous ferons appel à d'autres échelles d'analyse lorsque celles-ci s'avéreront nécessaires. Une approche administrative à l'échelle nationale, provinciale et régionale permettra de définir les différents enjeux à chacun de ces niveaux et les interactions existantes entre eux. Une approche à plus grande échelle mettra, quant à elle, en valeur des secteurs estimés comme représentatifs ou témoins d'un phénomène particulier pour étoffer la discussion. L'étude s'attachera en particulier aux secteurs en amont des barrages, du fait de leur influence directe sur le fonctionnement et la gestion de ces ouvrages.

Ces recherches sont menées sur plusieurs bassins qui permettent de mettre en lumière les similarités comme les différences que connaissent chacun de ces secteurs. En effet, une analyse approfondie de plusieurs bassins permet une meilleure représentativité spatiale des problèmes de sédimentation dans les réservoirs de Java. Notre choix s'est porté sur quatre

des plus importants bassins de l'île. Ce choix s'est tout naturellement imposé du fait que ces bassins témoignent parfaitement de l'enjeu que représente la gestion des grands barrages en Indonésie pour les décennies à venir. Les bassins étudiés occupent une superficie totale d'environ 40 000 km² soit 30% de la surface de l'île de Java.

- Le bassin-versant du Citarum

Notre premier terrain d'étude est le bassin hydrologique du Citarum à Java-Ouest. Celui-ci revêt un intérêt tout particulier puisqu'il draine Bandung, troisième ville indonésienne et capitale de province. Il assure également en grande partie les besoins en eau de Jakarta, capitale de l'Indonésie et 5^{ème} métropole mondiale. Le Citarum, d'une longueur de 269 km, est le principal fleuve de Java-Ouest. Ce dernier prend sa source sur le Mont Wayang (2 198 m d'altitude) et s'écoule dans un axe sud-est/nord-ouest pour rejoindre la mer de Java aux abords de la baie de Jakarta. Son bassin hydrologique s'étend sur 9 664 km².

- Le bassin-versant du Serayu

Situé dans la partie sud-ouest de la province de Java-Centre, le bassin du Serayu a une superficie d'environ 3 730 km². Le fleuve prend naissance sur le plateau du « complexe » volcanique de Dieng pour suivre, d'est en ouest, une dépression bordée par deux chaînes montagneuses ayant la même orientation et atteignant 1 300 m d'altitude au nord et 1 000 m d'altitude au sud. Il s'écoule ensuite sur la plaine côtière méridionale de Java avant de rejoindre l'océan Indien 15 km à l'est de la ville de Cilacap.

- Le bassin-versant du Solo

Le troisième terrain d'étude est le bassin hydrologique du Bengawan Solo. Celui-ci est le fleuve le plus long de Java avec une longueur de 540 km et avec un bassin d'une superficie de 16 258 km². Le Bengawan Solo prend source sur le versant sud-ouest du Mont Rahtawu, dans les montagnes volcaniques tertiaires du sud de la province de Java-Centre. Le fleuve va ensuite contourner le Mont Lawu dans le sens des aiguilles d'une montre pour s'écouler dans un axe sud-ouest/nord-est et se jeter dans la mer de Java à environ 30 km au nord-ouest de la ville de Surabaya, deuxième ville de l'archipel indonésien.

- Le bassin-versant du Brantas

Enfin, le dernier secteur d'étude est celui du bassin hydrologique du Brantas, d'une superficie de 11 844 km². D'une longueur de 320 km, le Brantas draine presque toute la province de Java-Est. Il prend sa source sur les flancs volcaniques du complexe Mont Arjuno-Welirang et va, comme le Solo dans sa partie amont, contourner dans le sens horaire les zones de relief formées par le complexe Mont Kawi-Butak et le volcan Kelud, pour ensuite se diriger vers le nord/nord-est et rejoindre la mer de Java au niveau de Surabaya.

Pour ces quatre bassins, nous distinguerons deux secteurs distincts : un secteur amont composé de complexes volcaniques plus ou moins anciens – où les fleuves présentés ci-dessus prennent source – et un secteur aval qui correspond à des zones de plaines alluviales. Le secteur où sont installés les barrages qui font l'objet de cette étude se trouve généralement à l'interface de ces deux domaines.

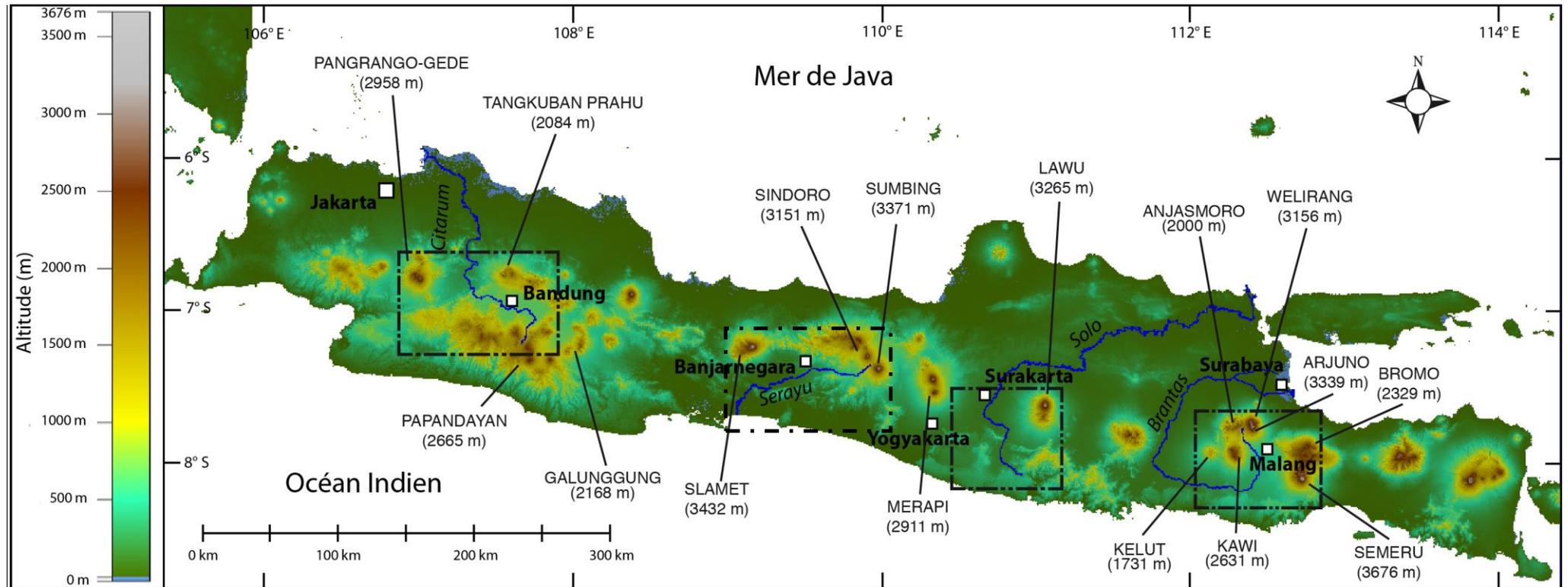


Figure 21 : Localisation des principaux fleuves et volcans et des secteurs d'étude (MNT USGS résolution 90 m)

I. Un cadre favorable à la production sédimentaire

A. Une topographie escarpée en amont s'ouvrant sur de vastes plaines alluviales

1. Des secteurs amont dominés par des volcans actifs

L'île de Java est bordée par un grand plan de subduction, expliquant ainsi la présence de nombreux complexes volcaniques. On compte plus d'une centaine de volcans sur l'île, dont une vingtaine encore considérés actifs. Cette caractéristique va fortement influencer la topographie des secteurs amont de chacun de nos terrains d'étude. En effet, les plus hauts sommets avoisinent les 3 000 m d'altitude dans tous les bassins (Fig.22 et Tab.5). Cet environnement volcanique va jouer un rôle majeur sur la charge solide dans les cours d'eau et par conséquent influencer de la même manière la vitesse de sédimentation des réservoirs (Lavigne, 2005).

Nom	Altitude (m)	Type	Dernières éruptions	Commentaires
Gede	2 958	Strato-volcan	Mars 1957	Env. 30 éruptions depuis le milieu du 18 ^{ème} siècle (dernière éruption en 1957)
Tangkuban Prah	2 084	Strato-volcan	Novembre 1985	Une dizaine d'éruptions phréatiques depuis le début du 20 ^{ème} siècle
Galunggung	2 168	Strato-volcan	Janvier 1984	5 éruptions historiques dont 2 d'entre elles ont été dévastatrices : 1822 : 4 000 victimes 1982 : retombées de cendres dans un rayon de 90 km et évacuation de 62 000 personnes.
Papandayan	2 665	Strato-volcan	Novembre 2002	Avalanche de débris en 1772 (3 000 victimes)
Merapi	2 911	Strato-volcan	Novembre 2010	69 éruptions du Merapi depuis 1548.
Lawu	3 265	Strato-volcan	?	Aucune éruption depuis 10 000 ans, mais dégagement de fumerolles dans les cratères, et enregistrement de séismes à proximité en 1978/79.
Arjuno-Welirang	3 339 - 3 156	Strato-volcan	Octobre 1950	
Kelud	1 731	Strato-volcan	Novembre 2007	Éruptions en 1990 et 1919 suivies de lahars.
Bromo	2 329	Caldeira	Novembre 2000	Réveil en 1995
Semeru	3 676	Strato-volcan	Juillet 2000	55 éruptions depuis 1818. Activité éruptive continue depuis 1967.

Tableau 5 : Descriptif des principaux volcans se trouvant dans les secteurs d'étude (www.volcano.si.edu/world/region.cfm?num=06&page=list)

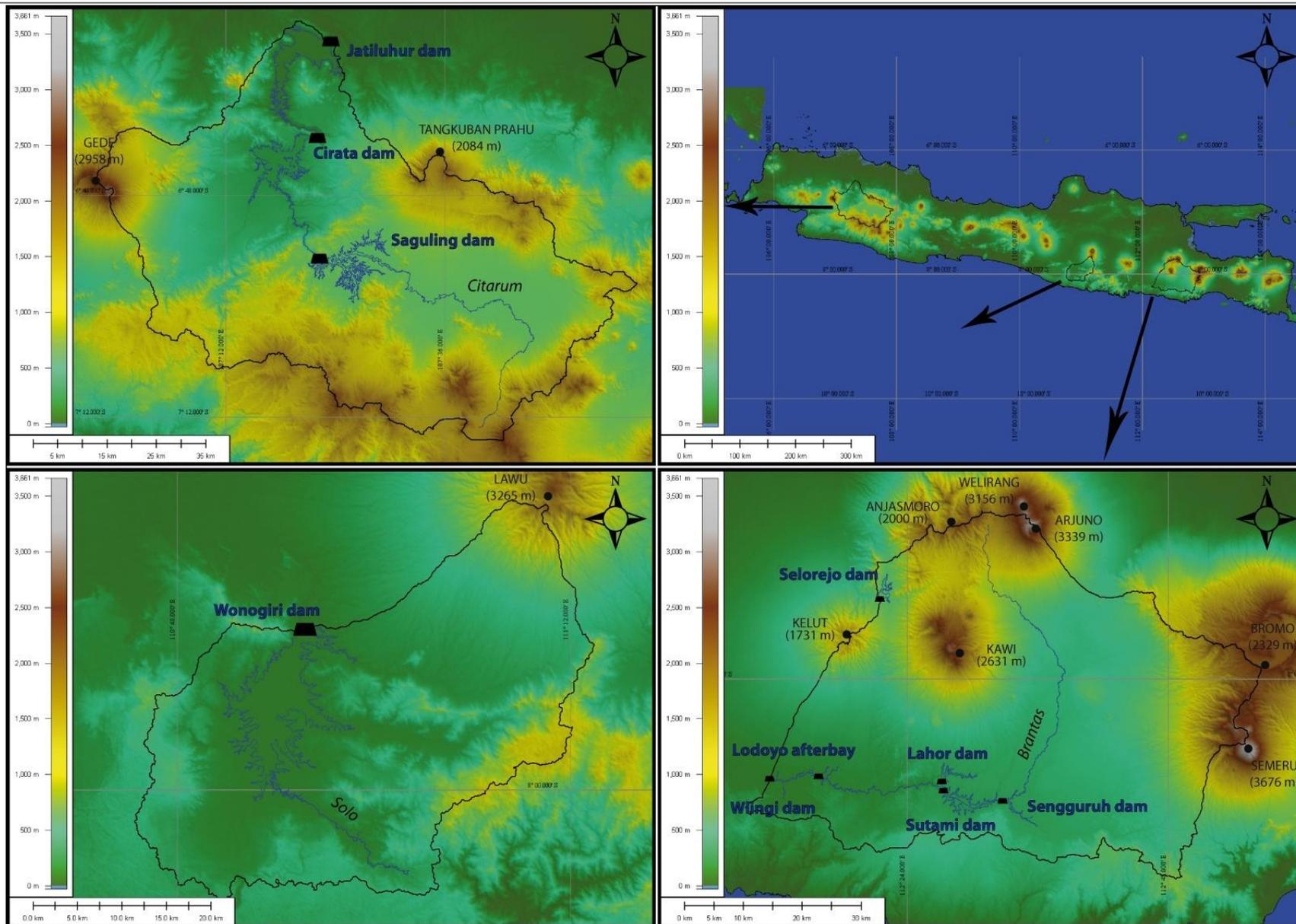


Figure 22 : Carte isohypse des trois principaux secteurs d'étude

2. De vastes plaines alluviales

La présence en nombre de complexes volcaniques à Java, explique la présence de pentes fortes ($>8^\circ$) qui vont favoriser l'érosion et fournir une charge solide élevée aux cours d'eau. Malgré tout, l'altitude moyenne de ces bassins reste relativement modérée. Ceci s'explique par la présence de larges plaines alluviales (comme le bassin de Bandung par exemple) où s'inscrivent les grands fleuves qui viennent connecter les versants des complexes volcaniques au littoral. Une grande partie des secteurs étudiés se trouve à une altitude inférieure à 1 000 m (Fig.23).

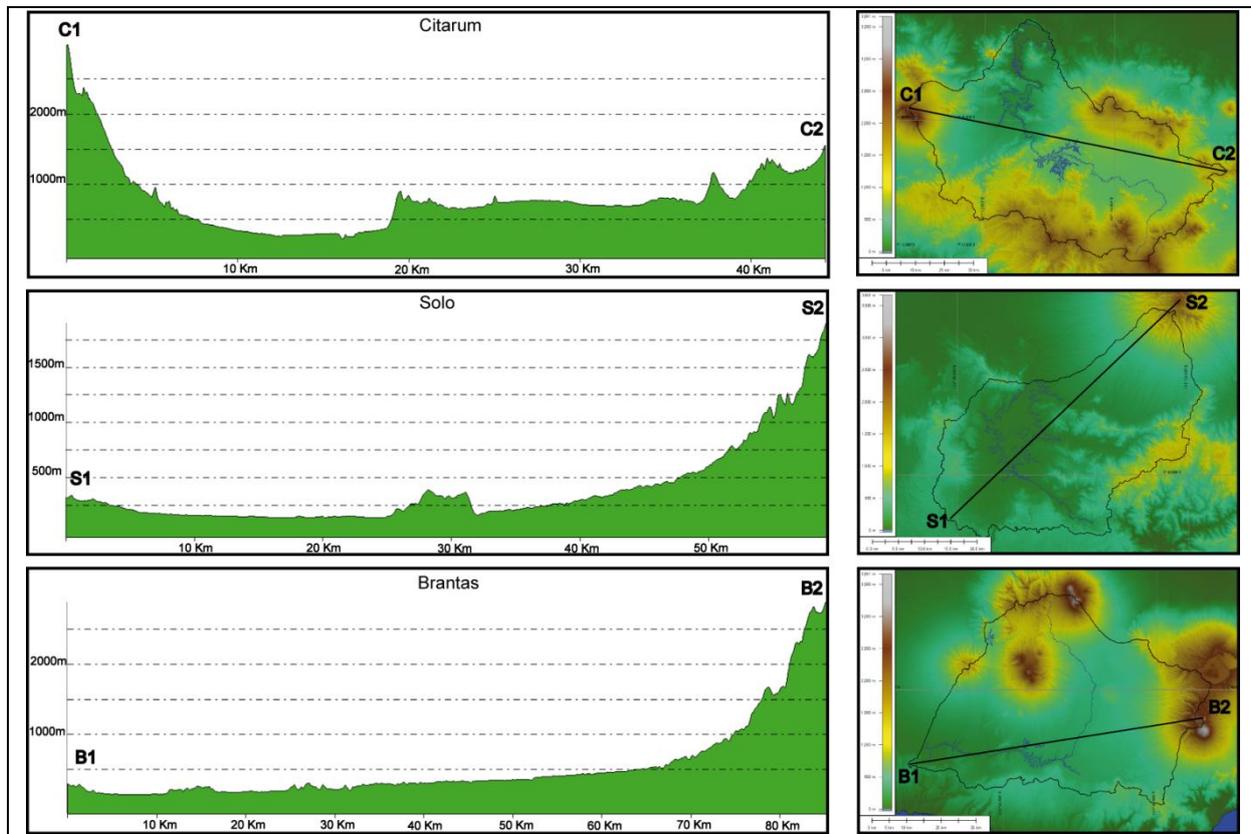


Figure 23 : Profils transversaux des secteurs d'étude

B. Un cadre géologique marqué par le volcanisme et des sols contrastés

Les conditions structurales de Java sont également profondément associées à l'activité volcanique et sismique.

1. Géologie

Le volcanisme andésitique est un élément caractéristique des zones de subduction qui donnent des paysages associés de cordillères ou d'arcs insulaires comme l'île de Java. Les volcans rencontrés dans un volcanisme andésitique sont généralement des stratovolcans

(volcans formés par des successions de coulées de lave et de matériaux pyroclastiques). Le magma andésitique se positionne entre les magmas basaltique et rhyolitique en termes de teneur en silice qui explique la production combinée de laves et de téphras. La plus grande viscosité du magma entraîne une plus forte pression avant les éruptions, par conséquent violentes. Les formes de reliefs en contexte volcanique sont fortement influencées par la composition chimique et minéralogique du magma. En effet, la teneur en silice présente dans les roches va déterminer la viscosité des magmas et par extension le type de volcanisme à l'origine des formes de relief.

Pour le bassin du Citarum (Fig.24) la géologie du secteur est influencée par la présence d'une série de stratovolcans variant de 1 500 m à 3 000 m d'altitude dont certains d'entre eux sont encore en activité (le Mont Tangkuban Prahau au nord, le Mont Galunggung – non inclus dans le bassin-versant, mais fournissant des matériaux par ses retombées de cendres – et le Mont Papandayan à l'est) produisant périodiquement des coulées de lave andésitiques et de grandes quantités de téphras. A côté de ces principaux volcans, des montagnes et collines souvent d'origine volcanique, prolongent les hauts reliefs dans différentes directions.

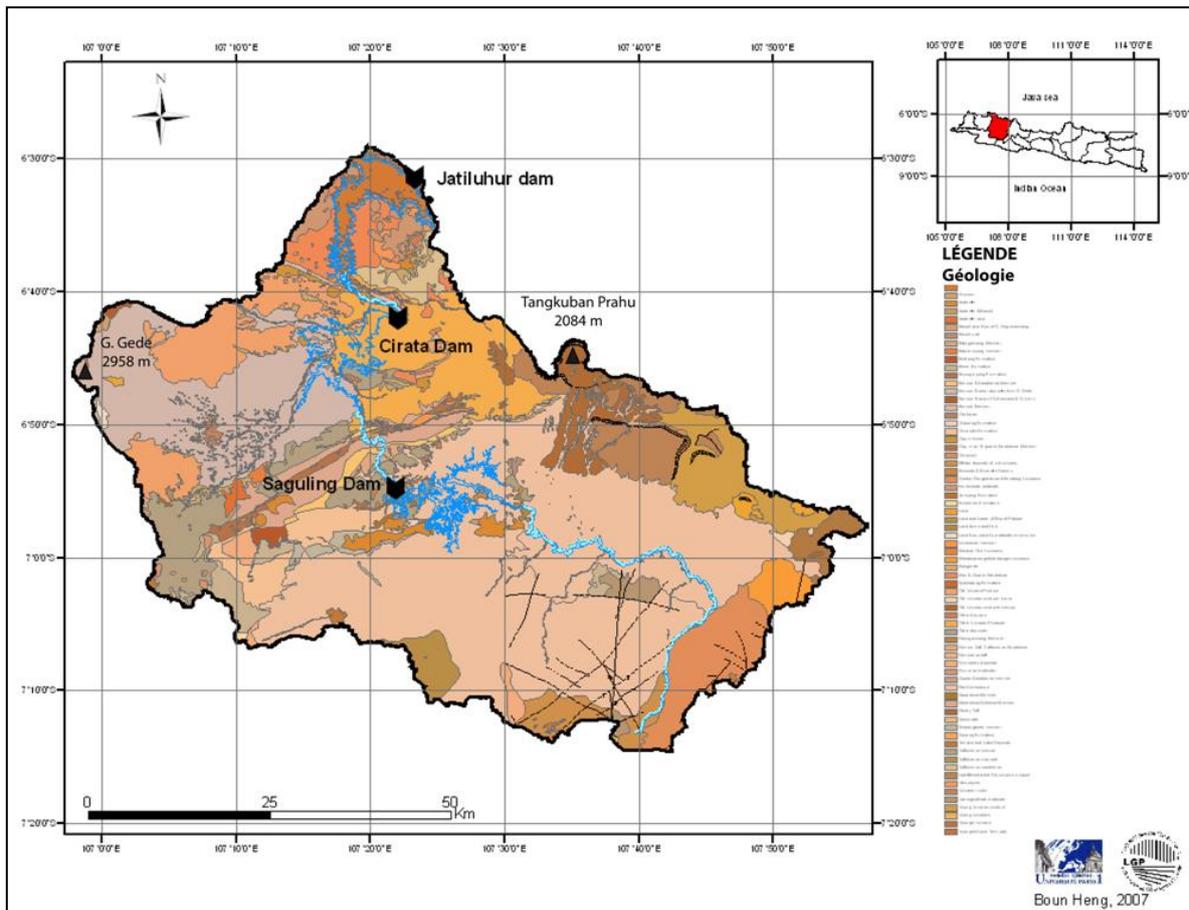


Figure 24 : Carte géologique simplifiée du bassin-versant amont du Citarum
Les types de roches sont bien visibles sur le SIG dont est tirée cette carte

Le secteur d'étude du Solo (Fig.25) est situé dans le piémont sud-ouest du Mont Lawu proche de la limite entre le bassin du Solo et la zone montagneuse méridionale. Cette zone de Java forme des ceintures qui se prolongent dans une direction est-ouest qui s'étend vers l'est jusqu'à l'île de Bali.

Le barrage de Wonogiri et la région du réservoir sont majoritairement composés de brèches volcaniques, de tuffs, de grès, de sable calcaire et de pierre à chaux d'âge miocène appartenant à la zone montagneuse méridionale. Des produits volcaniques quaternaires de la zone Solo sont distribués sur la rive droite du barrage de Wonogiri et du fleuve de Keduang.

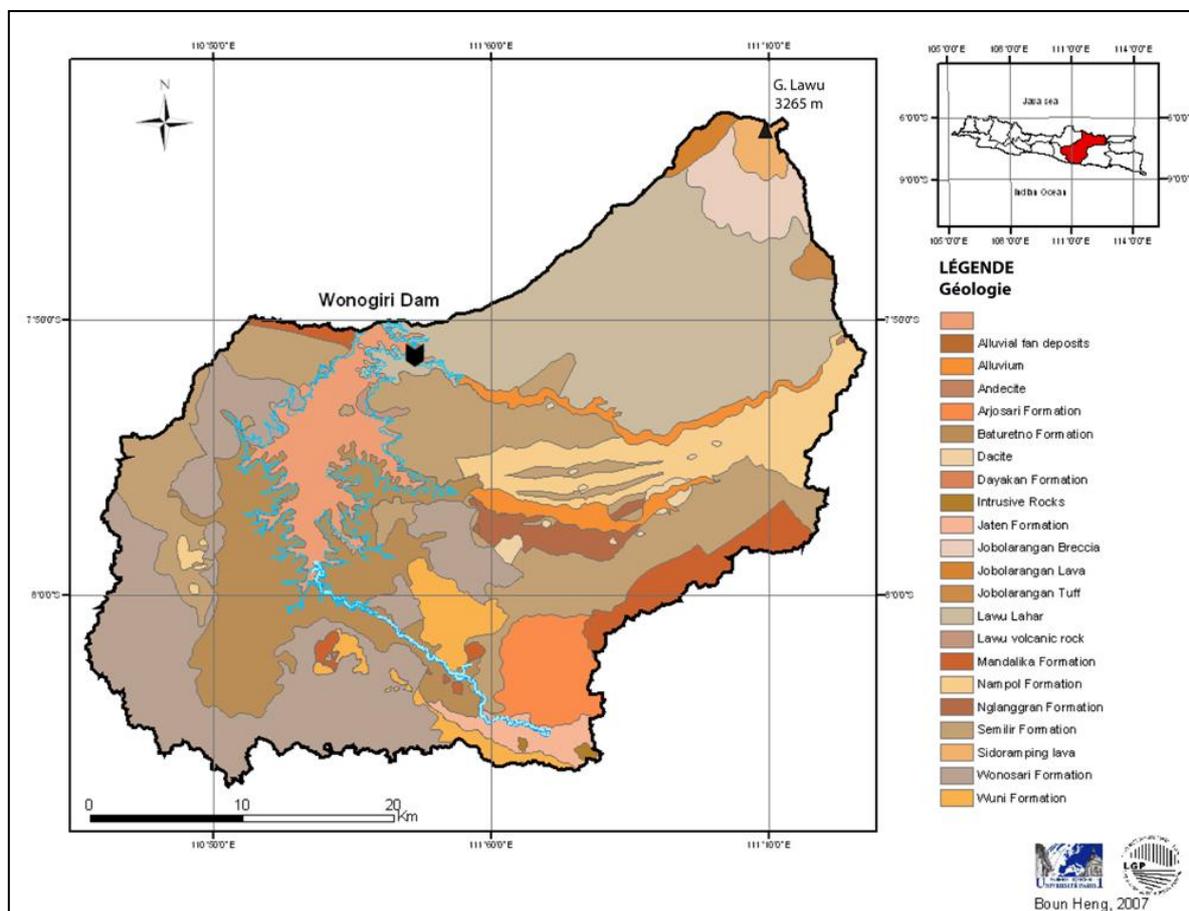


Figure 25 : Carte géologique simplifiée du bassin-versant amont du Solo
Les types de roches sont bien visibles sur le SIG dont est tirée cette carte

La configuration géologique du bassin-versant amont du Brantas (Fig.26) est aussi fortement reliée aux grands complexes volcaniques présents dans le secteur. Les principales formations qui se dégagent sont formées de dépôts du Semeru à l'est, du complexe Kawi-Butak dans la partie centrale et du Kelud à l'ouest.

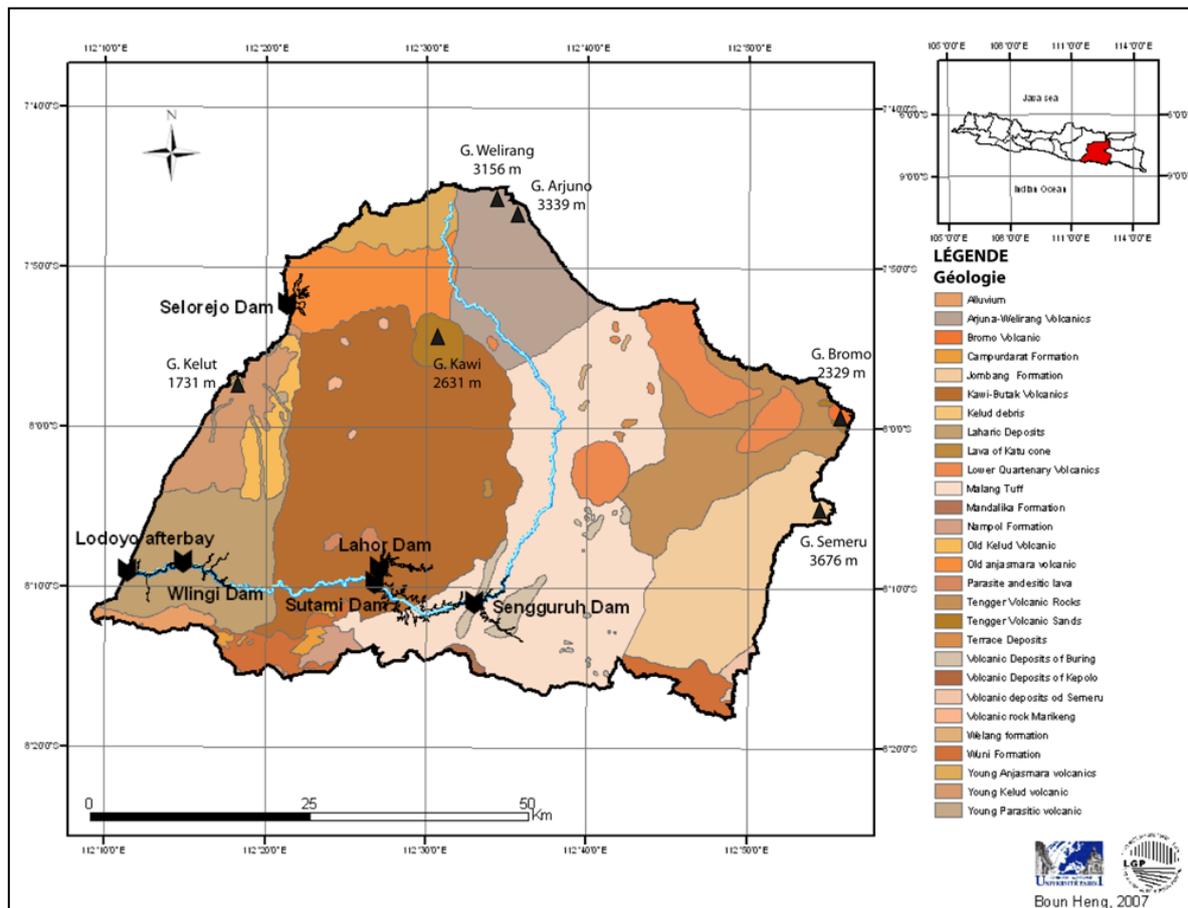


Figure 26 : Carte géologique simplifiée du bassin-versant amont du Brantas
 Les types de roches sont bien visibles sur le SIG dont est tirée cette carte

2. Une structure faillée propice aux séismes

L'île de Java se trouve à la rencontre de failles majeures et très actives qui fait de l'île une région fortement sismique (faille du détroit de la Sonde à l'ouest et subduction de l'océan Indien au sud). Par exemple, la faille de Lembang d'orientation est-ouest est nettement visible au nord de la ville de Bandung et détermine fortement la structure du secteur. Java est d'ailleurs localisée en zone 4 sur la carte des risques sismiques dressée par l'Institut de Technologie de Bandung (ITB, 2000) qui comporte six classes (de 1 : pas de sismicité à 6 : zone fortement sismique).

L'île entière de Java, active et instable, est sujette aux séismes ou aux réveils des volcans qui encadrent les secteurs étudiés (Tab.6). Ces activités pourraient avoir de fortes répercussions sur les barrages. Cela se traduirait soit par la fissuration voire la destruction totale de l'édifice, soit par un comblement total et brusque du réservoir causé par des coulées de débris ou des lahars post-éruptifs. Les zones situées en aval seraient ravagées si les barrages venaient à céder, libérant ainsi brusquement l'eau retenue. Les préjudices humains et économiques seraient alors considérables. En mai 2006, un séisme a frappé la région de Yogyakarta en faisant plus de 5 000 victimes et plus d'un million de sans abris (Texier et al., 2006) et la côte sud de Java a été touchée par un tsunami qui fit plus de 750 morts suite à un séisme sous-marin en juillet 2006 (Lavigne et al., 2007). Ces deux catastrophes nous montrent que Java connaît une grande activité sismique pouvant causer des dégâts majeurs. Le risque sismique est d'autant plus important que la plus grande partie des infrastructures ont été construites sans prendre en compte les séismes de forte magnitude, ce qui augmente notablement la vulnérabilité de ces dernières si un événement majeur venait à se produire. Par exemple, la limite de Mz pour les barrages est de 8 sur l'échelle de Richter.

Date	Localisation	Magnitude	Victimes	Sources
26.05.2006	20 Km SSE de Yogyakarta	6.3	5749	USGS
17.07.2006	235 Km SSW de Bandung	7.7	730	USGS
08.08.2007	102 Km E de Jakarta	7.5	-	USGS
02.09.2009	101 Km SSW de Bandung	7.0	72	USGS

Tableau 6 : Derniers séismes notables à Java (USGS)

Ces événements ponctuels, mais d'une forte intensité, peuvent profondément modifier les conditions structurales d'une région.

3. Des sols sensibles à l'érosion

Les types de sols qui recouvrent l'aire d'étude sont fortement corrélés aux conditions géologiques et topographiques. On retrouve ainsi des andosols principalement localisés dans les secteurs montagneux et influencés par les récentes éruptions volcaniques.

L'andosol est un sol humique peu évolué de montagne qui comporte un horizon supérieur riche en matière organique et une roche mère d'origine volcanique. C'est un sol riche en silicate d'aluminium amorphe (non-cristallisé). L'ion Al_3^+ combiné à la matière organique forme un complexe stable qui bloque son évolution (allophane). Ce sol très fertile, qui plus est issu d'un matériau originel meuble et très poreux, présente donc des conditions

favorables à l'enracinement, une bonne réserve hydrique et se travaille très facilement. Ce type de sol est souvent mis en valeur de manière intensive mais sa forte sensibilité à l'érosion pose un problème important de gestion dans la conversion agricole de ces sols.

On peut retrouver des andosols noirs en plaine contre des latosols dans des secteurs plus localisés et restreints. En revanche, les sols alluviaux tapissent de manière générale les fonds de vallées alluviales. La profondeur, pour tous ces sols, dépasse généralement les 100 m. Selon le type de sol, la perméabilité, relative à la texture, sera différente : tandis que les andosols sont très perméables et permettent une bonne infiltration des précipitations, les sols alluviaux et les latosols sont peu perméables et favorisent le ruissellement. Cela influe sur le temps de saturation des sols en eau et donc sur le ruissellement sur les versants et sur le départ des matériaux.

Le bassin du Wonogiri présente les quatre types de sols suivants :

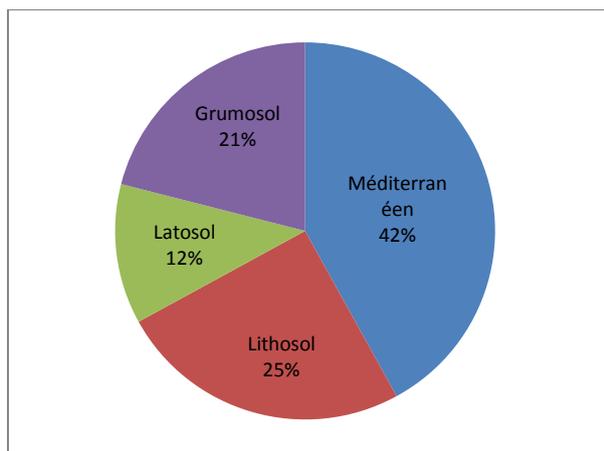


Figure 27: Répartition des sols dans le bassin de Wonogiri

Ces sols ont une consistance rugueuse (argileuse à vaseuse argileuse), leur fertilité est généralement pauvre et ils sont susceptibles à l'érosion hydrique. Parmi eux, les sols méditerranéens et latosols sont classés comme fortement sensibles à l'érosion des sols.

C. Un climat tropical qui favorise l'ablation des matériaux

Java est située dans de basses latitudes (entre 6°S et 8°S) avec un climat de type tropical humide à forte variabilité interannuelle, facteur majeur dans la compréhension des processus d'érosion. En effet, le détachement de sol par les pluies s'avère être une première étape essentielle dans la chaîne des processus menant à la perte de sol (Hudson, 1981; Rose, 1993) et les relations entre le climat et l'érosion sont parfaitement établies (Langbein et al., 1958). Il est donc primordial de bien cerner le rôle des précipitations dans la libération des matériaux sur les versants afin de comprendre la sédimentation dans les lacs de barrage.

1. Un régime pluviométrique bien marqué aux perturbations cycliques

En zone intertropicale, la variation saisonnière est pluviométrique car on retrouve annuellement une alternance entre une saison sèche et une saison des pluies. Phénomène climatique saisonnier, la mousson (terme dérivé du mot arabe *mausim*, « saison ») entraîne d'importantes modifications dans la circulation générale de l'atmosphère sur toute la région. Elle s'observe dans la zone tropicale de chaque hémisphère, comprise entre 10 et 30 degrés de latitude. La présence de la mousson modifie vivement la physionomie des saisons tropicales. Le champ de la pression atmosphérique subit de profondes modifications qui entraînent un changement de direction des vents. Ces variations saisonnières des vents dominants sont elles-mêmes à l'origine de la forte variabilité de la pluviosité que l'on peut constater dans tous les pays soumis au régime de mousson. L'essentiel des précipitations à Java se concentre entre novembre et mars. Les totaux pluviométriques annuels varient à Java entre 1 200 mm près des côtes nord (notamment à Java-Est) et 6 000 mm dans les secteurs de montagne (Berlage, 1949). Hormis leur abondance, la seconde caractéristique de ces pluies tropicales est leur forte intensité, dépassant parfois les 100 mm en une heure. L'Indonésie reçoit des précipitations estimées à 6% des ressources mondiales d'eau douce, soit environ 2 500 km³ dont 80% sont précipitées durant la saison des pluies.

D'autres éléments vont également venir perturber ce schéma de manière cyclique comme les épisodes ENSO et LNSO. L'océan Pacifique tropical est touché par un phénomène récurrent (qui se produit environ tous les quatre ans) nommé El Niño, marquant le passage d'un climat « normal » (Fig.28) à un ensemble de conditions climatiques « perturbées » dans tout le Pacifique Sud.

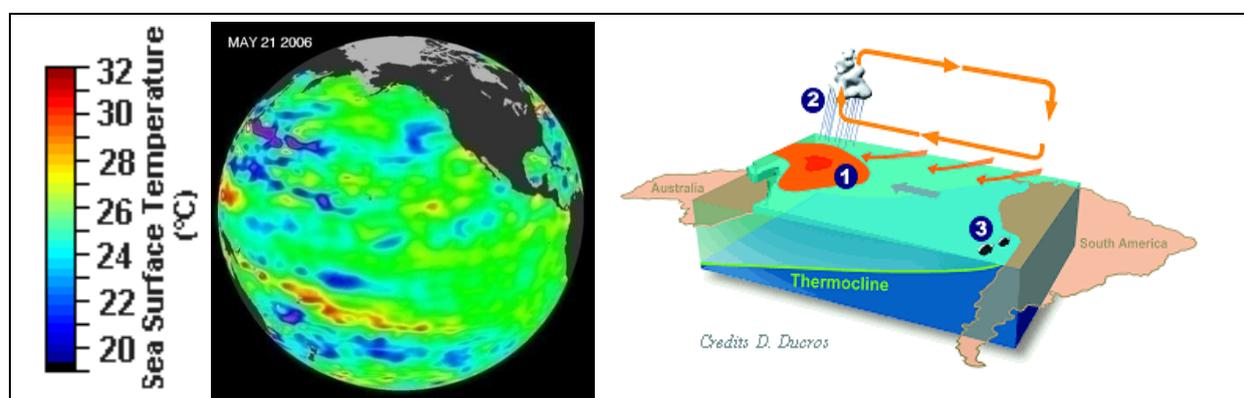


Figure 28 : Conditions normales dans le Pacifique (Météo France)

Un épisode El Niño (Fig.29) a d'importantes répercussions sur l'Indonésie : on constate en effet un déplacement des pluies de mousson vers le Pacifique central, alors qu'elles sont normalement centrées sur le Pacifique occidental. Celles-ci déclenchent alors une grande période de sécheresse, alors que les fortes pluies sont normalement confinées au dessus des eaux chaudes qui entourent l'Indonésie lors des années normales. Les impacts de ces épisodes se traduisent donc par un déficit certain des précipitations à Java. La moyenne des précipitations annuelles pendant ces années est inférieure de 500 à 1 500 mm par rapport aux moyennes des années normales. Les épisodes El Niño les plus importants se sont produits en 1957-58, 1972-73, 1982-83, 1991-92, 1997-98. On assiste depuis à des cycles El Niño modérés, en 2002-03 et 2009-10.

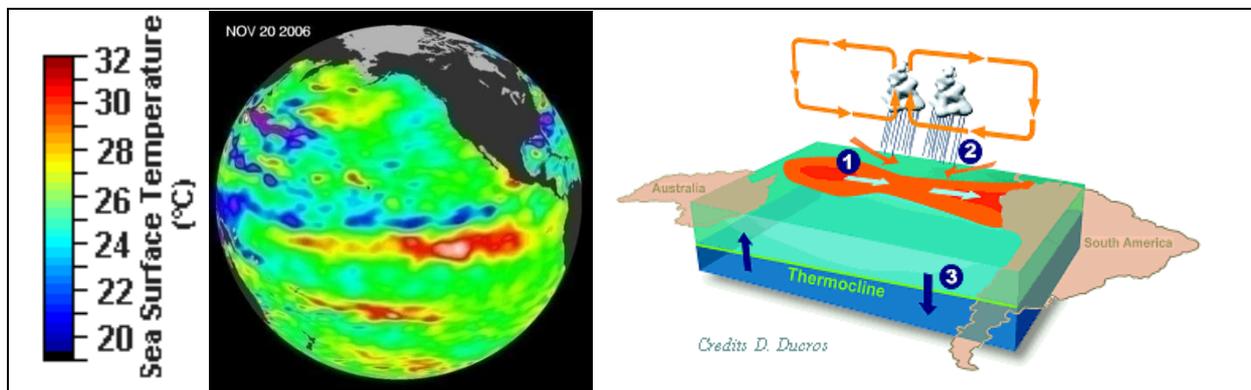


Figure 29 : Condition El Niño dans le Pacifique (Météo France)

Il arrive qu'un autre type de perturbations puisse avoir lieu : La Niña (Fig.30). On assiste alors à un accroissement de la formation de nuages convectifs épais vers le sud-est de l'Asie, qui se traduit par des conditions plus humides pour l'Indonésie pendant l'été austral. En effet, pendant les années où survient ce phénomène, les totaux pluviométriques dépassent de 500 à 1 500 mm la moyenne des précipitations annuelles. La Niña – qui se produit généralement après une période El Niño – provoque souvent un grand stress climatique sur les zones concernées par ces deux phénomènes successifs et antagonistes.

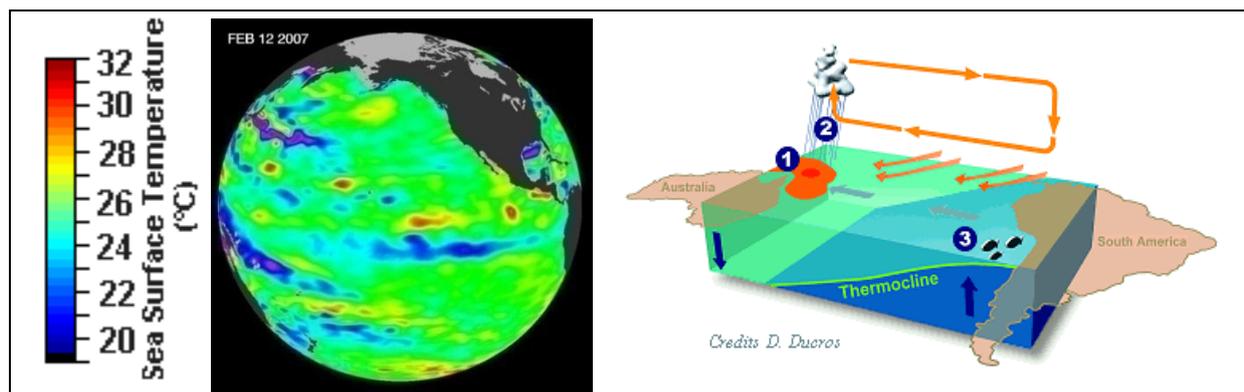


Figure 30 : Condition La Niña dans le Pacifique (Météo France)

L'oscillation de Madden-Julian (MJO) est une perturbation qui naît en Afrique et qui se déplace ensuite dans le Pacifique. Ce phénomène d'une période de 50 à 60 jours se matérialise par une large bande de perturbations qui commence au niveau de l'océan Indien tropical et se déplace vers l'est entre 10°N et 10°S. Cette zone de forte convection de 3 000 km de large couvre l'Indonésie de Sumatra à la Nouvelle-Guinée occidentale. Si l'atmosphère est humide et instable, la phase active de la MJO apporte des précipitations accentuées sur la région pendant deux semaines ou plus. Ce phénomène se déplace ensuite vers l'est et se dissipe sur l'océan Pacifique, laissant place à une période d'accalmie. Puis le cycle se répète. Une oscillation de ce type en février 2007 a entraîné des inondations qui ont fait une cinquantaine de victimes et près de 400 000 sinistrés à Jakarta (Texier et al., 2007).

Lors de la saison sèche qui s'installe du mois d'avril au mois d'octobre, on assiste à un assèchement des sols favorable au déclenchement des incendies de forêts. Environ 2,5 M ha de surfaces boisées ont été détruites par les incendies de forêts au cours du 20^{ème} siècle, portant un préjudice économique estimé à 9 milliards de dollars sans compter l'impact environnemental, quant à lui incommensurable (Pawitan, 2002). Les incendies de forêts sont récurrents. Connaissant déjà un manque de surfaces, Java est sévèrement touchée par ce phénomène et en perd davantage encore avec ces feux (Fig.31).

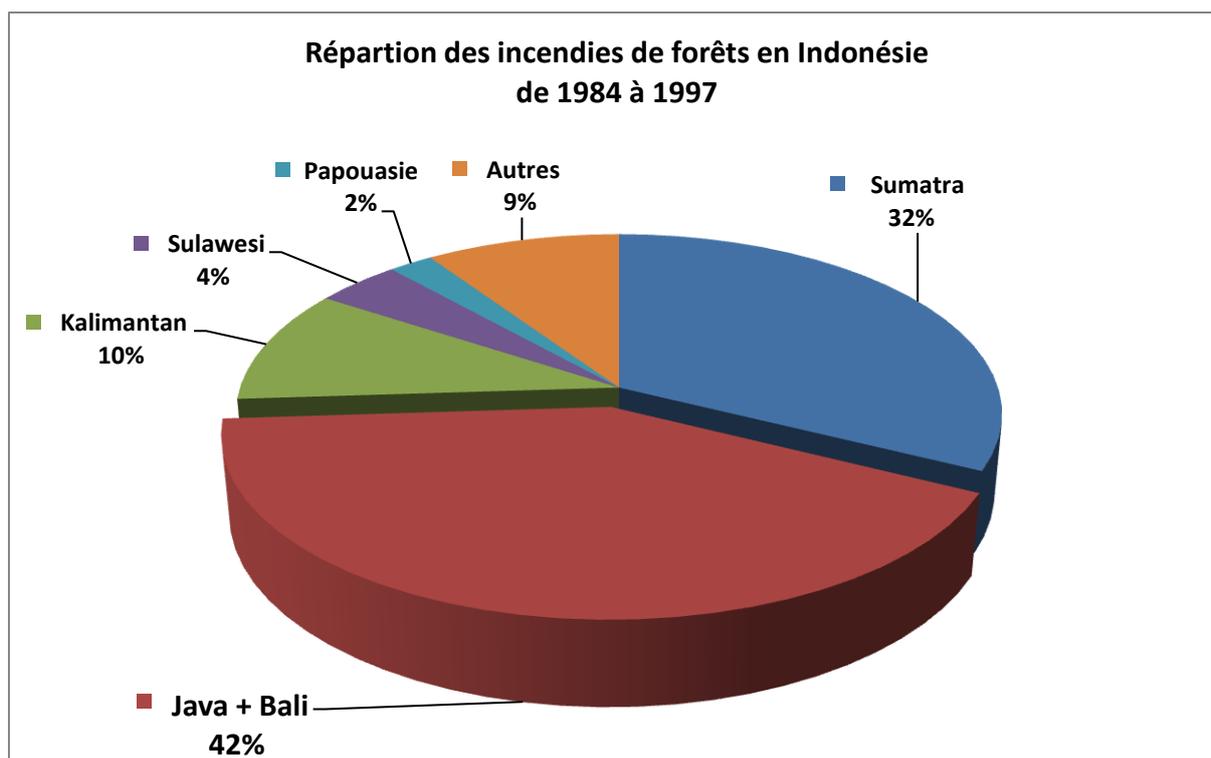


Figure 31 : Répartition des incendies de forêts en Indonésie entre 1984 et 1997 (DPHPA, 1997)

Sur cette période on note très bien que les îles de Java et de Bali concentrent une grande partie des incendies de forêts alors que leurs surfaces sont très restreintes comparées aux autres îles. Presque 250 000 hectares de forêts ont été perdus sur cette période à Java et à Bali.

Alors que la saison sèche occasionne les dégâts présentés précédemment, le passage rapide à la saison des pluies va provoquer le déclenchement d'autres phénomènes favorables à l'érosion des sols. Les fortes précipitations provoquent chaque année des crues et inondations aux conséquences parfois catastrophiques (Fig.32). A titre d'exemple, entre novembre 2001 et février 2002, ces événements ont provoqué la mort de 155 personnes, la disparition de 13 autres et près de 380 000 personnes ont dû être déplacées à cause des crues qui ont dévasté 3 100 foyers et inondé 94 600 autres (Soenarno, 2002). Des économistes ont estimé pour Jakarta des pertes avoisinant les 500 millions de dollars pour les dommages matériels directs et les pertes indirectes, rien que pour ce seul événement (Pawitan, 2002).

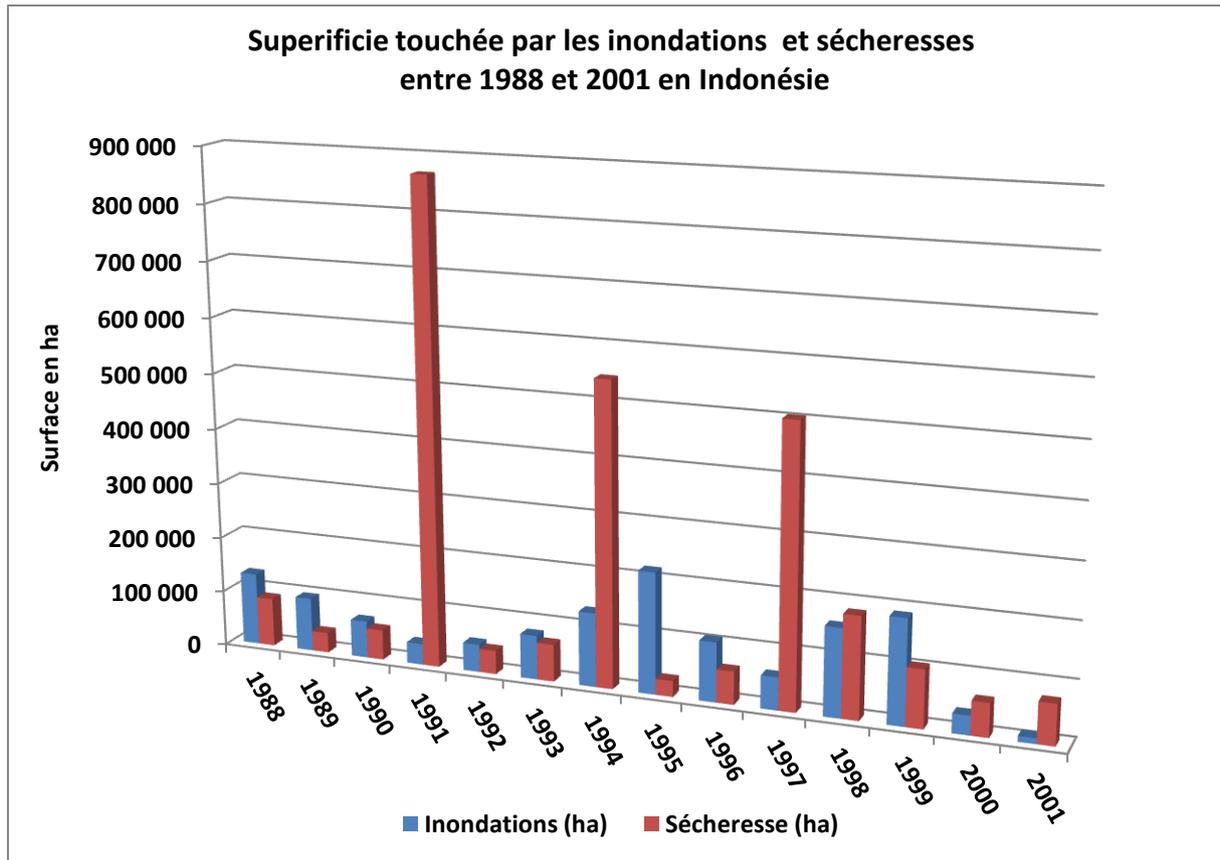


Figure 32 : Estimation des superficies rizicoles touchées par les inondations et les sécheresses en Indonésie (d'après Pawitan, 2002)

Le climat tropical de mousson qui règne en Indonésie, par son alternance sécheresse/humidité et ses précipitations abondantes, favorise donc l'apparition de phénomènes brutaux à l'origine de la libération de matériaux sur les versants. Ce climat entraîne également un certain nombre de risques hydrologiques récurrents aux conséquences graves qui vont fortement influencer sur la charge sédimentaire des cours d'eau.

2. Des cours d'eau aux régimes fortement liés aux précipitations

Les principaux fleuves javanais ont une orientation sud-nord. Ils prennent leur source dans la chaîne montagneuse et volcanique centrale de l'île pour aller rejoindre la mer de Java. Leurs débits sont fortement contrôlés par les précipitations (Fig.33) donnant des périodes d'étiages marquées durant la saison sèche et des crues brutales durant la saison humide.

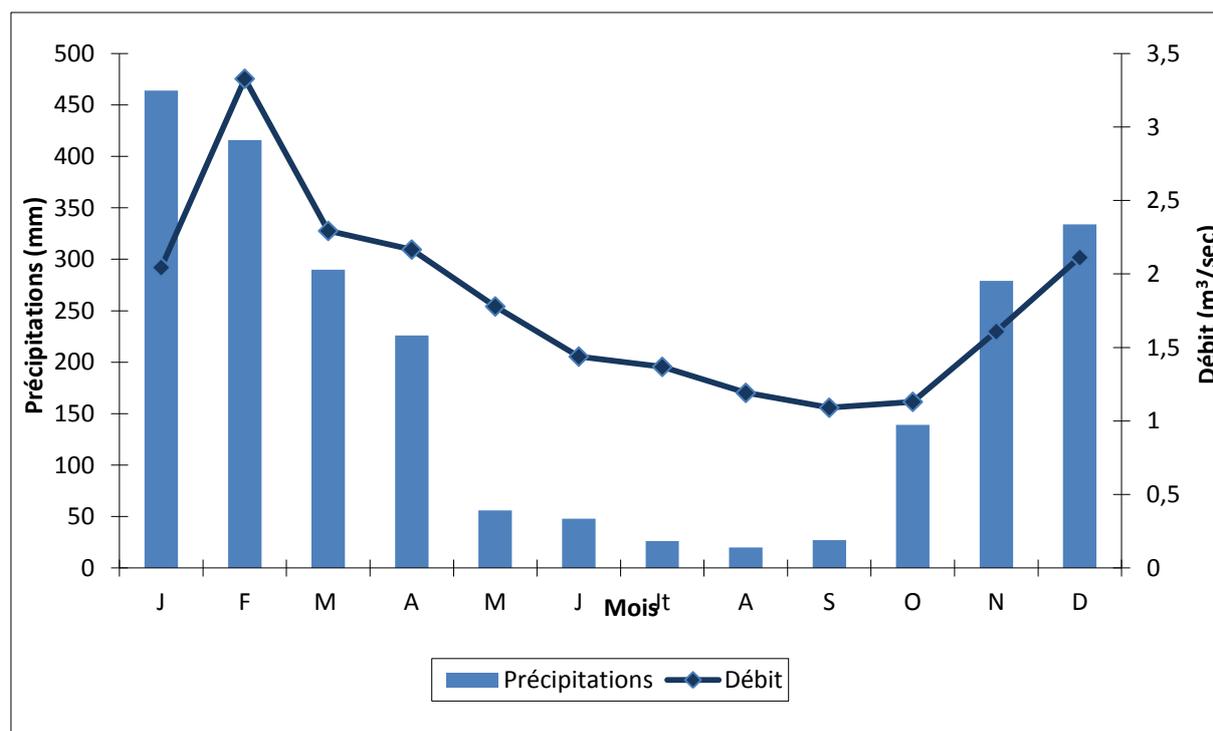


Figure 33 : Relation pluies/débits (station de Pujon, Java-Est, 2002)

On remarque d'autre part que les fleuves de Java (Tab.7) présentent des dénivelés assez forts, qui associés à des précipitations intenses et concentrées en un temps très courts, peuvent alors passer d'un débit modéré à des valeurs exceptionnelles. On comprend ainsi mieux que ces cours d'eau jouent un rôle de premier ordre dans le transit vers l'aval des matériaux érodés sur les versants volcaniques. Lors des épisodes de crues, une grande quantité de matériaux supplémentaires pourra être mobilisée notamment par sapement de berge et ainsi augmenter la charge sédimentaire des cours d'eau.

Cours d'eau	BV (km ²)	Longueur (km)	Dénivelé (m)	Pente (°)	Q moy (m ³ /sec)	Q min (m ³ /sec)	Q max (m ³ /sec)	Station
Citarum	6 080	269	1 700	0,36	68.7	5.4	455.0	Nanjung
Cimanuk	3 600	230	3 078	0,76	137.7	19.9	305.6	Rentang
Citanduy	4 460	170	1 750	0,59	204.0	16.3	710.6	Cikawung
Serayu	3 383	158	2 565	0,93	273.4	58.8	1497	Rawalo
Progo	2 380	140	1 650	0,67	89.3	9.0	596.0	Bantar
B. Solo	16 100	600	3 265	0,31	362.9	19.0	2127	Bojonegoro
Brantas	12 000	320	3 369	0,60	258.7	46.6	866.1	Jabon

Tableau 7 : Caractéristiques des principaux bassins hydrologiques de Java (Catalogue of Rivers, Vol.1, 2, 3, 1995, 1997, 2000)

Ce tableau met en évidence la présence de bassins-versants assez vastes, ainsi que la grande hétérogénéité des débits des principaux fleuves javanais. Par exemple, le Serayu atteint un débit maximum de 1 497 m³/s, soit plus de 25 fois son débit minimum.

Une grande majorité des bassins fluviaux javanais présentent des surfaces fortement inclinées avec des cours d'eau généralement peu développés (moins de 150 km en moyenne) et presque tous les secteurs amont de ces bassins font face à une sérieuse dégradation. Ainsi, pour la majeure partie de la saison des pluies, une grande quantité d'eau inutilisée rejoint la mer, alors que les débits sont très faibles en saison sèche. Pendant la saison des pluies, les écoulements apportent des volumes élevés de sédiments dus à l'érosion excessive dans les secteurs amont des bassins. Ceux-ci sont à l'origine de vitesses de sédimentation très rapides dans les réservoirs de barrages. La durée de vie de ces derniers est alors bien plus courte que prévue du fait de la baisse rapide de leur capacité de stockage. Tandis qu'un certain nombre de barrages ont été construits dans des bassins fluviaux importants tels que le Bengawan Solo, le Brantas, le Citarum, le Serayu-Bogowonto etc., leurs réservoirs retiennent moins de 5% du flux total de ces rivières. L'île de Java connaît donc un total pluviométrique élevé. Le problème réside dans la variation saisonnière et annuelle. L'écoulement en saison sèche dans les principaux fleuves représentent seulement 20% de l'écoulement annuel, descendant jusqu'à 10% lors des années très sèches.

II. Des enjeux élevés

A. Une pression démographique de plus en plus forte

Actuellement l'Indonésie compte plus de 248 millions d'habitants (CIA - *World Factbook*, 2012) et l'île de Java concentre à elle seule environ 60% de la population indonésienne sur seulement 6% du territoire indonésien. Ce déséquilibre entre Java et les autres îles de l'archipel est sujet à un grand dilemme. La présence de sols volcaniques très fertiles donc propices à l'agriculture, ainsi que la forte croissance démographique, provoquent une énorme pression sur les terres javanaises. Elles doivent donc supporter une population très dense et répondre de manière synchrone aux multiples besoins de celle-ci.

1. Une croissance démographique élevée

Relativement stable jusqu'au début du 19^{ème} siècle, la population javanaise va s'accroître à un rythme rapide (Fig.34). Sur les sept villes actuellement millionnaires en Indonésie, quatre se trouvent à Java (Jakarta, Surabaya, Bandung et Semarang).

L'estimation faite de la population de la métropole jakartanaise (JABODETABEK qui regroupe Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang et Bekasi) atteint presque les 22 millions d'habitants ce qui fait d'elle une des cinq plus grandes métropoles au monde. En 2010, 45% de la population javanaise est considérée comme urbaine (*Bappenas*, 2010) contre 8,5% en 1930, chiffre qui démontre bien le poids considérable qu'occupent aujourd'hui les agglomérations urbaines sur Java. Si le milieu naturel est en partie responsable du clivage et de la répartition entre les différentes îles de l'archipel, ce sont surtout les modalités du peuplement et de la politique coloniale qui ont accentué ces différences.

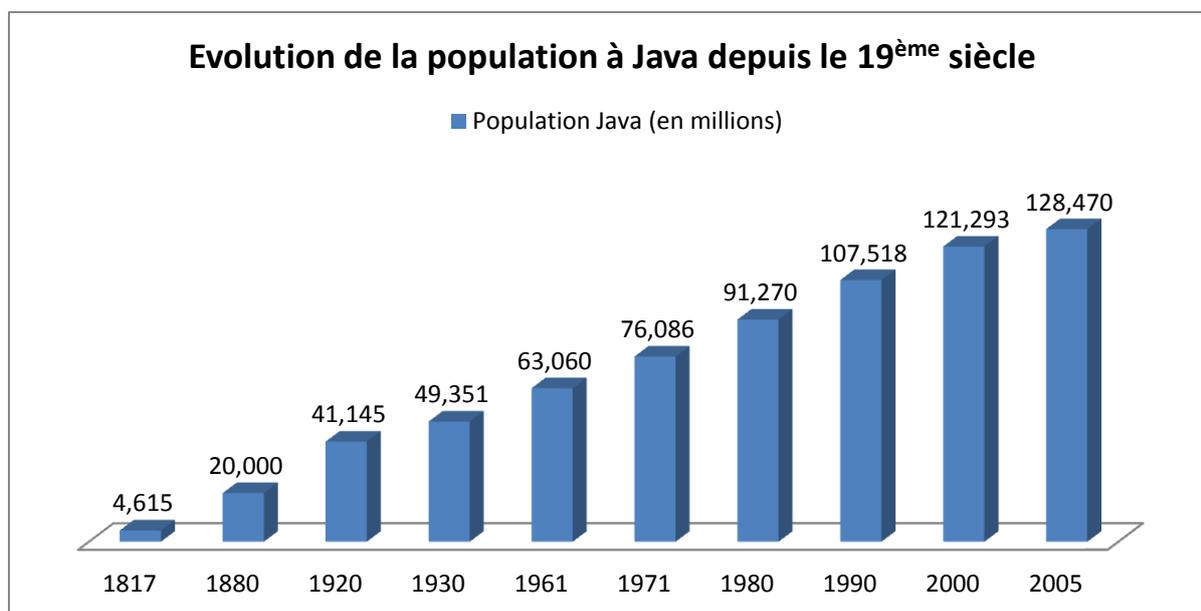


Figure 34 : Évolution de la population à Java depuis le 19^{ème} siècle (Raffles, 1817 ; Sevin, 1993 ; BPS Indonesia, 2006)

Les chiffres concernant 1817 font toujours l'objet d'une polémique car considéré comme sous-estimé. On considère que la population de Java au début du 19^{ème} siècle avoisinait les six millions d'habitants. Les chiffres de 1880 sont également issus d'une estimation.

La croissance annuelle moyenne de la population indonésienne pendant la période de 1990 à 2000 était de 1,9% (0,94% pour la province de Java-Centre), pendant que le recensement de la population a confirmé cette croissance annuelle avec 1,45% en 2005. Cette augmentation est moins élevée comparé aux 2,42% de la période 1971-1980 et aux 1,95% de la période 1980-1990 (1,17% à Java-Centre). Cette baisse s'explique en grande partie par le programme de planning familial. Aussi, peut-on noter un important mouvement de population à l'intérieur de Java où s'est produite une importante colonisation de la partie orientale de l'île dans le dernier tiers du 19^{ème} siècle. Un exemple représentatif d'émigration vers les zones urbaines concerne la région de Gunung Kidul à Java-Centre. Cette zone

karstique montagneuse et sèche à pour tradition de « fournir » les grandes agglomérations javanaises en domestiques et à ce rôle principalement des femmes. Ces migrations expliquent alors le besoin croissant en eau et en énergie pour alimenter les grandes villes. Ce qui a conduit à la construction de réservoirs dès les années 1960 et à leur multiplication à la fin des années 1980.

2. Les zones les plus densément peuplées d'Indonésie

Dès la seconde moitié du 19^{ème} siècle, les autorités coloniales sont impressionnées par la très forte population de Java. A l'exception du delta du Nil et, peut-être, celui du Bengale, il n'existe, à l'époque, aucune région du monde où l'on rencontre une telle concentration de population sur un espace aussi restreint. En 1815, les densités moyennes de population à Java étaient très hétérogènes variant de 9 hab./km² à 880 hab./km² pour une moyenne de 35 hab./km². La densité moyenne de population de Java est passée de 219 hab./km² en 1900 à 330 hab./km² en 1930 puis à 818 hab./km² en 1990 pour dépasser les 1 000 hab./km² en 2000 (Sevin, 2001). En 1930, les densités de population dépassent déjà 671 hab./km² autour de Bandung, 650 hab./km² autour de Cirebon et 580 hab./km² autour de Surabaya ou de Pasuruan (*Departement van Landbouw, 1936*).

Actuellement la densité moyenne de population de Java est de 1 064 hab./km². Une approche globale montre que c'est le centre de l'île – c'est-à-dire la province spéciale de Yogyakarta – qui concentre la plus importante population rapportée à sa superficie (Fig.35).

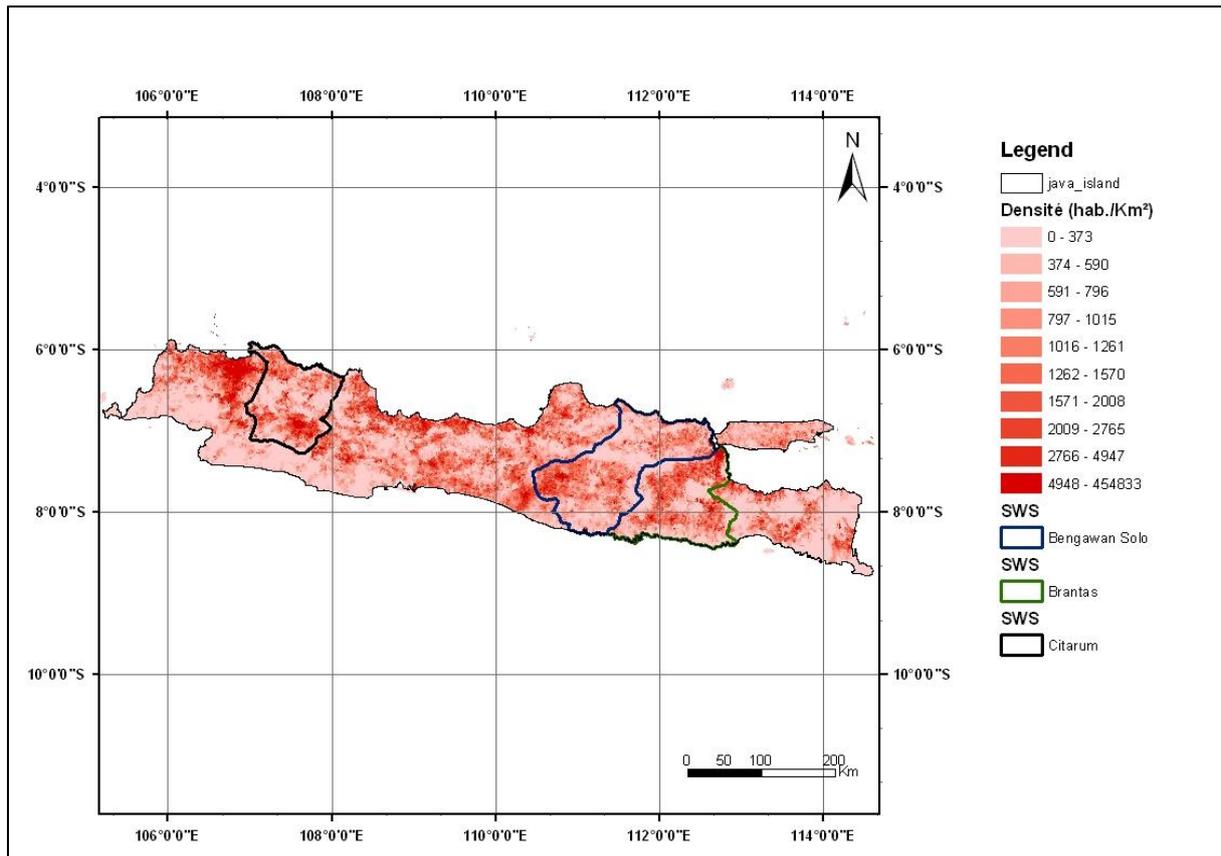


Figure 35 : Carte des densités de population sur Java en 2006

Par exemple dans le bassin-versant du Citarum vivent actuellement environ 7 millions de personnes (Fig.36) et les densités de population varient de 281 à 6 183 hab./km² avec une moyenne avoisinant les 1 000 hab./km² (Soemarwoto, 1989).

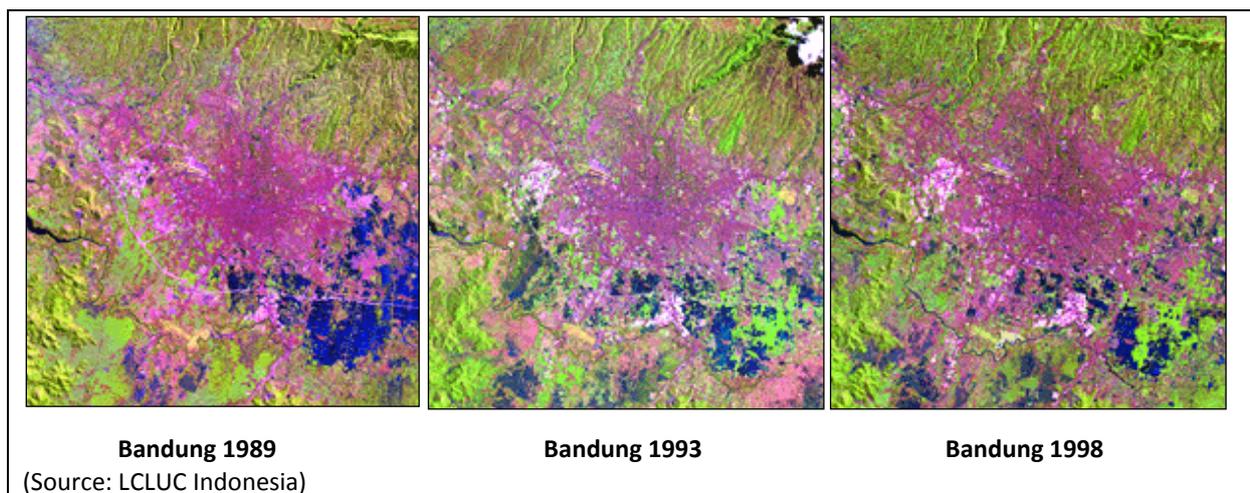


Figure 36 : Le développement rapide de Bandung, la capitale de Java-Ouest

Environ 2 millions d'habitants font d'elle la troisième ville javanaise après Jakarta et Surabaya. Bandung connaît une forte croissance de son secteur résidentiel comme l'attestent ces trois images qui représentent une décennie d'évolution (en pourpre). Cette région a vu la construction des barrages de Saguling en 1986 et celui de Cirata en 1988.

Cette croissance démographique forte pose donc deux problèmes majeurs : une pression énorme sur les terres aux vues de ces densités et un accroissement fort de la demande en eau pour la consommation urbaine ainsi qu'en énergie pour répondre à l'essor des grandes métropoles qui ne cessent de s'agrandir.

B. Des besoins agricoles croissants qui entraînent une mutation de l'occupation des sols

Depuis le 16^{ème} siècle où la région était entièrement dédiée aux plantations de café des colons hollandais, les terres agricoles n'ont cessé de conquérir de nouveaux espaces en partant des plaines jusqu'aux zones montagneuses. Ces dernières décennies s'est opéré en Indonésie un profond changement de l'occupation du sol sous le poids de la pression démographique entraînant une urbanisation galopante ainsi que le développement d'une agriculture extensive.

1. Une agriculture intensive en réponse à une demande accrue : la riziculture

L'île de Java illustre un type d'agriculture très répandu dans le Sud-Est asiatique : la riziculture irriguée. Tôt dans l'histoire, la maîtrise de l'eau permet aux paysans d'obtenir des rendements élevés et stables, dans des parcelles cultivées de manière continue. Très intensive en travail, la riziculture irriguée repose sur une forte organisation communautaire. Quoique modestes, les excédents de production ont favorisé la division du travail et l'émergence d'une riche civilisation agraire. A partir du début du 19^{ème} siècle, le fort accroissement démographique javanais rompt un équilibre séculaire. Depuis près de deux siècles, Java tente d'ajuster sa production de riz à son essor démographique. L'extension des surfaces en rizières résoudra pour un temps le problème. Ensuite, la part du riz dans l'alimentation baissera progressivement. Récemment, grâce à la révolution verte qui a débuté dans les années 60, Java est de nouveau excédentaire en riz. L'autosuffisance rizicole est atteinte en 1981 et est maintenue jusqu'à aujourd'hui. La contribution de Java dans la production rizicole nationale s'élevait déjà à 62% en 1985 (*Biro Pusat Statistik, 1988*).

La province de Java-Ouest qui occupe un tiers de la superficie totale de Java est considérée comme l'un des « greniers à riz » de l'île (Fig.37). En effet, elle a été la pionnière dans les

réformes agraires comme sous le régime de « l'Ordre nouveau » (nom attribué à la dictature de Suharto) au début des années 1960, pour le programme d'intensification concernant la production de riz (Tjondronegoro, 1991).

On peut diviser le secteur en trois grandes zones agricoles :

- La zone nord est constituée de basses terres le long de la côte où la culture irriguée du riz est la forme dominante d'agriculture. S'étirant de Serang à l'ouest, jusqu'à Cirebon à l'est, cette zone forme la bordure littorale de la mer de Java.
- La zone centrale est une région de collines et de montagnes. Cette zone s'étend de Bogor à l'ouest, jusqu'à Kuningan à l'est et n'a pas d'accès direct à la mer. La zone est dominée par une agriculture de plateau, principalement pour l'horticulture et les plantations.
- La zone sud est occupée par les collines et les montagnes de la partie méridionale de la province. Elle englobe sept districts qui donnent sur l'océan Indien et s'étend de Pandeglang et Lebak à l'ouest, jusqu'à Ciamis à l'est de la province où le fleuve Citanduy forme la frontière avec la province de Java-Centre (Purwanto, 1999).

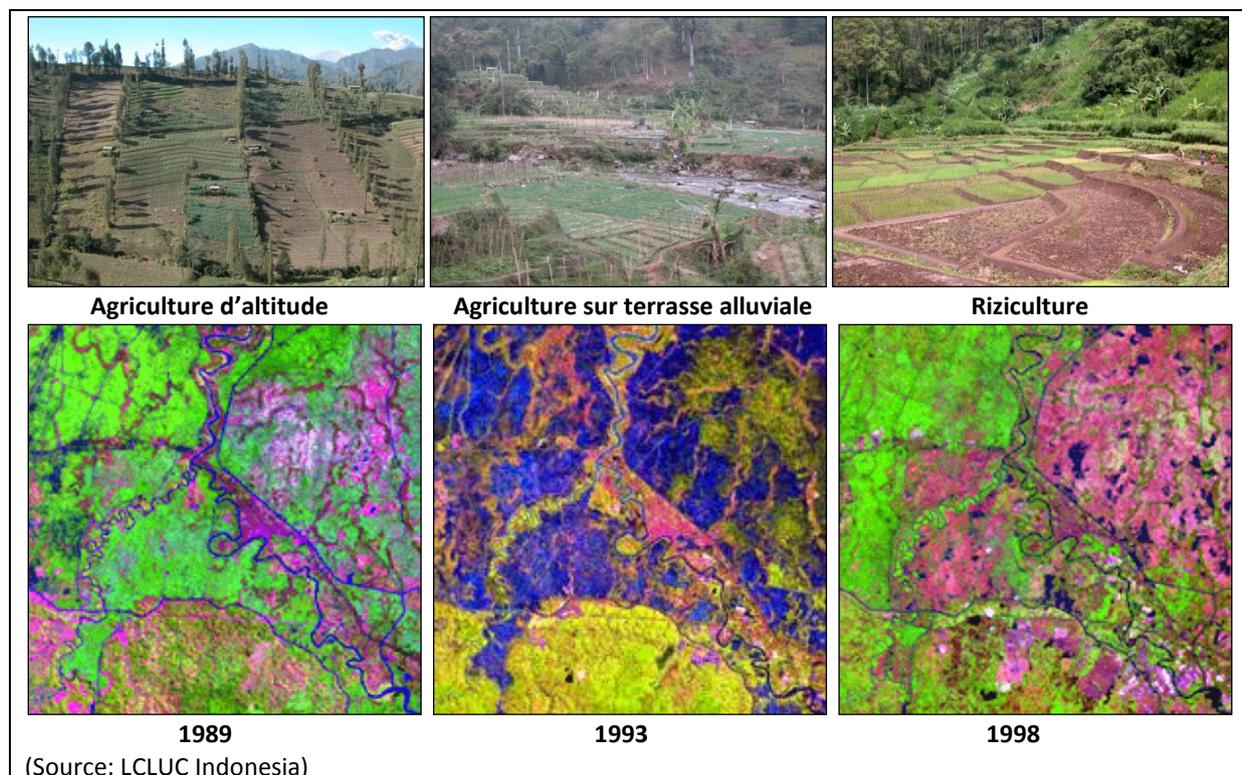


Figure 37 : La région du bassin-versant du Citarum est un vaste secteur d'agriculture.

L'extension des terres agricoles s'est faite en partant des rives des cours d'eau pour remonter petit à petit sur les versants volcaniques autour de Bandung. Des fonds de vallées occupés par les rizières, on passe en altitude à un paysage de culture horticole et de plantations à vocation commerciales.

L'essor de l'agriculture et notamment de la riziculture irriguée a fortement accru la nécessité d'une meilleure gestion des ressources hydrologiques sur l'île, une des missions primordiales que les barrages doivent remplir.

2. La conversion des surfaces boisées en terres arables

Étant une des aires les plus peuplées du monde, Java a vu le développement rapide d'une agriculture intensive qui a provoqué la conversion à grande échelle de la forêt en terres de culture au milieu du 19^{ème} siècle afin de répondre aux besoins alimentaires d'une population de plus en plus importante. Quand ce processus a ralenti au milieu du 20^{ème} siècle, environ 10 millions d'hectares, soit environ 80% de sa surface d'origine, avaient déjà été rasés (Smiet, 1990, Lavigne & Gunnell, 2007). Cette déforestation, liée à la pression démographique combinée à des pratiques agricoles mal adaptées, est l'une des causes de la forte érosion sur les versants.

En réponse à cette agriculture intensive, la couverture forestière tend à diminuer fortement, ce qui est nettement visible sur l'image Landsat de 1998 (Fig.38).

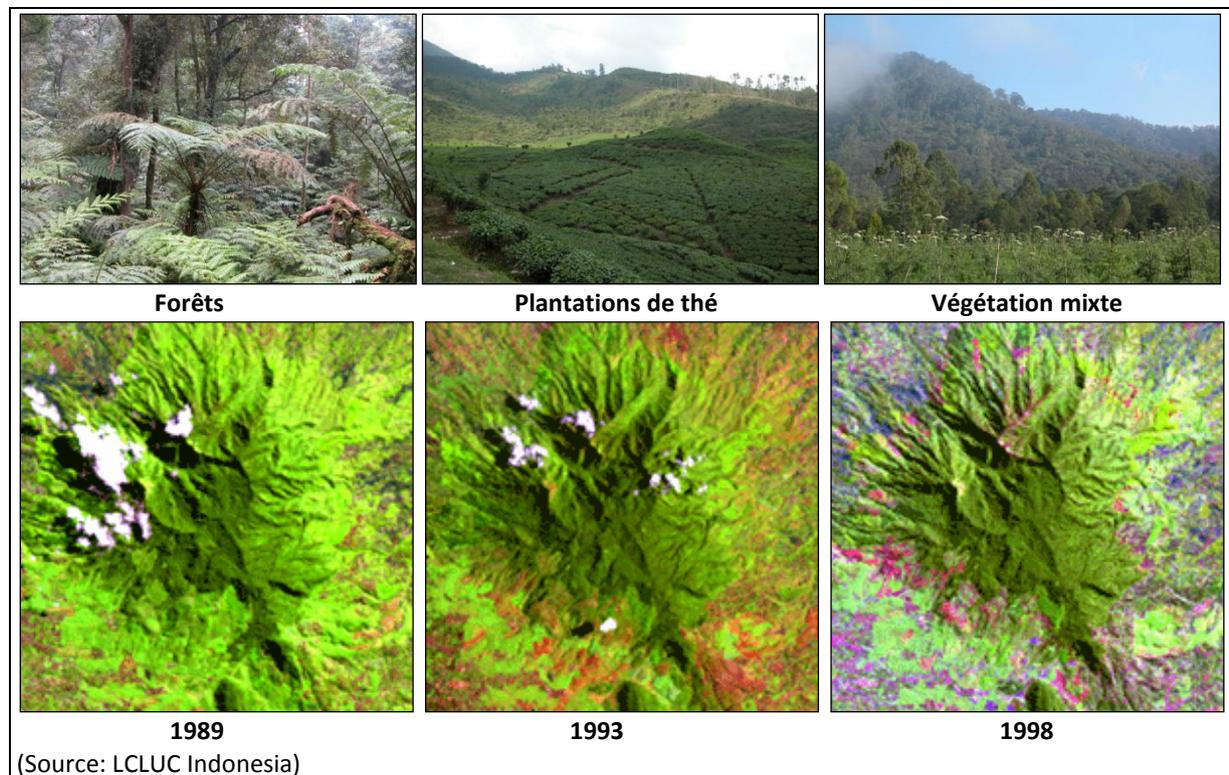


Figure 38 : Évolution de la couverture boisée sur le Mont Malabar.

La pression démographique très forte de ces dernières décennies a accéléré la conquête des versants volcaniques à la recherche de nouvelles terres à cultiver.

Le phénomène El Niño très sévère de l'année 1997-98 a aggravé l'effet de cette déforestation massive. En effet, les terres mises à nue, associées à la forte sécheresse, ont alors provoqué de terribles incendies qui ont alors ravagé les forêts indonésiennes. Ceci a fortement augmenté la surface des terres non couvertes laissant présager une augmentation de l'érosion des sols. À l'heure actuelle, encore peu de travaux traitant des impacts de la «*Reformasi*» (période politique qui s'en suivie après la chute du Général Suharto en 1998, voir chapitre 5) sur l'accélération de l'érosion des sols ont été entrepris.

Actuellement, dans le bassin de Wonogiri, les forêts couvrent seulement 10% du bassin-versant (Tab.8) reflétant la densité de population élevée dans le bassin du barrage de Wonogiri.

Occupation du sol	Surface (ha)	Ratio (%)
Rizières	30 495	24.5
Habitat	26 764	21.6
Cultures d'altitude / terres sèches	39 761	32.0
Plantation	12 867	10.3
Forêts provinciales	281	0.2
Forêts d'état	12 779	10.3
Autres	1 384	1.1
TOTAL	124 331	100.0

Tableau 8 : Occupation actuelle du sol du bassin du Wonogiri (JICA)

Néanmoins, comme dans le bassin du Citarum, la création de zones protégées (*Juanda Great Forest Park* et *Tangkuban Prah National Park* – couvrant 30% de l'aire d'étude – sont composées majoritairement de forêts secondaires) montre qu'une certaine prise de conscience a vu le jour ces dernières décennies pour la conservation des surfaces boisées (Tab.9). Cependant, ces secteurs de forêts sont très sensibles à la pression des activités humaines.

Sous bassin - versant	Zones boisées (ha)	%	Zones non boisées (ha)	%	Total (ha)
Citarik	25 690,00	44	33 349,00	56	59 039
Cikapundung	9 761,00	21	35 795,25	79	45 556
Ciminyak	7 410,25	20	30 325,25	80	37 736
Cirasea	16 877,25	45	20 386,00	55	37 263
Ciwidey	7 725,50	76	2 415,25	24	10 141
Cisangkuy	8 978,00	27	24 032,50	73	33 011
Cihaur	1 751,50	13	12 039,00	87	13 791
TOTAL	78 193,50	33	158 342,25	67	236 536

Tableau 9 : État des surfaces boisées et non boisées dans le bassin-versant du Citarum (Photo interprétation Landsat 1996) (SARCS-LUCC, 1998).

3. Une fragilisation des terrains

L'effet de cette mutation de l'occupation des sols a de fortes répercussions sur le milieu. L'équilibre des sols est déstabilisé, ce qui entraîne une recrudescence de certains risques naturels comme les glissements de terrain (Fig.39). On relève sur Java des taux d'érosion qui comptent parmi les plus élevés au monde (Magrath et Arens,1989).



Figure 39 : Glissements superficiels à Cimanggu (Cilacap) en novembre 2001

Deux générations de glissements sont visibles : les plus récents (30/10/2001) laissent apparaître un substratum marron clair, contrastant avec la couleur marron foncé du glissement de gauche survenu lors de la précédente saison des pluies. Ces glissements sont dus au déboisement, depuis 1999, des collines autrefois recouvertes de teck (photo : F. Lavigne).

Dès la fin des années 1970, Pickering (1979) a fait le constat suivant sur la situation environnementale de Java : « La fertilité du sol est réduite ; les équilibres hydrologiques sont perturbés ; les sources s'assèchent ou leur débit a diminué ; il y a une disponibilité réduite pour irriguer les plaines et les basses terres ; mais une augmentation régulière de la fréquence et de la taille des inondations et de la sédimentation des cours d'eau, des canaux d'irrigation et des réservoirs. » Le problème que pose l'érosion reste prioritaire sur une île surpeuplée (où la terre est fortement sollicitée par la pression démographique et les cultures), du fait que la perte de sol constitue un handicap majeur dans le bon développement du territoire.

C. L'industrialisation galopante et ses conséquences hydriques

1. Une croissance industrielle suivant l'expansion urbaine

Depuis 1970, Java connaît une expansion forte dans le secteur industriel grâce à l'apport croissant de capitaux étrangers (Fig.40). Entre 1969 et 1987, 41% des investissements locaux et 56% des investissements étrangers étaient destinés à la seule province de Java-Ouest (Purwanto, 1999). De nombreux sites ont vu le jour, opérant ainsi la mutation progressive d'un paysage agricole à un paysage industriel autour des grandes métropoles javanaises.

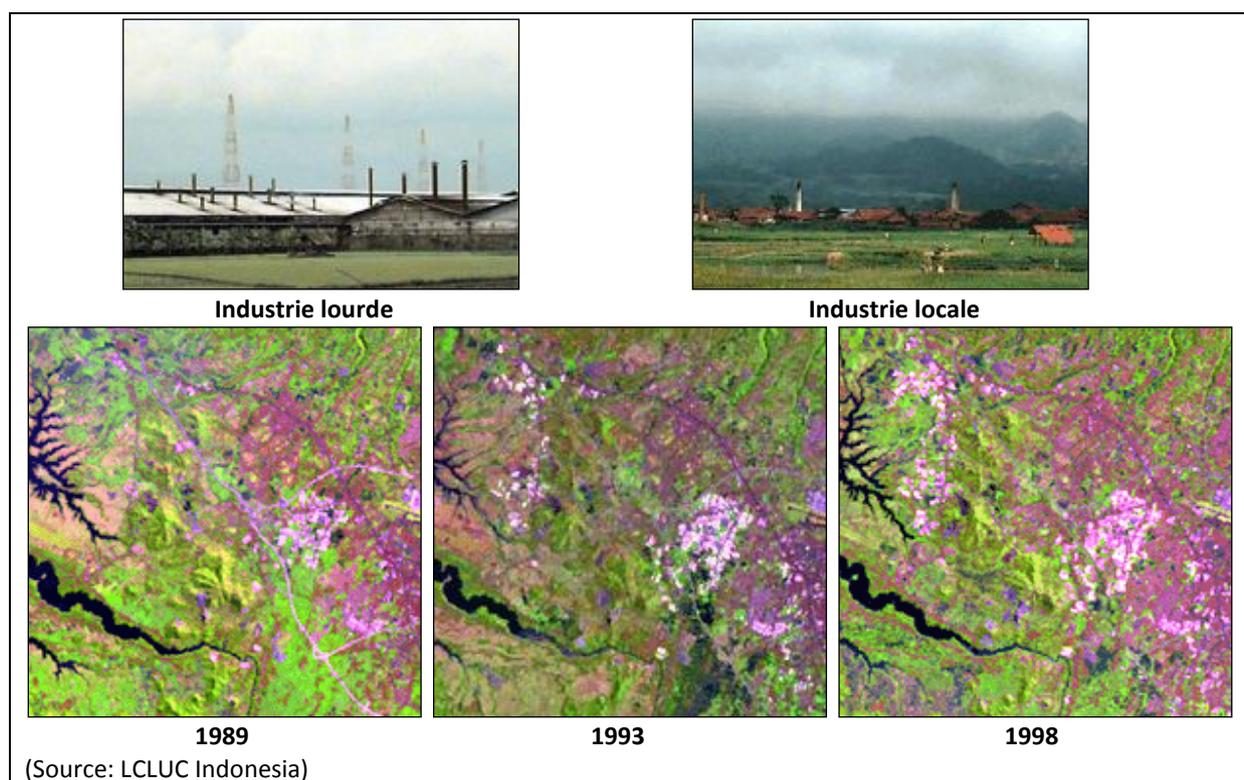


Figure 40 : La région de Bandung, un pôle industriel

D'après les images satellitaires, l'augmentation du secteur industriel est nettement visible sur la région de Cimahi, au nord-ouest de Bandung. On dénombre environ 2 500 industries avec de gros besoin en eau (industries textiles en particulier) et en électricité qui utilisent le barrage de Saguling, dont une partie du réservoir est visible sur la figure.

Bien que disposant de quelques unes des réserves les plus riches en pétrole, gaz naturel, charbon, hydrocarbures, et énergie géothermique, l'Indonésie est incapable de fournir de l'énergie électrique à près de 60 % de sa population. La plupart de celle-ci habite sur des îles distantes de Java et de Bali dans l'immense archipel indonésien, dans quelques 39 000 villages disséminés sur 13 600 îles. Malgré la volonté de l'Indonésie d'améliorer le niveau de vie des zones rurales par le biais de l'électrification, le gouvernement reconnaît qu'il ne peut approvisionner en énergie courante les zones rurales réparties sur de grandes distances.

Dans ce contexte insulaire, l'hydroélectricité joue un rôle important en permettant de fournir de l'électricité à une vaste région et représente donc un intérêt majeur pour le développement de Java.

2. Une crise permanente de l'eau

Pour Java, qui héberge 60% de la population, 70% de l'agriculture irriguée et 75% de l'industrie, les quantités d'eau et leurs qualités provoquent des conflits croissants entre les différents secteurs d'activité : agriculture, industrie et municipalité. Des conflits ont aussi lieu – dans des zones urbaines à croissance rapide – entre l'utilisation de surface et l'utilisation souterraine. Depuis plusieurs décennies, ces zones fortement peuplées ont vu l'émergence d'une compétition farouche entre l'usage urbain et rural, ainsi que de l'irrigation – phénomène qui devient même critique pendant la saison sèche. A Java, on a estimé en 2000 que la demande en eau avait augmentée de 70% par rapport à la décennie précédente. Des statistiques effectuées fin 1994 montrent que 43 millions d'Indonésiens n'ont pas d'accès à l'eau, dont 30 millions à Java et plus de 11 millions (soit 25%) ne serait-ce que dans la province de Java-Ouest. Ainsi, à Bandung, le litre d'eau minérale est plus cher qu'un litre d'essence ! Pour la région de Jakarta, on estime que l'eau disponible par jour pour une personne est de 0,15 m³/hab./an, alors que la moyenne nationale avoisine les 50 m³/hab./an (Pawitan, 2002). Ceci montre bien l'importance du contrôle des flux liquides dans ces zones fortement urbanisées. Une sédimentation accélérée des réservoirs va donc avoir une incidence lourde sur le stock d'eau disponible.

La capacité de la plupart de ces réservoirs dans ces bassins fluviaux a été prévue pour satisfaire les besoins d'approvisionnement en eau pour les différents usages jusqu'à l'horizon 2010. Nous nous trouvons donc aujourd'hui à un moment charnière de la politique hydraulique en Indonésie. Plusieurs emplacements additionnels ont été identifiés pour la construction de futurs et potentiels barrages. Cependant, l'exécution de ceux-ci risque d'être compromise du fait des fortes densités de population et des coûts socio-économiques qu'entraînerait un tel déplacement alors nécessaire à la faisabilité de ces projets.

III. La construction des barrages pour répondre aux besoins javanais face à la gestion de l'eau

En Indonésie, de nombreux barrages ont été construits depuis le début des années 1900, initialement pour l'irrigation des terres agricoles. Mais depuis le début des années 1960 – pour faire face à une demande accrue en eau et en augmentation croissante – le gouvernement avait déjà lancé la construction de nombreux grands barrages polyvalents sur ces principaux cours d'eau. Leurs fonctions sont multiples, assurant le contrôle des flux liquides (soutien des étiages et atténuation des crues) en passant par la production électrique, l'irrigation des terres agricoles et la fourniture en eau pour les industries et les grands centres urbains. En 1994, 120 grands barrages étaient en activité en Indonésie. Désormais, on recense 240 barrages dans le pays dont 132 grands barrages (106 sont gérés par le Ministère des travaux publics (*Departemen Perkejaan Umum - PU*), 18 par la compagnie d'électricité d'état (PLN) et 8 par des sociétés minières (Banque mondiale). Ensemble, ils irriguent environ un million d'hectares de terres agricoles et génèrent environ 6 000 GWh (milliards watt-heure) d'électricité.

La majorité de ces grands barrages sont situés à Java, qui possède la plus grande proportion de terres arables du pays. Notre recherche va s'intéresser aux grands barrages situés dans les plus importants bassins fluviaux de Java, à savoir ceux du Citarum, du Serayu, du Solo et du Brantas.

A. Barrages du bassin du Citarum

L'originalité du bassin du Citarum est qu'il possède un complexe de trois grands barrages en enfilade construits sur ses 269 km (Fig.41). L'importance stratégique de ces barrages sur le cours du Citarum est qu'ils fournissent un débit de 22m³/sec dont environ 16 m³ sont destinés au système d'approvisionnement en eau de Jakarta, soit plus des deux tiers de ses ressources. Le reste se partage entre la ville de Bandung et l'irrigation des terres agricoles (Fig.42).

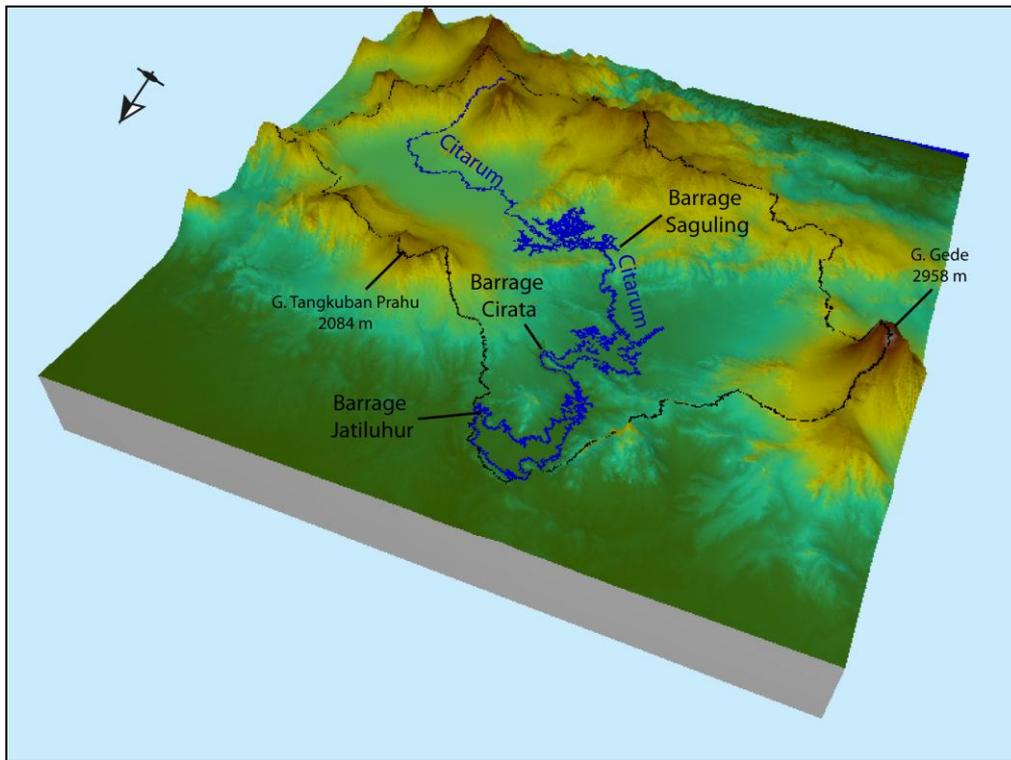
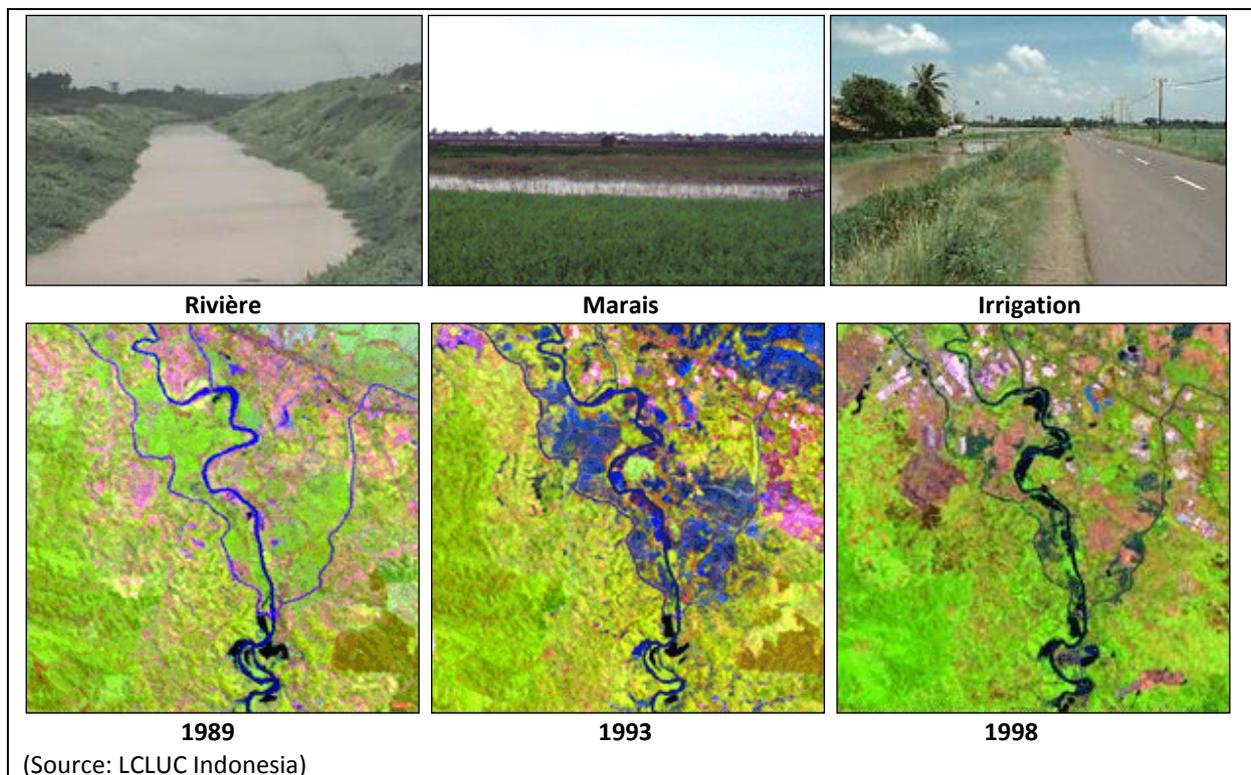


Figure 41 : Localisation des trois barrages dans le bassin-versant du Citarum

Ces derniers assurent l'essentiel de la production hydro-électrique de la province de Java-Ouest. Le bassin amont de ce fleuve (limites en pointillé noir) couvre 4 625 km².

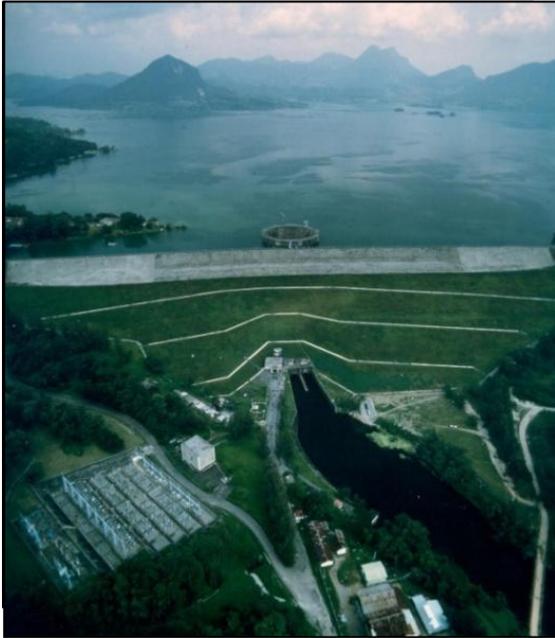


(Source: LCLUC Indonesia)

Figure 42 : Le Citarum : l'artère vitale de Java-Ouest

Ce fleuve assure à lui seul les ressources en eau de plus de 20 millions de personnes. 16 millions de personnes de la région de Jakarta dépendent directement de l'eau provenant des trois lacs. Le Citarum est également la source principale d'irrigation pour les secteurs agricoles dans le bassin-versant.

1. Le barrage de Jatiluhur



Le barrage de Jatiluhur est le plus ancien des trois barrages et se situe à 50 km de Bandung et à 70 km de Jakarta. Construit entre 1957 et 1965, cet ouvrage en remblai d'une hauteur de 105 mètres retient le plus grand réservoir du pays d'une capacité initiale de près de $3 \times 10^9 \text{ m}^3$. Ses fonctions assurent aussi bien la production électrique, la gestion des flux liquides, l'irrigation que la fourniture en eau pour Jakarta et les industries avoisinantes. Le barrage de Jatiluhur sert à l'irrigation d'environ 240 000 ha de terres rizicoles.

Figure 43 : Le barrage de Jatiluhur (*Perum Jasa Tirta*)

2. Le barrage de Cirata

En amont de ce dernier se trouve le barrage de Cirata dont la construction a débuté en 1984



et a été mis en service en 1988. Situé à 100 km au sud-est de Jakarta, ce barrage en remblai d'une hauteur de 125 mètres a comme fonction principale la production hydroélectrique sous l'autorité de PLN (compagnie d'état d'électricité). La centrale a été réalisée en deux phases, la seconde étant achevée en 1998 et s'avère être la plus grande centrale hydroélectrique d'Indonésie, avec une capacité totale installée de 1 008 MW et une production annuelle de 1 426 GWh.

Figure 44 : Le barrage de Cirata (*Perum Jasa Tirta*)

3. Le barrage de Saguling

Le barrage de Saguling, le plus en amont sur le cours du Citarum et à 26 km à l'ouest de



Bandung, a été mis en service en 1986. Sa hauteur de 99 mètres en remblai retient un réservoir de $875 \times 10^6 \text{ m}^3$. Son principal objectif est d'être dédié à la production d'électricité disposant d'une capacité installée de 700 MW pouvant être étendue à 1 400 MW à l'avenir. Il assure aussi l'approvisionnement en eau et abrite une activité piscicole.

Figure 45 : Le barrage de Saguling (*Perum Jasa Tirta*)

Barrage (Année)	Fleuve (km)	Hauteur / largeur (m)	Type	Surface bassin (km ²)	Capacité (10 ⁶ m ³)	Fonctions	Opérateur
Jatiluhur 1967	Citarum 269	105 / 1220	ER	4 500	2 556	A/F/I/N/P/W	PJT II
Cirata 1988	Citarum 269	125 / 453	ER	4 119	2 165	P	PT. PLN
Saguling 1986	Citarum 269	99 / 301	ER	2 283	875	P	PT. PLN

A Agriculture
 F Lutte contre les inondations
 P Hydroélectricité
 N Contrôle et maintien des débits
 I Industrie
 W Fourniture d'eau

Tableau 10 : Caractéristiques des barrages du bassin amont du Citarum (*Perum Jasa Tirta*)

Détails en annexe 2

B. Barrages du bassin du Solo et du Serayu

Deux grands barrages situés dans la province de Java-Centre vont être étudiés au sein de cette recherche. Il s'agit du barrage de Wonogiri dans le bassin du Bengawan Solo et du barrage de Mrica dans le bassin du Serayu.

1. Le barrage de Wonogiri



Pour le bassin du Solo, il n'y a qu'un seul grand barrage (Fig.46 et Fig.47), celui de Wonogiri situé à 3 km au sud de la ville de Wonogiri si bien qu'on peut également le trouver sous le nom de barrage de Wonogiri. Ce dernier est installé très en amont du fleuve. Mise en service en 1981, le réservoir d'une capacité initiale de $560 \times 10^6 \text{ m}^3$ assure production hydro-

électrique, contrôle des flux liquides et irrigation des terres agricoles en aval du barrage.

Figure 46 : Barrage de Wonogiri (Triunt, 2009)

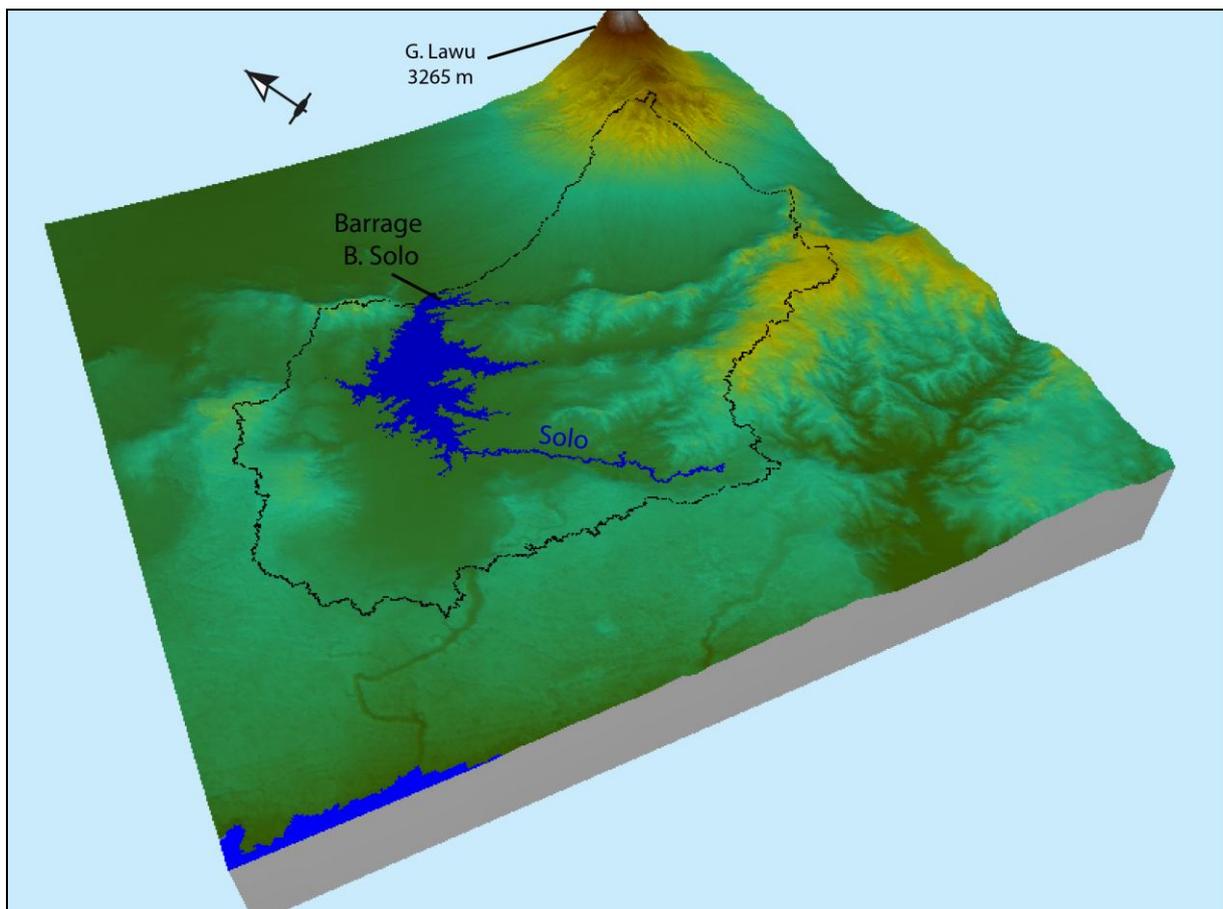


Figure 47 : Localisation du barrage sur le cours du Bengawan Solo

Le bassin amont de ce fleuve (limites en pointillé noir) couvre environ $1\,330 \text{ km}^2$.

2. Le barrage de Mrica



Le barrage de Mrica (Fig.48) ou Sudirman sur le fleuve Serayu a été mis en service en 1989 afin d'assurer une partie de la production électrique pour la région de Java-Centre.

Figure 48 : Barrage de Mrica (*Indonesia Power*)

Barrage (Année)	Fleuve (km)	Hauteur / largeur (m)	Type	Surface bassin (km ²)	Capacité (10 ⁶ m ³)	Fonctions	Opérateur
Wonogiri 1981	B. Solo 540	40 / 830	ER	1350	560	A/F/N/P	PJT I
Mrica 1989	Serayu 158	110 / 832	ER	1022	193,5	P	PT. PLN

A	Agriculture	N	Contrôle et maintien des débits
F	Lutte contre les inondations	I	Industrie
P	Hydroélectricité	W	Fourniture d'eau

Tableau 11 : Présentation des barrages de Wonogiri et Mrica (*Indonesia Power*)

Détails en annexe 2

C. Barrages du bassin du Brantas

La configuration du bassin amont du Brantas ressemble quant à lui à la configuration du bassin amont du Citarum. En effet, on retrouve une succession de grands barrages sur le cours du Brantas (Fig.49 à 51) mais aussi sur certains de ses principaux affluents.

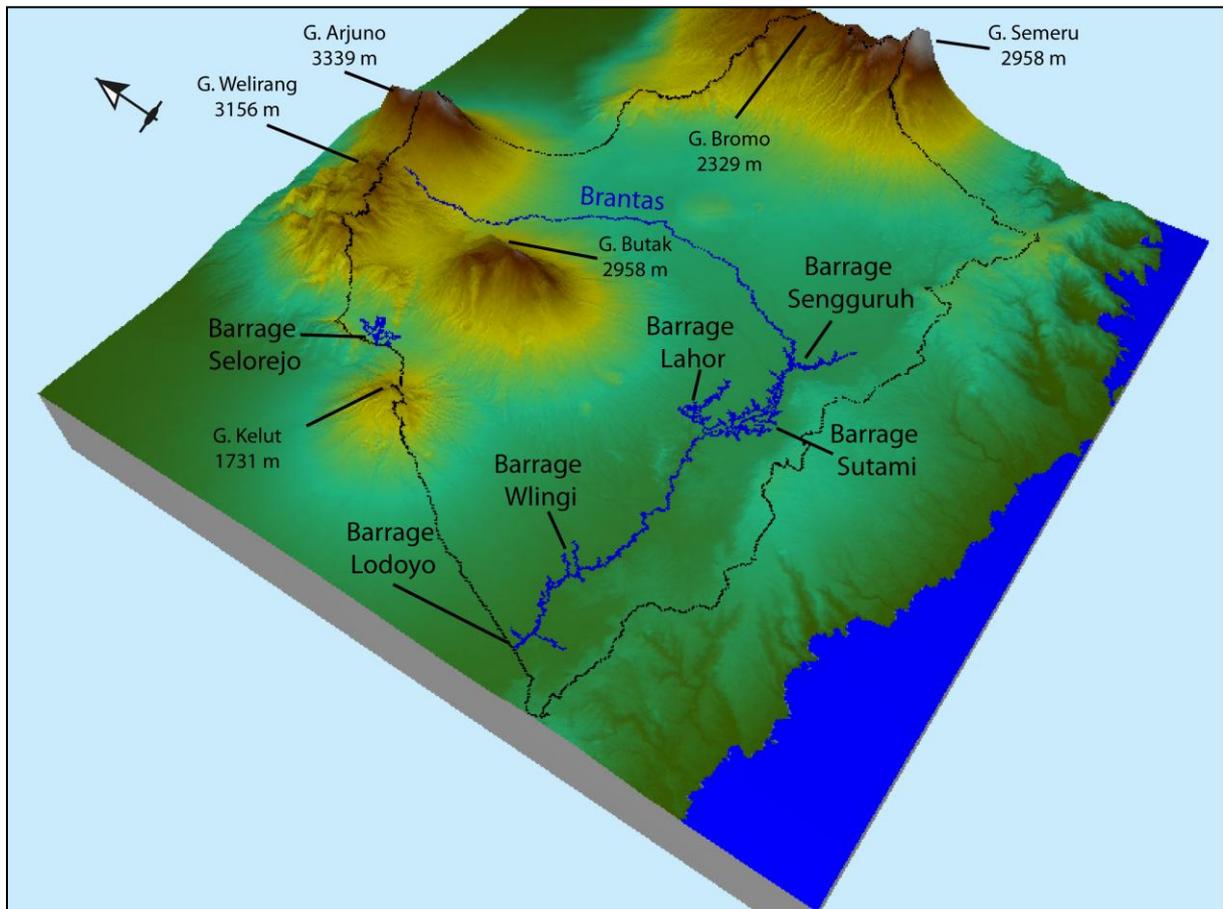


Figure 49 : Localisation des barrages sur le cours du Brantas

Le bassin amont de ce fleuve (limites en pointillé noir) couvre environ 3 235 km².

1. Le barrage de Sengguruh



Figure 50 : Barrage de Sengguruh

Le barrage Sengguruh (Fig.50) est celui situé le plus en amont sur le cours du Brantas mais il est aussi le plus récent. Mis en service en 1988, avec une capacité de $21,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, ses fonctions sont d'assurer un débit normal lors des périodes d'étiage et de produire de l'électricité.

2. Les barrages de Sutami, Lahor, Wlingi et Lodoyo

Les barrages de Sutami (1972 - $343 \times 10^6 \text{ m}^3$), Lahor (1977 - $36,1 \times 10^6 \text{ m}^3$), Wlingi (1977 - $24,10 \times 10^6 \text{ m}^3$) et Lodoyo (1980 - $5,9 \times 10^6 \text{ m}^3$) (Fig.51) mis en service entre 1972 et 1980 ont tous pour rôle commun l'irrigation des terres agricoles, le contrôle des crues et la production hydro-électrique. Cet ensemble de barrages représentent une capacité de stockage de $410 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figure 51 : Barrages de Sutami (a), Lahor (b), Wlingi (c) et Lodoyo (d)

3. Le barrage de Selorejo



Le barrage Selorejo (Fig.52) quant à lui ne se trouve pas directement sur le cours du Brantas, mais sur un de ses principaux affluents, la rivière Konto. Mis en service en 1971 avec un volume initial de $62,3 \times 10^6 \text{ m}^3$, il assure lui aussi le contrôle des crues, l'irrigation des terres agricoles et la production hydro-électrique.

Figure 52 : Barrage de Selorejo

Barrage (Année)	Fleuve (km)	Hauteur / largeur (m)	Type	Surface bassin (km ²)	Capacité (10 ⁶ m ³)	Fonctions	Opérateur
Selorejo 1970	Konto	49 / 447	TE	236	62,3	A/F/P	PJT I
Sutami 1973	Brantas 320	97 / 820	ER	2 050	343	A/F/P	PJT I
Lahor 1975	Brantas 320	74 / 433	ER	160	36,1	A/F/P	PJT I
Wlingi 1977	Brantas 320	48 / 735	TR	2 890	24	A/F/P	PJT I
Lodoyo 1986	Brantas 320	15 /	BM	3 017	5,8	A/F/P	PU
Sengguruh 1988	Brantas 320	34 / 378	ER	1 659	21,5	N/P	PJT I

A	Agriculture	N	Contrôle et maintien des débits
F	Lutte contre les inondations	I	Industrie
P	Hydroélectricité	W	Fourniture d'eau

Tableau 12 : Caractéristiques des barrages du bassin amont du Brantas (Perum Jasa Tirta)

Détails en annexe 2

À travers la présentation de nos terrains, il apparaît que ces derniers montrent une forte sensibilité à l'érosion des sols due à des secteurs amont montagneux et volcaniques. La gestion et l'exploitation de l'eau à travers un ou plusieurs barrages, aux fonctions multiples – jouant alors un rôle majeur dans leurs provinces respectives – constituent ainsi un enjeu de développement très fort. Aussi, ces barrages font partie des plus anciens d'Indonésie en activité, ceci nous permettra alors de disposer des plus longues séries de données afin d'étudier leur évolution et d'éventuels impacts climatiques ou anthropiques. Ces ouvrages disposent également des plus gros réservoirs (en termes de volume) d'Indonésie et de la présence d'enjeux socio-économiques forts rendant la protection et la gestion de ces zones prioritaires. Pour tenter d'avoir une vision globale des différents phénomènes, sera créé un système d'information géographique (SIG) afin de spatialiser et cartographier les différentes informations collectées sur le terrain. Ce dernier sera couplé à une base de données qui permettra de concentrer, sur une même plateforme, cartes et données pour en optimiser l'analyse.

CHAPITRE 3 : ACQUISITION DES DONNÉES ET PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE

Ce troisième chapitre va faire état des données acquises au cours des différentes missions sur le terrain, accompagné d'une analyse critique de ces dernières. Une seconde partie détaillera la méthodologie ainsi que les outils mis en place qui nous ont permis de traiter les données utilisées.

I. Acquisition des données

Après s'être intéressé à la description du cadre javanais et des bassins d'étude qui ont mis en lumière les multiples enjeux de cette recherche, cette partie présentera dans un premier temps un panorama complet des données qui ont été collectées sur le terrain afin de préciser les informations dont nous avons disposées pour notre étude. Un regard critique sera également apporté afin de pouvoir envisager les possibilités et les limites de cette recherche.

A. Acquisition des données sédimentaires : état des données

« Les techniques conventionnelles de quantification du dépôt sédimentaire dans un réservoir, comme les suivis hydrographiques et les méthodes de bilan entre flux entrant et sortant, sont lourdes, coûteuses et longues. De plus la prédiction des profils de dépôt sédimentaire, basée sur des méthodes empiriques et numériques, exige un grand nombre de données d'entrée, alors que les résultats ne sont toujours pas encourageants. » (Goel et al., 2002). Cette remarque illustre parfaitement les problèmes qui se posent dans l'étude de la sédimentation dans les réservoirs de manière générale. Disposant d'un temps et de moyens limités, cette thèse s'est fortement appuyée sur les données existantes et disponibles, mais parfois au prix d'importants efforts diplomatiques. L'objectif a été de recueillir le plus grand nombre de données possibles concernant tous les domaines susceptibles d'influencer la sédimentation des lacs de barrage sur un pas de temps suffisamment long pour remonter, dans la mesure du possible, jusqu'à la construction des différents ouvrages. Un intérêt particulier a été apporté aux données concernant la gestion des barrages et plus spécifiquement ceux portant sur les échosondages, afin de centraliser ces données.

Selon les barrages, le nombre de sondages effectué depuis leur mise en service est largement variable. Certains sont ainsi régulièrement sondés, tandis que d'autres ne le sont que très peu, jusqu'à ne l'avoir jamais été. Cette dispersion de régularités a sérieusement compliqué l'approche comparative de ces réservoirs. Ces disparités, quant à elles, s'expliquent par les coûts financiers intrinsèques à l'opération : d'une part par l'arrêt temporaire des turbines mais aussi par la campagne d'échosondage elle-même.

Pour pallier à ce manque de données, des estimations permettent alors d'évaluer la perte de capacité entre deux sondages. Ces données peuvent être recueillies auprès des acteurs principaux intervenant dans la gestion des bassins. Ainsi, de manière générale l'entreprise *Jasa Tirta* (entreprise publique), par le biais de ses différentes antennes à travers Java, est le commanditaire des campagnes de mesures pour tous les bassins, alors que le *Puslitbang Sumber Daya Air* sous l'autorité du Ministère des travaux publics et d'autres organismes comme *Nippon Koei* sont chargés du travail sur le terrain. C'est donc tout naturellement auprès de ces grands acteurs que les données ont été principalement collectées. L'étendue de cette collecte sera détaillée au sein de ce chapitre par bassin. Les résultats de ces données seront, quant à eux, présentés dans le chapitre suivant.

1. Les sondages de réservoir pour déterminer l'accumulation sédimentaire

Les sondages consistent à déterminer le volume de matériel accumulé dans le réservoir depuis sa mise en eau. D'une importance cruciale, ces mesures à intervalles plus ou moins réguliers permettent de prévoir et de planifier sur le long terme l'utilisation de l'ouvrage. La méthode habituellement employée pour l'étude topographique d'une retenue a peu évolué depuis qu'elle fut décrite par Eakin en 1939. Dans son principe, la méthode consiste à établir une carte bathymétrique du fond du réservoir, qui est ensuite comparée à une carte établie précédemment, afin de mettre en évidence les différences dans les volumes de sédiments déposés. Depuis les premières études de la sédimentation dans les réservoirs, des améliorations notables dans les techniques ont été réalisées du fait d'une plus grande précision des instruments de mesures et de l'avancée des connaissances sur le sujet. Il sera question ici de présenter les différentes techniques servant à quantifier la sédimentation.

a. La technique des profils transversaux : méthodes et technique

En ce qui concerne les réservoirs étudiés, tous appliquent la méthode principale fondée sur les profils transversaux pour étudier la topographie des lacs de retenue. Cette méthode est la plus répandue pour des retenues de moyenne ou de grande dimension ; elle nécessite une étude bathymétrique. Celle-ci consiste à faire le levé topographique d'un certain nombre de profils en travers de la cuvette avant sa mise en eau. Après le remplissage, on lève de nouveau ces profils périodiquement. Chaque profil représente une tranche. Cette méthode nécessite un travail sur le terrain moindre et s'avère aussi moins coûteuse que d'autres méthodes comme celle basée sur les courbes de niveau nécessitant un support aérien. On trouvera des détails concernant spécifiquement cette méthode dans de nombreux ouvrages comme celui de Vanoni (1977). L'application de cette méthode implique la mesure de la cote du fond en de nombreux points dans la retenue. Ces mesures sont toujours effectuées en enregistrant la profondeur de l'eau sous un bateau ainsi que la situation exacte du bateau sur la surface de la retenue. Deux types de mesures sont dès lors nécessaires ; des mesures de position en X et en Y et des mesures de la profondeur Z, ou de la cote de fond (Fig.53).

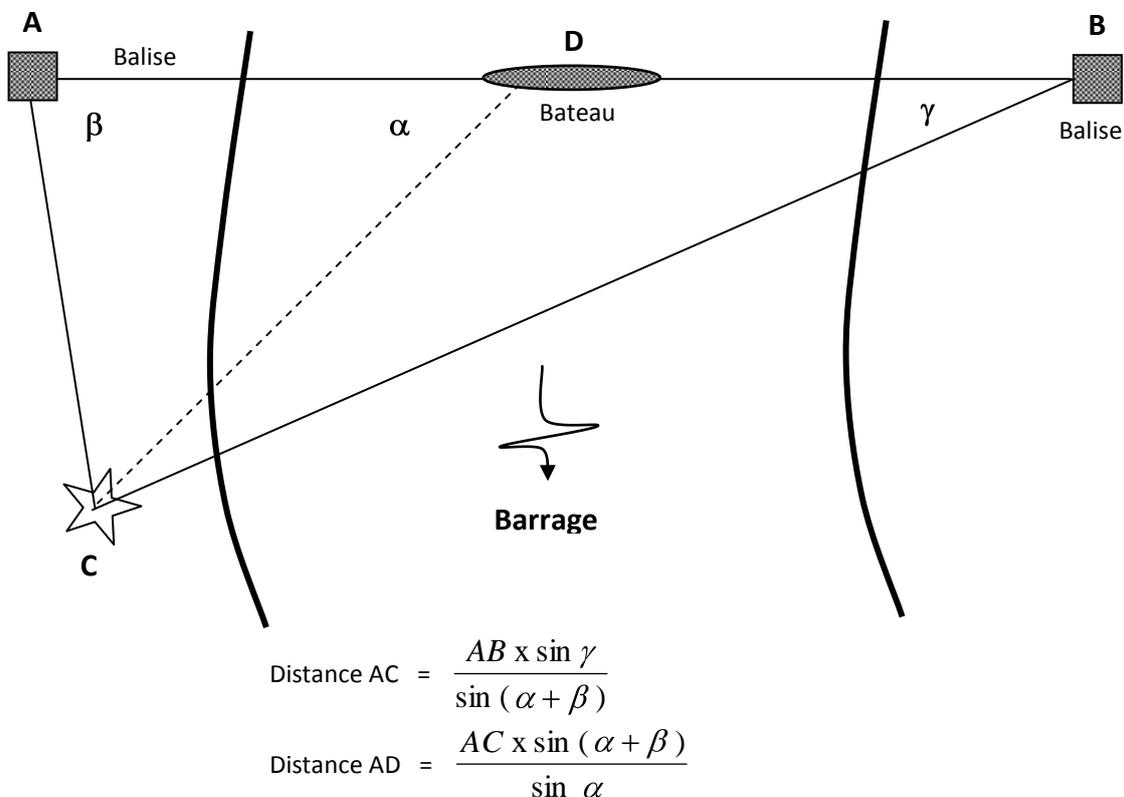


Figure 53 : Détermination de la position du bateau par calcul trigonométrique (Perum Jasa Tirta)

Quantifier la sédimentation d'une retenue revient donc à une étude des volumes par sections en utilisant la formule suivante.

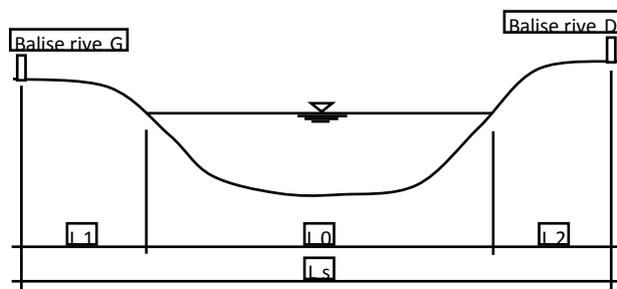
$$V = \frac{1}{3} d \times (A1 + A2 + \sqrt{A1 \times A2})$$

Avec:

- d = distance entre la section 1 et la section 2
- A1 = superficie de la section 1 à une hauteur d'eau donnée
- A2 = superficie de la section 2 à la même hauteur d'eau que la section 1

Le volume de chaque section est ensuite comparé aux données précédentes sur cette même section afin de déterminer le volume de sédiments accumulé sur la période.

C'est pourquoi les réservoirs ont été équipés sur leurs berges de balises permettant de tracer les profils à l'identique d'un sondage à l'autre. Le début d'une campagne de sondage passe ainsi toujours par un état des lieux de ces balises facilement repérables et par l'installation, le cas échéant, de nouvelles si l'une d'entre elles venaient à disparaître ou s'abîmer (Fig.54 et 55).



Ls : Distance totale de la section transversale
 L1 et L2 : Distance émergée de la section transversale
 L0 : Distance immergée mesurée à l'aide du sondeur
Figure 54 : Profil transversal à partir des balises sur chaque rive

DISKRIPSI PATOK SEDIMENTASI	
NO. PATOK:	STAR 5A
KOORDINAT:	ABSIS (X) : 12295.100 meter
	ORDINAT (Y) : -8372.762 meter
	ELEVASI (Z) : 646.876 meter
LOKASI / DAERAH	Kp. Warudayong, Desa Girimukti
WAKTU PEMASANGAN	Agustus 2004
SKETS:	
KETERANGAN :	

Figure 55 : Fiche descriptive d'une balise pour le barrage de Saguling

La technique d'acquisition repose sur une onde principalement acoustique alors émise dans l'eau et produisant une onde retour (écho), lorsqu'un obstacle est rencontré. Le signal ainsi reçu est enregistré afin de fournir les informations nécessaires. La profondeur est déduite de la mesure du temps de trajet du signal acoustique. Connaissant la vitesse moyenne du son, la mesure du temps de parcours permet d'accéder à la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond. Pour l'échosondage du barrage de Saguling en 2004, a été embarqué sur le bateau un sondeur GPSMAP 168 - Garmin permettant d'obtenir une image nette de la dureté et de la structure du fond (intervalle entre les points de 25 mètres / Intervalle de point fixe toutes les 30 secondes). Le positionnement, quant à lui, a été contrôlé depuis les berges (à l'aplomb des balises) par plusieurs théodolites *Wild Heerbrugg* de type T2 avec une précision de 1 seconde alors que le niveau vertical a été contrôlé par un Nak 2 – Leica.

Cette précision reste relative et il est alors important d'en fixer les limites afin d'interpréter les résultats avec les précautions nécessaires. Entre les années 70 (date des premières campagnes de sondage en Indonésie) et aujourd'hui, si la technique est restée la même, les instruments ont considérablement évolué durant cette période. La précision des résultats a bénéficié de cet avancement et s'avère ainsi sensiblement différente. D'un sondage à l'autre il est également assez difficile de reproduire à l'identique la même ligne sur tout le tracé de la section, ceci dû aux mouvements permanents et aux effets de vents que subissent les plans d'eau. Un décalage peut donc exister et influencer plus ou moins fortement sur les volumes relevés. Une certaine marge d'erreur, inévitable, est alors à prendre en compte.

b. L'étude de la granulométrie et la mesure du débit solide dans la retenue

Les campagnes de sondage sont toujours accompagnées de mesures des flux solides entrant dans le réservoir. Afin de gérer au mieux le problème de la sédimentation dans les réservoirs, il est essentiel de connaître la taille des sédiments qui y pénètrent par l'apport des ruisseaux et des rivières, ainsi que par ruissellement direct. La granulométrie est en effet extrêmement variée, allant des graviers et des cailloux jusqu'aux particules de limon et d'argile. La vitesse du courant dans une retenue étant généralement faible, les matériaux grossiers vont rapidement se déposer pour former un delta au niveau de l'entrée du réservoir (Fig. 56). Les particules supérieures à la taille des limons ne sont évacuées d'une retenue que très rarement.

Cette grande hétérogénéité granulométrique pose problèmes puisqu'il est impossible de mesurer à la fois la concentration solide charriée et la charge en suspension d'une section donnée.



Figure 56 : Sédimentation dans le barrage de Selorejo (Jasa Tirta, 1997)

En observant le delta à l'entrée de la kali Konto dans le lac Selorejo, on note que la forte sédimentation est la conséquence d'un cours d'eau n'ayant plus une compétence assez élevée pour transporter les sédiments grossiers plus au large dans le lac. On assiste donc à la création d'un delta (flèche jaune), et à des dépôts latéraux (flèches rouges), qui vont combler progressivement le lac.

Malgré cela, les données pourront servir à estimer le débit solide total en permettant de mettre en évidence une relation entre le débit liquide et le débit solide. C'est pourquoi il est essentiel, lors des prélèvements, de mesurer le débit liquide correspondant. La courbe du transport solide peut être obtenue par la mesure continue du débit liquide. Les prélèvements se faisant sur des intervalles irréguliers, il est fort probable que les périodes de forts apports (période de crues) ne soient pas toujours mesurées. Ces courbes seront donc plus ou moins fiables en fonction du nombre d'années de suivi, du nombre de prélèvements effectués et de la variété des sédiments rencontrés à chaque épisode.

2. Données concernant les échosondages

L'état de la sédimentation des réservoirs sur le cours du Citarum a été suivi par *Jasa Tirta II*, qui n'a entamé que très récemment des échosondages. La mise en évidence d'une évolution depuis leur mise en service est donc assez difficile.

Les vidanges ou « flushing » permettent de réduire le volume de sédiments à l'intérieur d'un réservoir. Cette évacuation contrôlée d'une fraction d'eau du barrage est effectuée afin d'éviter une sédimentation trop importante qui pourrait obstruer les conduites d'évacuation d'eau et gêner le fonctionnement du barrage. Lors de la vidange, une partie des sédiments ainsi que l'eau chargée en azote, en ammoniac et en hydrogène sulfureux rejoint la partie aval du fleuve et peut alors nuire à la qualité de l'eau.

La figure 57 ci-dessous montre l'opération de vidange réalisée le 29 Décembre 2004 sur le réservoir de Wonogiri. Le volume de débris recueilli en face de l'évacuateur de crue est estimé à environ 1 250 m³. Durant le lâché d'eau destiné à l'évacuation des débris les trois portes ont été entièrement ouvertes durant environ 50 minutes.



Figure 57 : Lâché d'eau sur le réservoir de Wonogiri le 29/12/2004

Lors de la saison sèche, lorsque le niveau d'eau du réservoir est à son plus bas, sont effectués des curages permettant de récupérer du volume utile. On distingue deux types de dragage. Un premier concerne l'entrée de la conduite forcée qui est une zone très sensible puisque celle-ci permet à l'eau du réservoir d'alimenter les turbines de la centrale hydro-électrique (Fig.58).



Figure 58 : Dispositif de dragage devant la conduite forcée du barrage de Sengguruh

- 1/ Un cordon flottant permet de dévier une partie des sédiments et des débris de surface sur les bords afin d'éviter une accumulation devant la conduite forcée.
- 2/ Une première machine permet d'extraire les sédiments afin de les déposer sur la rive.
- 3/ Une seconde machine récupère les sédiments afin de les transporter par voie terrestre.

Le second type de dragage à lieu sur le réservoir même par succion (Fig. 59)



Figure 59 : Extraction des sédiments dans le réservoir par aspiration dans le réservoir de Selorejo

- 1/ Un dragueur permet d'aspirer l'eau du réservoir et d'effectuer un premier tri en retenant les particules les plus grossières, puis en expulsant l'eau devenue moins trouble.
- 2/ Un circuit de vannes, partant du dragueur, transporte l'eau chargée de sédiments
- 3/ ...vers des bassins d'évaporation.
- 4/ Une fois l'eau évaporée, ces terrains pourront être mis en valeur.

Ces opérations étant couramment effectuées dans les réservoirs étudiés, il est important de tenir compte de ces derniers afin de quantifier le plus fidèlement possible l'apport des zones en amont des réservoirs.

4. Données concernant la charge sédimentaire dans les cours d'eau

L'acquisition des données hydrologiques et sédimentaires est nécessaire du fait qu'une incertitude existe sur la fiabilité de ces données pour les moyens et grands bassins-versants, principalement en raison d'un manque de mesures lors des périodes de débit maximum et de l'absence de mesures spécifiques à la charge de fond (Rijsdijk et Bruijnzeel, 1990, 1991 ; Brabben, 1981). Il faut aussi ajouter à ceci que la plupart des mesures (détaillées) de l'écoulement et de la charge sédimentaire à Java n'ont rarement duré plus de trois ans, qui

rend ainsi ces évaluations sensibles aux influences des extrêmes climatiques qui peuvent se produire pendant la période d'observation (Dickinson, et al. 1990 ; White, 1990). Enfin, le constat est que les données de MES sont assez pauvres et qu'assez peu de prélèvements sont existants, et particulièrement en période de crues, pour que ces résultats puissent être considérés comme représentatifs. Les premières études ont été principalement conduites par plusieurs centres secondaires du département de la réhabilitation des terres et de la conservation des sols (Ministère des forêts), alors que les plus récentes sont sous la responsabilité de la section hydrologie de l'agence sur la recherche et du développement hydraulique (Ministère des travaux publics).

a. Les données de matières en suspension (MES) dans les cours d'eau javanais

Afin de mieux cerner les volumes en jeu dans la sédimentation des lacs de barrages, nous avons recherché des données concernant la MES afin d'évaluer les quantités de sédiments pouvant être transportées par les cours d'eau. Cette recherche effectuée sur tous les bassins d'étude nous a permis de collecter sur des périodes différentes les données présentées ci-dessous :

Pour le bassin du Citarum nous disposons d'informations pour les sites localisés dans la figure 60 de 1976 à 2004 et qui sont détaillées dans le tableau 14. Le tableau de données présente le nombre de prélèvements de MES par année pour chacune des stations. Ces prélèvements, parfois nombreux pour quelques unes de ces stations, sont étalés tout au long de l'année (un prélèvement par mois) afin de bien représenter la fluctuation du transfert sédimentaire entre la saison sèche et la saison des pluies. La station de Nanjung a bénéficié d'un suivi de trois mois en 2004 avec trois prélèvements quotidiens qui nous apporte des renseignements à un pas de temps journalier, permettant ainsi d'affiner notre étude.

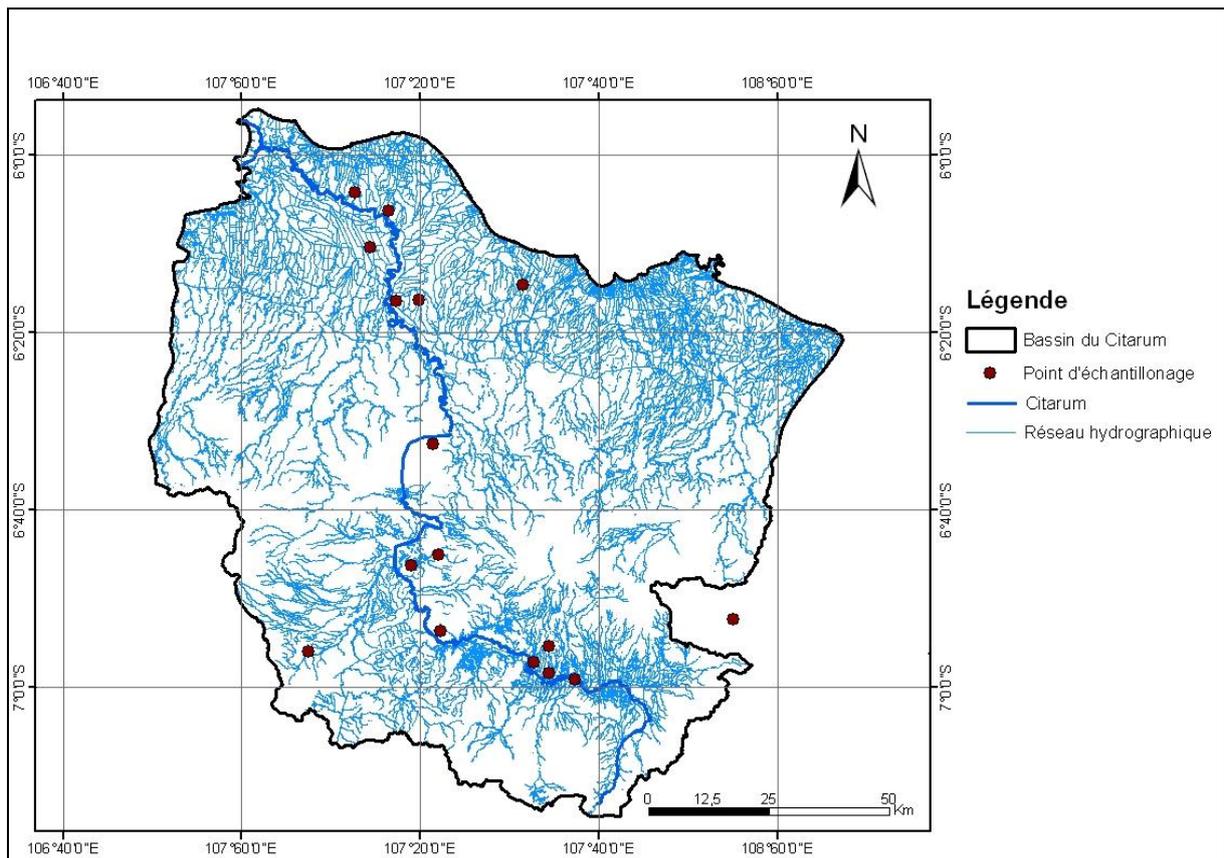


Figure 60 : Lieu d'échantillonnage de la MES dans le bassin du Citarum par les différents organismes indonésiens

Chapitre 3 – Acquisition des données et présentation de la méthodologie

Cours d'eau	Station	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	..	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Source
Citarum	Saguling										11	8	7		9	10	7			2			4				(5)
Citarum	Cirata										11	11	9	8	9	10	7			2			4				(5)
Citarum	Jatiluhur										7	8	9	7	9	10	7			2			5				(5)
Citarum	Margahayu										11	11	9	8	9	10	7	12	10	4	2		4				(5)
Citarum	Nanjung		6	6	3						11	11	8	8	9	10	7	12	10	4	2		4	4	2	105	(2)/(3)/(5)
Citarum	Cijeruk												7	7	9	9	12		10	4	2						(5)
Citarum	Kertalaya	9																									(1)
Citarum	Medan Asem	9																									(1)
Citarum	Tapak Serang	27																									(1)
Citarum	Kampung Baru	18																									(1)
Citarum	Teluk Kambulu	27																									(1)
Citarum	Pebayuran	18																									(1)
Citarum	Cipetir		3		6																						(2)/(3)
Citarum	Cimeta						2																				(4)
Citarum	Sumedang							6	2																		(4)
Citarum	Palumbon		3		6																						(2)/(3)
Citarum	Tanjung Pura	9	9	3	3	2	10																				(1)/(2)/(3)/(4)
Citarum	Dayeukolot						1	2															4				(4)/(5)
Cikapundung	Gandok		6		3																						(2)/(3)
Cikapundung	Maribaya		6		3																						(2)/(3)
Cigulung	Maribaya		6		3																						(2)/(3)
Cilamaya	Cipeundeuy		5																								(2)
Cikondang	Cihaur						2																				(4)
Cicatih	Kebonrandu		6	3	3																						(2)/(3)
Cikarang	Cikarang		3	3																							(2)/(3)
Kali Sewo	Sewoharjo		6	3																							(2)/(3)
Cianten-G.P	Kracak		6	3	7																						(2)/(3)
Ciklung	Krakak		3	3	3																						(2)/(3)
Saluran Citatih	Babakan		6	1	9																						(2)/(3)
Cipunagara	Salamdarma		6	3																							(2)/(3)
Cipunagara	Sumurbarang		6	3																							(2)/(3)

(1) Direktorat Penyelidikan Masalah Air / Direktorat Jend. Pengairan, 1976 / (2) Hasil analisa kadar sedimen dan ukuran partikel - Direktorat Penyelidikan Masalah Air / Direktorat Jend. Pengairan, 1977 / (3) Hasil analisa kadar sedimen dan ukuran besar butir, 1979 / (4) Puslitbang pengairan / badan litbang dan departemen pekerjaan umum, 1980/1984 / (5) Water Quality Year Book 1989/2003 Puslitbang

Tableau 14 : Présentation des données de MES collectées

En ce qui concerne le bassin versant du Brantas, une des premières études a été menée à la fin des années 1970. Nous disposons ainsi de données partielles pour 10 stations installées dans la partie amont fleuve (Fig.61).

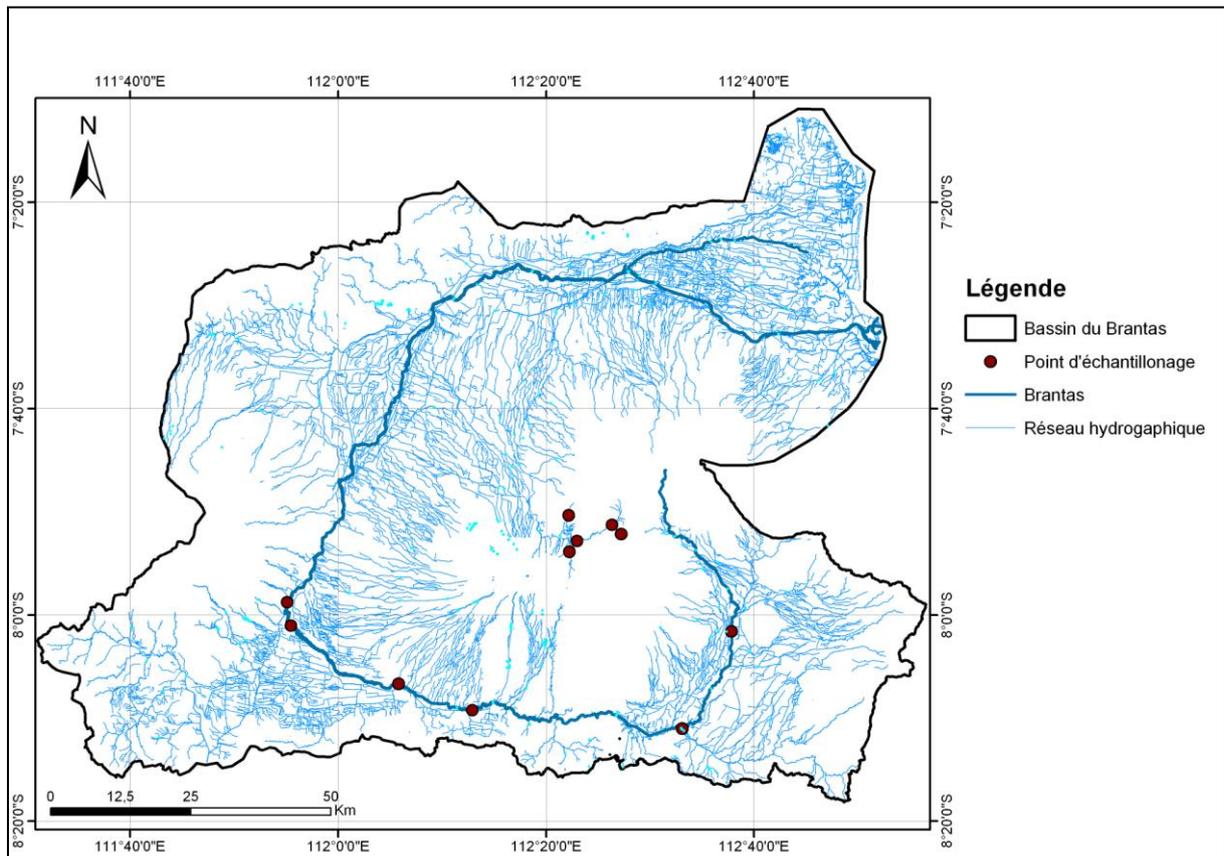


Figure 61 : Lieu d'échantillonnage de la MES dans le bassin du Brantas par les différents organismes indonésiens

b. Campagne d'échantillonnage de MES dans les cours d'eau.

Afin d'obtenir une meilleure vision des données de MES récoltées dans les différents organismes, nous avons décidé d'effectuer une campagne de mesure sur une période d'un mois entre mars et avril 2005. L'objectif de cette mission était de comparer données récoltées et mesurées afin de valider ou non la représentativité des données.

Nous avons choisi le site de Margahayu dans le bassin amont du Citarum où nous avons pu effectuer un prélèvement manuel journalier pendant un mois. Chacun de ces prélèvements étaient composés de trois échantillons (à gauche / au milieu / à droite du chenal) et ont été effectués à partir d'un pont (Fig.62) afin d'en faciliter l'opération. Nous avons posé des repères sur ce dernier afin que les prélèvements quotidiens soient pris au même endroit,

sans mesures faussées (Fig.63). La figure 64 présente la section transversale du Citarum sur le lieu de prélèvement et les trois hauteurs d'eau constatées lors des campagnes de terrain.



Figure 62 : Lieu de l'échantillonnage de MES à Margahayu



Figure 63 : Marques effectuées sur le pont pour les mesures

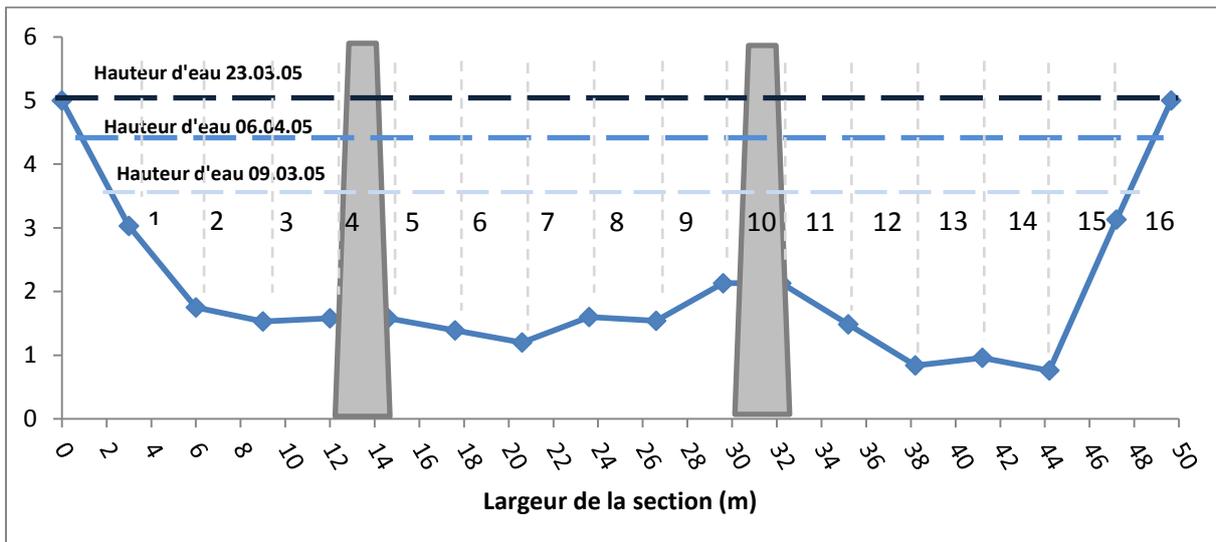


Figure 64 : Section transversale du site d'échantillonnage à Margahayu

Ces prélèvements manuels quotidiens ont été complétés de trois sorties sur le site de prélèvements avec l'équipe du *Puslitbang* pour effectuer des mesures instrumentalisées afin d'obtenir une référence fiable à comparer aux échantillons quotidiens. Deux appareils ont été utilisés pour ces mesures. Un premier pour mesurer les débits (A-Ott n°1-83814 / Fig.65), devant être couplés avec la mesure de la section mouillée afin d'en dresser le profil. Le second type de mesure fût dédié aux prélèvements de MES (USDH-49 / Fig.66). Ces mesures ont été effectuées à partir d'un pont enjambant le fleuve Citarum avec les appareils attachés par une corde. Les mesures du débit ainsi que les prélèvements sont donc représentatives du lit en surface et non en profondeur.



Figure 65 : A-Ott n°1-83814 pour le calcul des débits



Figure 66 : USDH -49 pour le prélèvement de MES

Lors des trois mesures sur le terrain nous avons pu constater la difficulté de calculer de manière précise les débits à l'image des nombreux débris flottants qui sont venus s'accrocher au saumon et au moulinet, ceci ayant pour conséquence de devoir répéter plusieurs fois les mesures (Fig.67 et Fig.68).



Figure 67 : Débris végétaux

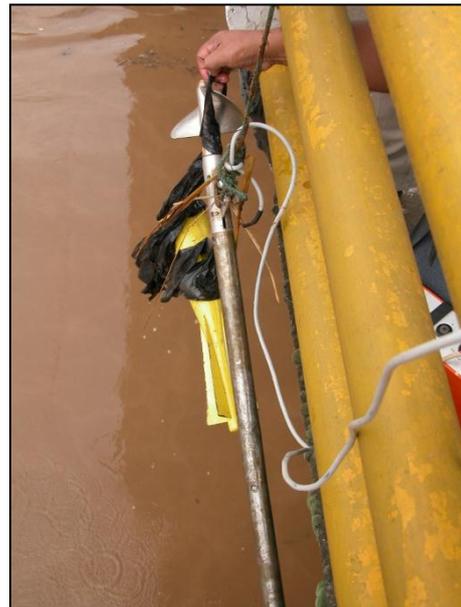


Figure 68 : Débris plastiques

Une fois les échantillons collectés une seconde phase a été réalisée en laboratoire afin de quantifier les sédiments présents dans chaque échantillon. Pour ce faire, nous avons suivi le protocole SNI 03-3961-1995, méthode standardisée indonésienne, pour connaître le volume de sédiment non dissous dans l'eau par sédimentation. Le détail de la méthode est présenté en annexe 3.

Les résultats de cette campagne de prélèvements ainsi que les résultats obtenus auprès des divers partenaires seront présentés dans le chapitre suivant.

B. Acquisition des données sur les facteurs de la sédimentation

Plusieurs types de données ont été nécessaires pour cette recherche. Les premières d'entre elles correspondent aux données hydro-climatiques sur plusieurs pas de temps (horaire à annuelle). Une collecte systématique des données des stations en plusieurs points du bassin a été organisée afin de pouvoir étudier l'influence de ces derniers en allant de l'évènement météorologique jusqu'à la fluctuation saisonnière depuis la construction des barrages. Cela nous a permis également de pouvoir déterminer les variations spatiales afin de mettre en lumière les zones les plus arrosées, donc les plus favorables à l'érosion.

Un second volet de données vient apporter un aperçu des conditions du milieu naturel et de ses transformations au cours des dernières décennies. Il s'agit essentiellement de données concernant la structure en profondeur et en surface des sols ainsi que leurs différentes mises en valeur. L'apport d'images satellitaires a aussi permis de travailler de manière diachronique sur l'évolution de l'occupation des sols.

1. Collecte des données pluviométriques

La pluviométrie étant l'agent principal intervenant dans le décrochement des matériaux sur les versants, il est important d'avoir une bonne connaissance de ce facteur, en particulier pour le cas de l'Indonésie connaissant un climat tropical humide. De nombreux organismes sont détenteurs de ces données de l'échelle locale et à l'échelle nationale mais il n'existe cependant pas d'institution qui serait en charge de centraliser ces données climatologiques en Indonésie. Il a donc fallu rencontrer chacun d'entre eux pour dresser un état des données et même de se rendre directement dans les stations de mesures afin de pouvoir récupérer les données. C'est donc à partir de ces données, recueillies aussi bien sous forme papier que numérique, que se fonde notre étude de la pluviométrie. L'objectif a été dans un premier temps de localiser les zones les plus arrosées et, dans un second, de voir à quelle période leur pouvoir érosif fût le plus important.

a. Les données journalières

Celles-ci représentent les données le plus couramment disponibles et rendent bien compte des variations intervenant au cours d'une année. Elles permettent de définir les caractéristiques pluviométriques de l'aire étudiée et de comparer plusieurs années entre elles afin d'en définir les tendances et les évènements exceptionnels. Pour les stations disposant d'un suivi assez long il a été possible de faire la somme des précipitations pour obtenir le total cumulé par mois et connaître la pluviométrie annuelle de ces stations. Ces données ont également servi à comparer les années entre elles, établir les tendances sur le temps à long terme et déterminer les années exceptionnelles, comme lors des différentes récurrences du phénomène El Niño.

Les figures (Fig.69 à 72) ci-dessous indiquent les stations où des données ont été collectées.

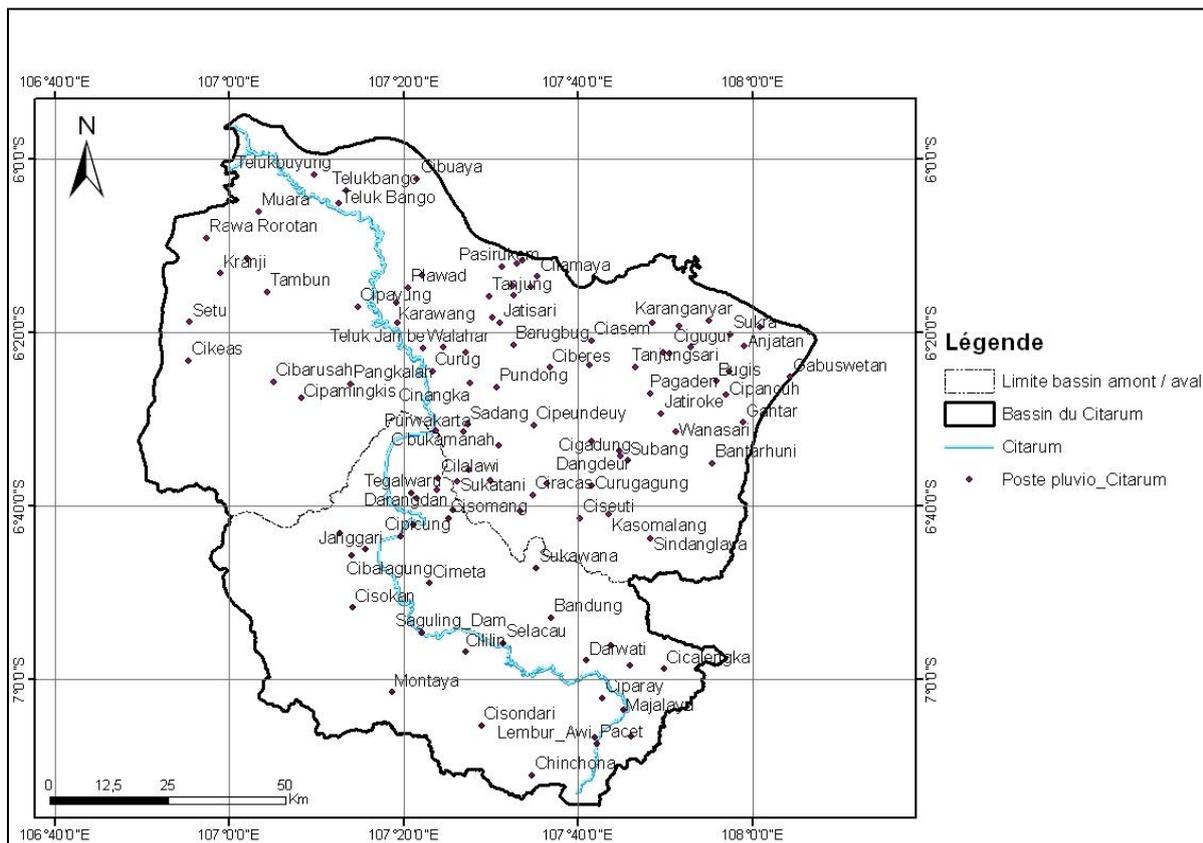


Figure 69 : Postes pluviométriques disponibles dans le bassin du Citarum (sources diverses)

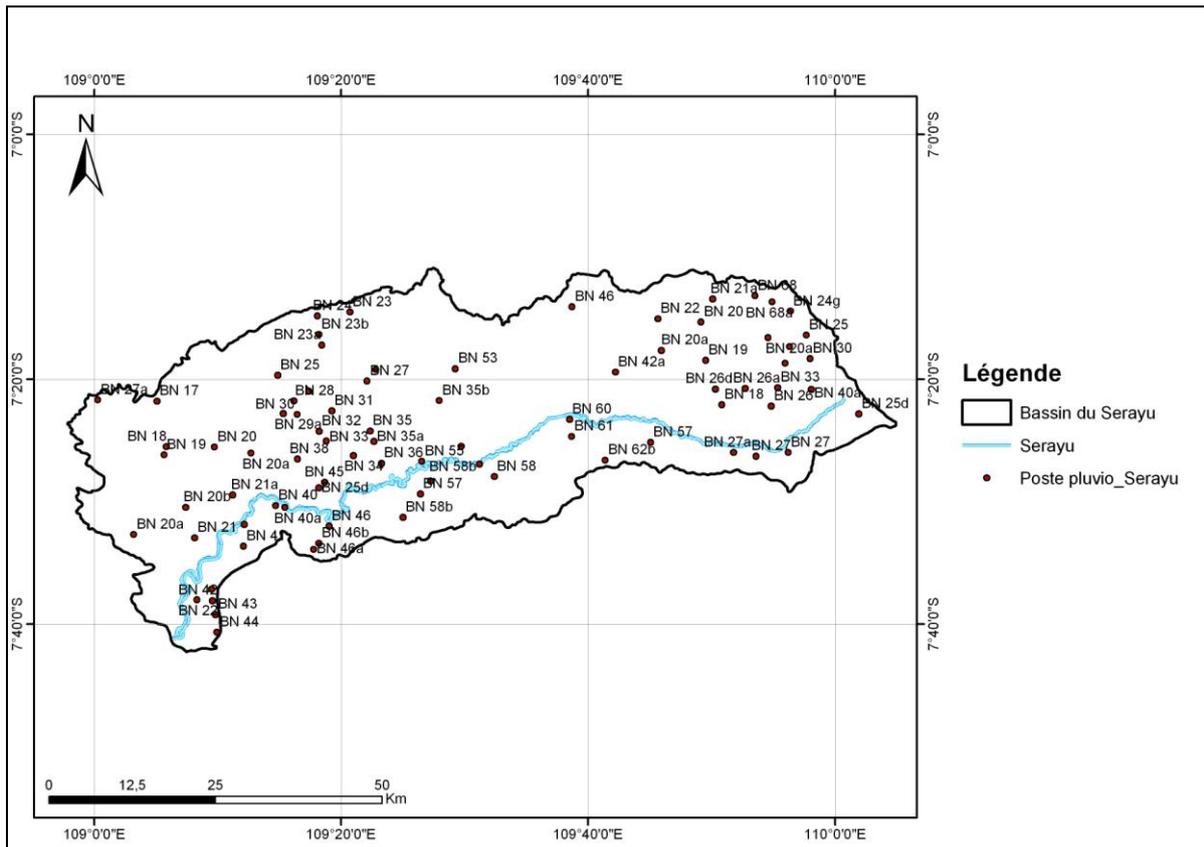


Figure 70 : Postes pluviométriques disponibles dans le bassin du Serayu (sources diverses)

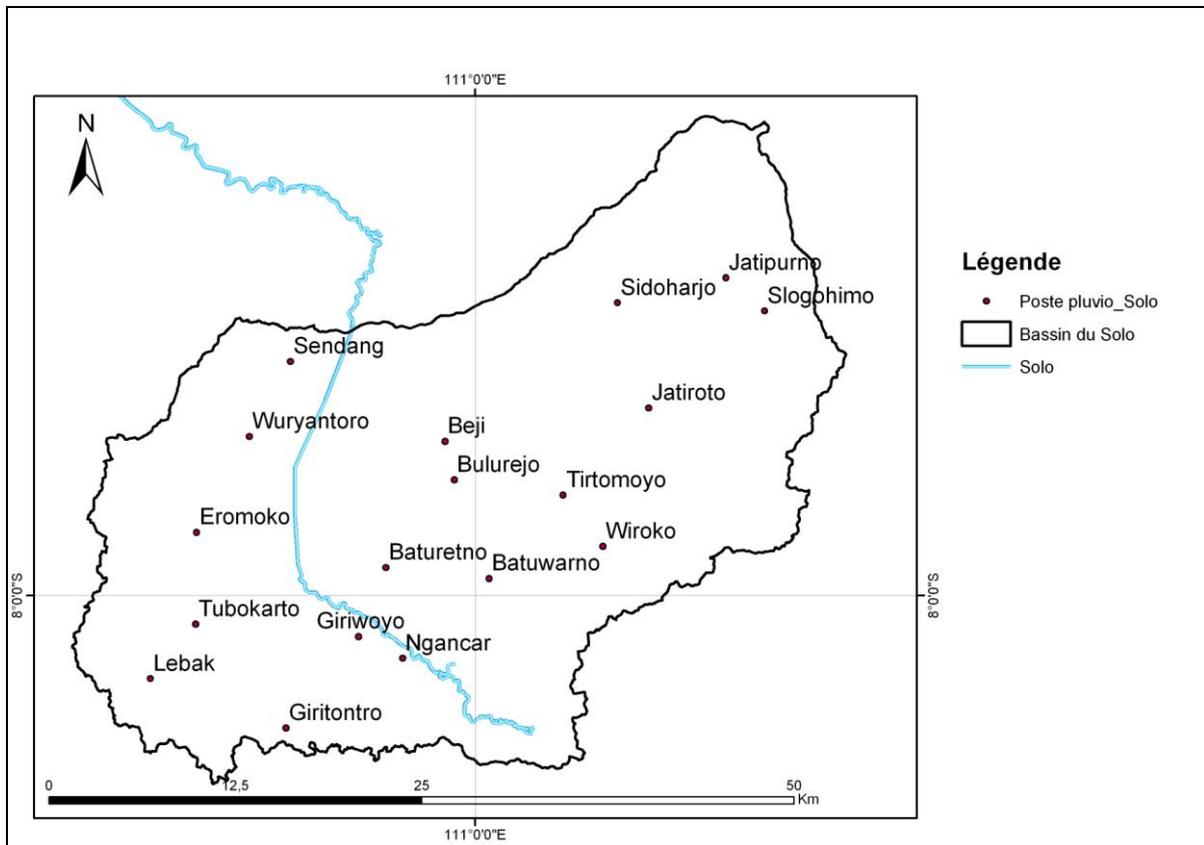


Figure 71 : Postes pluviométriques disponibles dans le bassin amont du Solo (sources diverses)

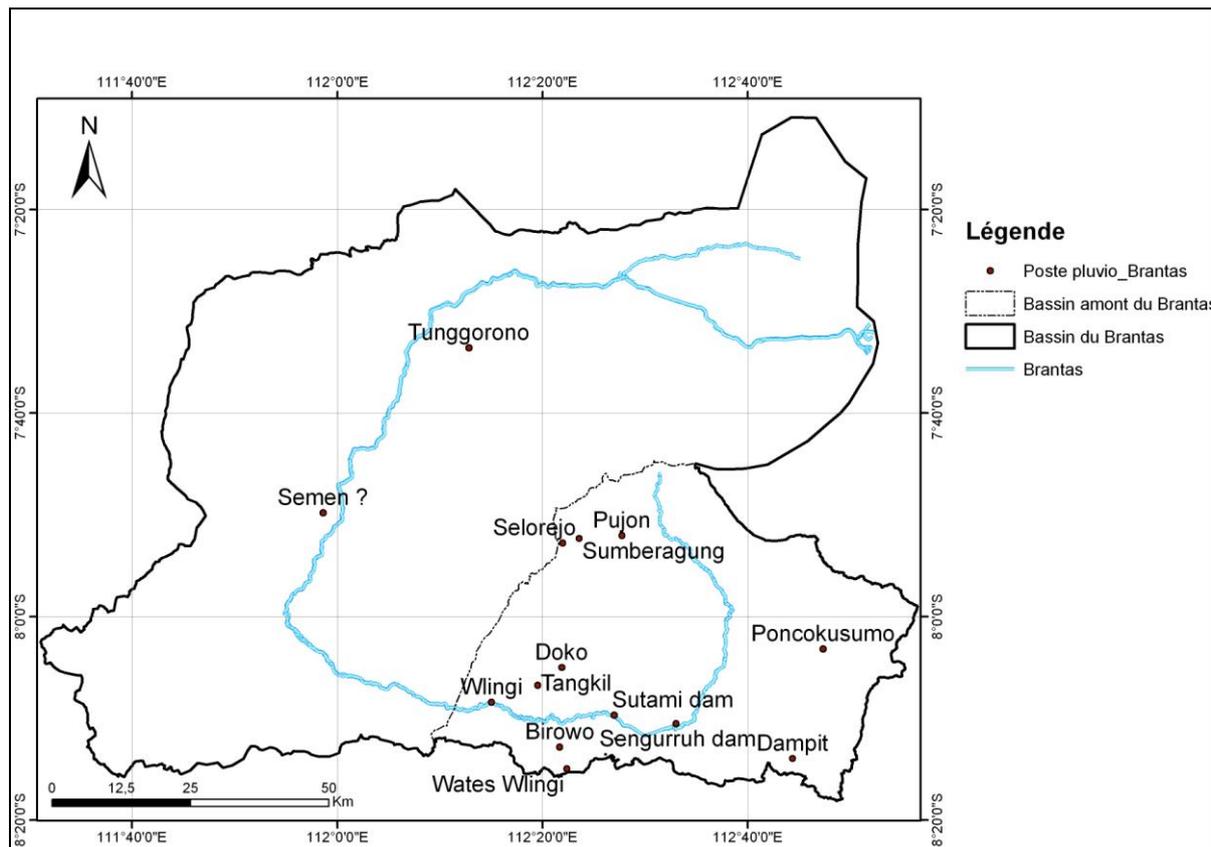


Figure 72 : Postes pluviométriques disponibles dans le bassin du Brantas (sources diverses)

b. Les données horaires

Pour une étude plus précise à l'échelle de l'évènement et pour connaître le temps de réponse d'un cours d'eau aux précipitations, les données horaires constituent ainsi une source d'informations pertinente. Plus complexes à obtenir car demandant un enregistrement en continu et un matériel robuste, ce type de données est disponible qu'en de rares stations et depuis une période assez récente. Quelques unes de ces stations ont été installées dans le bassin du Citarum et gérées par *Jasa Tirta*.

2. Collecte des données hydrologiques

Les débits rendent compte du volume d'eau en déplacement dans le bassin-versant. Ces transferts liquides – fortement corrélés avec les précipitations – permettent le transit des matériaux érodés des zones amont vers l'aval. Ces données sont donc nécessaires à la compréhension des rythmes de transfert dans un bassin. Un intérêt particulier sera porté sur les périodes de crues du fait de leurs forts pouvoirs érosifs sur les berges ainsi que pour leurs grandes capacités de transports de sédiments.

a. Les données journalières

Les principales données ont été collectées dans le bassin amont du Citarum alors que, faute de temps, la collecte n'a pas été aussi dense que souhaitée pour les autres zones d'études. Tout comme les précipitations, il s'agit essentiellement de données journalières.

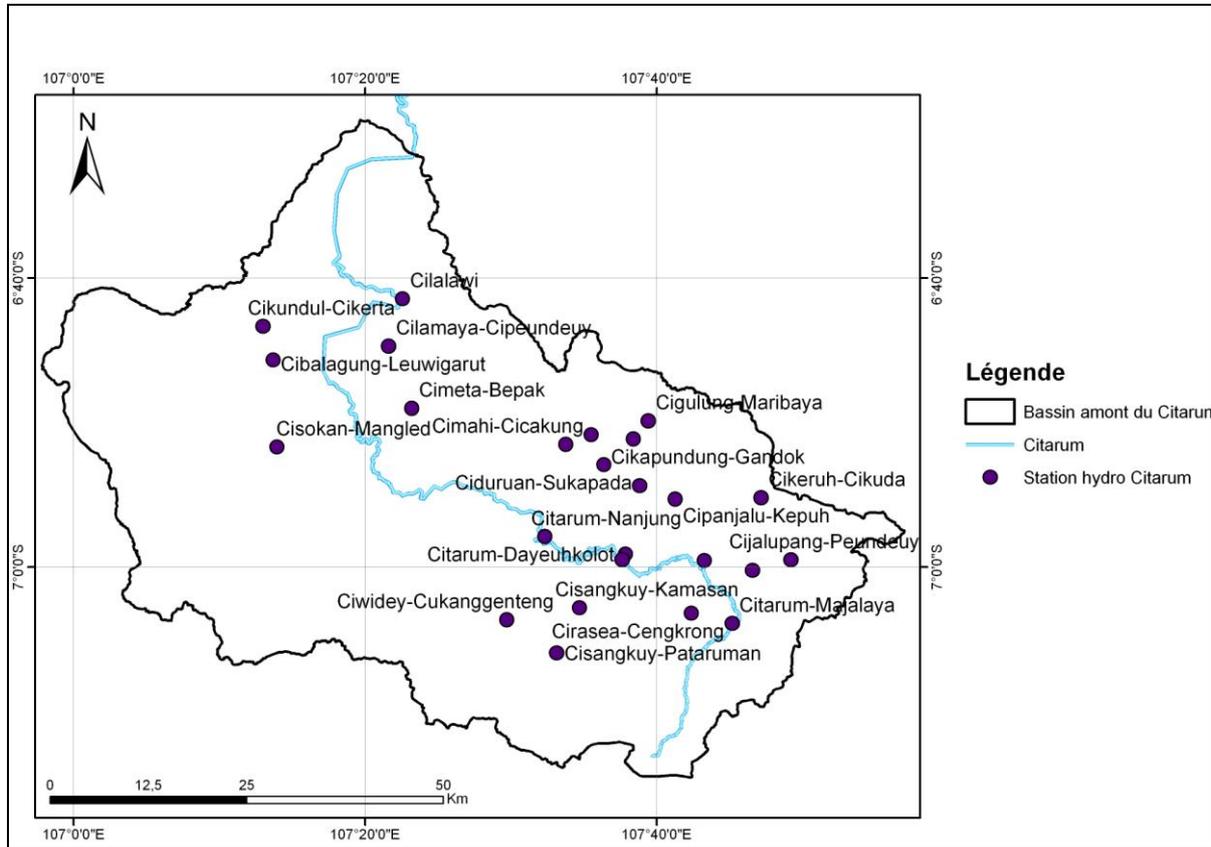


Figure 73 : Localisation des stations hydrologiques dans le bassin amont du Citarum

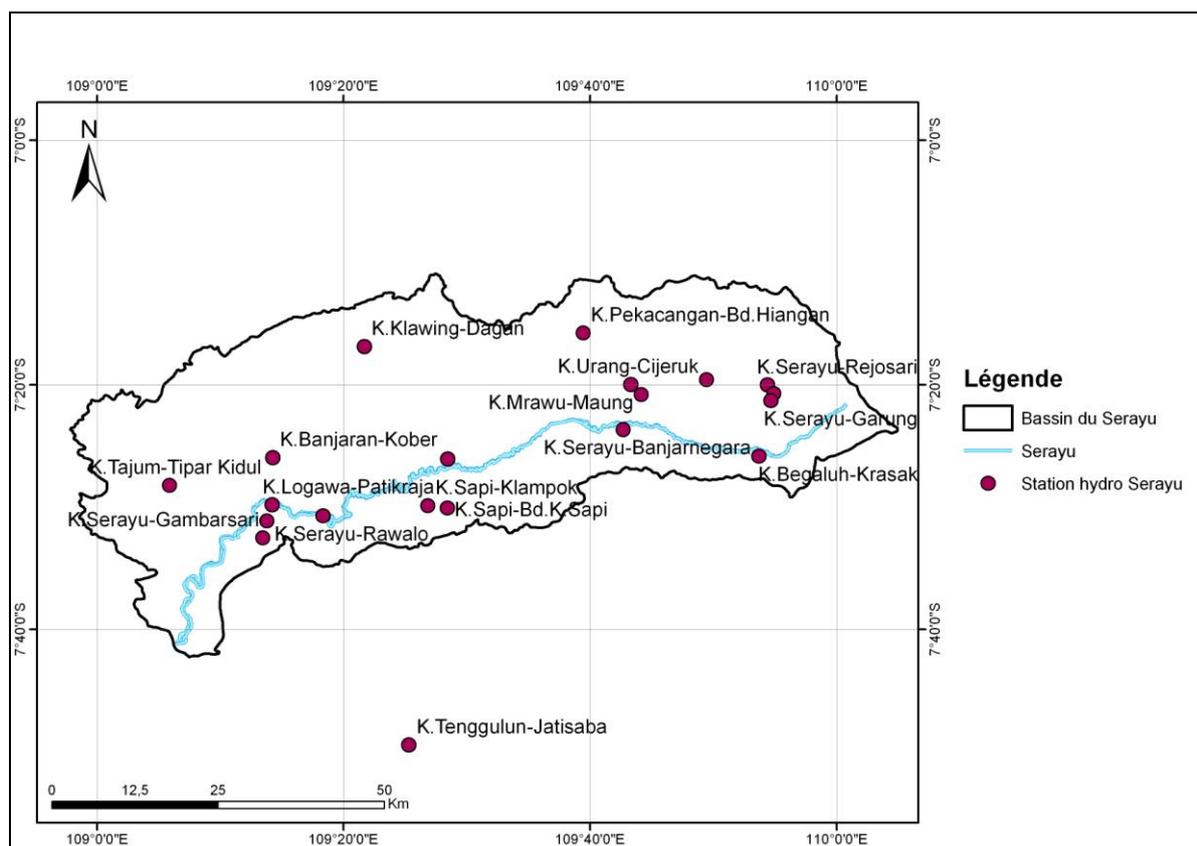


Figure 74 : Localisation des stations hydrologiques dans le bassin amont du Serayu

b. Les données horaires

Pour préciser les données journalières, nous disposons sur une courte période de données horaires concernant les bassins de la Konto (tributaire du Brantas) et du Citarum. Ces dernières permettront d'étudier à une échelle de temps plus fine le temps de réponse des cours d'eau aux épisodes pluvieux. Nous avons aussi pu récolter sur le terrain des données de stations nouvellement installées dans le bassin du Citarum allant même jusqu'à un intervalle de 6 minutes. Ces données apparaissent alors comme des données de premier ordre afin de comprendre les mécanismes de crue dans ces secteurs.

3. Collecte des données numériques

Depuis maintenant plusieurs décennies, l'apparition des données numériques dans la cartographie et l'analyse spatiale vont nous permettre, à l'aide d'outils dédiés, l'analyse et le traitement de quantités d'informations afin de pouvoir mieux comprendre le fonctionnement et les évolutions des secteurs étudiés. Ces données servent de base à toute la cartographie présente dans cette recherche. Souvent volumineuses, une bonne

organisation et une structuration cohérente de ces données en permettront une exploitation efficace.

- a. Données numériques pour le SIG : Rassembler et homogénéiser les informations disponibles

Travaillant sur des zones très étendues, nous avons eu besoin de disposer d'informations cartographiques dans plusieurs domaines afin de pouvoir mieux appréhender les territoires étudiés. Nous nous sommes donc attachés à recueillir un grand nombre d'informations cartographiques sous forme numérique auprès de bureaux en disposant. Ces dernières alimentent un système d'information géographique en vue de la production de cartes à la fois dans le travail préparatoire de terrain pour localiser les zones de recherches mais aussi dans l'exploitation et le rendu des résultats acquis.

Il s'agissait dans un premier temps de chercher à collecter toutes les informations cartographiques numérisées de nos secteurs d'étude. Ces couches d'informations ont été digitalisées à partir de cartes papiers au 1/25 000^{ème} du *Bakosurtanal* (équivalent de l'IGN en France) par différentes agences. Nous avons donc commencé par rechercher les couches nécessaires à la préparation de l'architecture du SIG, c'est à dire les limites administratives, la topographie, le réseau hydrographique ainsi que les réseaux de communication. D'autres couches d'informations thématiques ont aussi été intégrées comme la géologie, la pluviométrie, l'occupation du sol ainsi que des informations issues des derniers recensements nationaux. Ces données ont été acquises auprès de la dizaine d'organismes partenaires qui possédaient, pour des projets spécifiques, ces cartes sous forme numériques. La centralisation de toutes ces données au sein d'un même SIG a nécessité plusieurs missions de collecte sur différentes années, et ce sur toute l'île de Java auprès des organismes concernés. Puis un important travail d'homogénéisation des données fût nécessaire afin de pouvoir les centraliser en un seul et unique outil, et par conséquent tout à fait novateur à ce jour. Cet important investissement a ainsi permis de croiser différentes informations afin d'aboutir à de nouvelles informations spatialisées utiles à notre analyse. Non seulement nécessaires à notre recherche, la création de ce nouvel outil pourra devenir par la suite un instrument de premier ordre d'aide à la décision au profit de tous les acteurs opérationnels impliqués dans la gestion de bassin en Indonésie.

En s'appuyant sur toutes les données collectées, il a alors été possible de créer de nouvelles couches d'informations (ajout des localisations des points de mesures de la MES par exemple) ou encore de préciser certaines informations manquant de détails pour notre étude (limite des bassins-versants ou encore fusionner les tracés représentant un seul et même cours d'eau / routes / limites etc.). Pour certaines informations apparaissant redondantes, un choix de sélection qualitatif a été opéré.

Le tableau ci-dessous récapitule les données disponibles pour l'ensemble des bassins étudiés (Tab. 15).

DONNÉES	COUCHES	SOURCES
Hydrologie et climatologie	Réseau hydrographique pérenne	PJT 1 - Malang PJT 1 - Solo PJT 2 - Bandung Puslitbang - Bandung VSI - Bandung Univ. Brawijaya - Bandung UGM - Yogyakarta Departemen PU - Jakarta ADB. - Jakarta NEDECO - Jakarta Projet CILCIS - Jakarta BAPPENAS - Jakarta
	Réseau hydrographique saisonnier	
	Stations hydrologiques	
	Stations pluviométriques	
	Isohyètes	
	Points de mesures de M.E.S.	
Infrastructures	Barrages	
	Ponts	
	Canaux	
Administration	Limite de province	
	Limite de kabupaten	
	Limite de kecamatan	
	Limite de desa	
Axe de transport	Réseau routier	
	Réseau ferré	
Topographie	Courbes de niveau	
	Points côtés	
	Modèle numérique de terrain	
Géologie	Formation géologique	
	Structure et failles	
Occupation du sol	Occupation des sols 2000	
Données statistiques	Données du recensement 2000	
	Données du recensement 2003	

Tableau 15 : Données présentes dans le SIG

b. Collecte des images satellitaires

Afin d'étudier plus finement la relation que les populations entretiennent avec leur milieu, nous nous sommes également appuyés sur des images satellitaires afin de travailler de manière diachronique dans l'étude des changements d'occupation du sol dans le temps et dans l'espace. Une première phase a consisté, comme pour les autres données déjà présentées, à collecter les images disponibles pour nos terrains d'étude. L'objectif était de pouvoir acquérir un nombre d'images assez conséquent à un pas de temps régulier pour

étudier les changements d’occupation des sols intervenus depuis la construction des barrages jusqu’à nos jours.

Toutes ces scènes proviennent des différentes générations de satellites Landsat qui proposent des qualités et des résolutions différentes selon l’année d’acquisition des images. Utiliser des images Landsat a été dicté par le fait que la grande majorité des organismes indonésiens travaille avec ce format et qu’il a été possible de les compléter par des images en libre accès chez certains fournisseurs d’images institutionnels. Pour les plus anciennes que nous avons pu acquérir, il s’agit d’images satellitaires utilisant des capteurs MSS (*Multi Spectral Scanner*). Les images proviennent de capteurs TM (*Thematic Mapper*) et ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Le tableau ci-dessous (Tab.16) détaille les caractéristiques des différents radiomètres équipant les satellites Landsat ainsi que leurs précisions. La figure 75 présente les périodes d’opération de chacun des satellites.

Satellite	Capteurs	Spectre	Canaux	Fauchée	Taille du pixel
L 1-4	MSS multispectral	0.5 - 1.1 μm	1, 2, 3, 4	185 x 185 km	60 m
L 4-5	TM multispectral	0.45 - 2.35 μm	1, 2, 3, 4, 5, 7		30 m
L 4-5	TM thermal	10.40 - 12.50 μm	6		120 m
L 7	ETM+ multispectral	0.450 - 2.35 μm	1, 2, 3, 4, 5, 7		30 m
L 7	ETM+ thermique	10.40 – 12.50 μm	6.1, 6.2		60 m
L 7	Panchromatic	0.52-0.90 μm	8		15 m

Tableau 16 : Caractéristiques des différents radiomètres sur les satellites Landsat

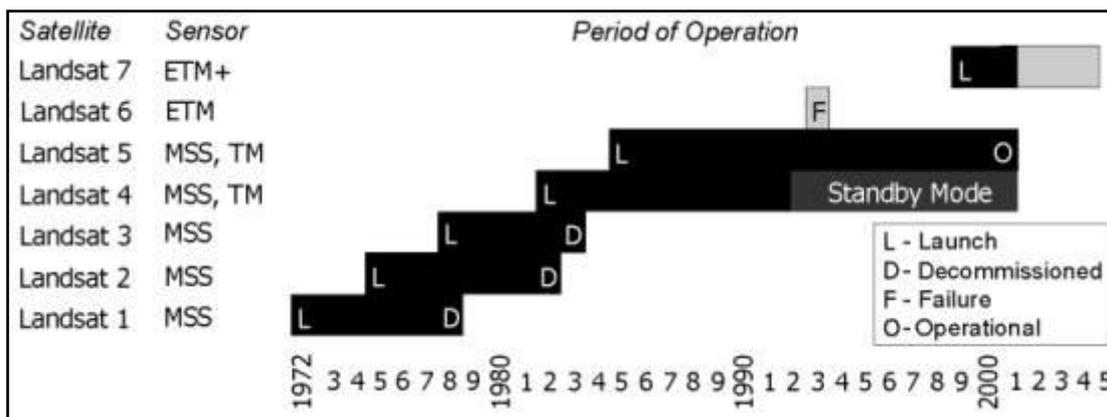
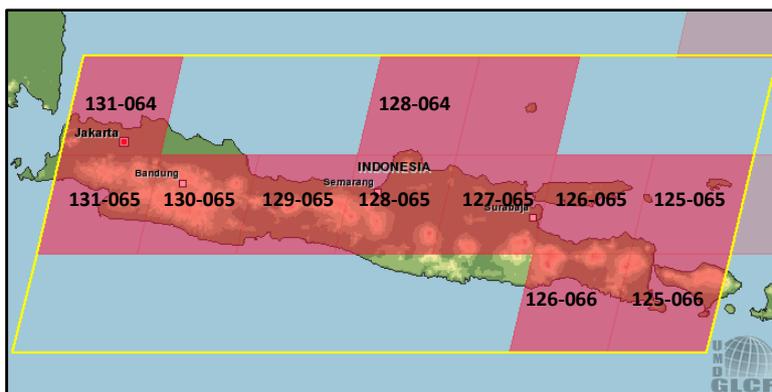


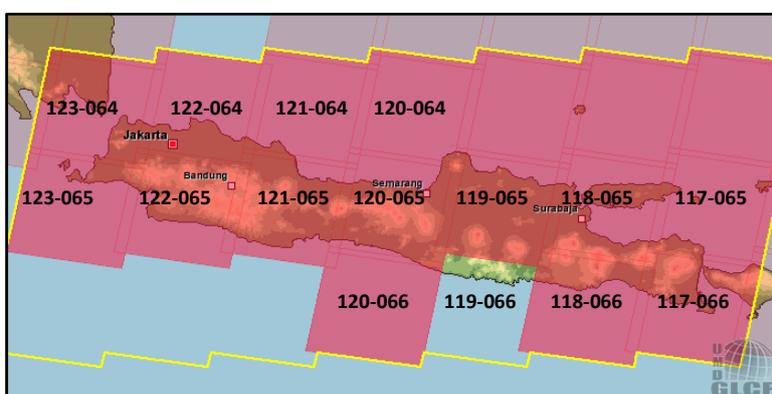
Figure 75 : Date de lancement des différents satellites Landsat et de leurs durées d’opération (USGS)

Ces différentes sources nous ont permis d’acquérir les images qui sont présentées dans les figures 76 et 77.



131-064	131-065	130-065	129-065	128-065
21/06/1976	21/06/1976	20/06/1976	25/04/1978	28/09/1972

Figure 76 : Quadrillage Landsat 1 à 4 et liste des images acquises couvrant les bassins étudiés (GLCF)



122-064	122-065	121-064	121-065	120-065	119-065	119-066	118-065	118-066
03/05/1989	28/07/1991	07/09/1997	05/07/1991	28/06/1991	20/04/1989	24/04/2002	04/08/2001	28/03/1989
12/07/1997	22/03/1997	09/10/2001	21/07/1997	16/07/1992	27/08/2001		19/05/2002	04/08/2001
28/07/1997	26/06/1997	24/05/2002	07/09/1997	26/06/1994				20/08/2001
14/09/1997	28/07/1997	02/06/2002	28/12/1997	05/06/2001				
07/12/1997	28/07/2000	27/07/2002	05/09/1999					
28/07/2000	12/05/2001	12/08/2002	22/08/2000					
15/07/2001	22/12/2001	28/08/2002	05/03/2002					
29/04/2002	31/03/2002	13/09/2002	24/05/2002					
01/07/2002	29/04/2002	29/09/2002	27/07/2002					
18/07/2002	18/07/2002		01/08/2002					
19/08/2002	04/09/2002		12/08/2002					
20/09/2002	20/09/2002		28/08/2002					
06/10/2002	22/10/2002		13/09/2002					
			29/09/2002					

Figure 77 : Quadrillage Landsat 5 à 7 et liste des images acquises couvrant les bassins étudiés (GLCF)

c. Retour critique sur les données : une question de fiabilité

De nombreux obstacles de terrain sont venus ralentir la recherche de données. Le premier fût celui de ne généralement pas être en possession de « lettres d'introduction », précieux sésame à l'acquisition des données, et ne serait-ce même qu'à l'accès et à la consultation de celles-ci auprès des différents organismes. De nombreux « pieds et de mains » furent

souvent nécessaires au franchissement de ces portes d'accès. Ce fut ensuite à la barrière de la langue qu'il fallu se confronter mais aussi à un archivage anarchique de données anciennes ou encore faire face à une volonté – en interne – de cloisonnement de ces données. Cependant, après un certain nombre de visites répétées et beaucoup de patience, les différents obstacles ont pu être franchis et les données enfin obtenues.

Après cette première phase, c'est davantage un problème lié à la fiabilité de ces données qui s'est alors posé à nous. En effet, en croisant les informations obtenues des différentes agences, nous nous sommes aperçus de l'incohérence de certaines données (Annexe 4). Tels que des mois de février comptant 31 jours ou des données pour une seule et même station totalement différentes en fonction du bureau de collecte. Un travail conséquent a alors dû être réalisé afin d'homogénéiser ces dernières en tenant compte des données les plus pertinentes jusqu'à l'élimination des plus absurdes.

Un investissement important a donc été apporté au tri des informations en tentant de conserver les plus fiables d'entre elles. Toutefois des précautions d'usage sont à prendre dans l'interprétation des données que nous allons détailler ci-dessous.

II. Traitement des données et création des outils

Cette seconde partie présente la méthode employée ainsi que les outils d'analyse mis en place pour le traitement et l'analyse des données. Au vu de la quantité de données primaires et secondaires récoltées auprès des différents organismes, des solutions ont dû être adoptées afin de compiler et exploiter ces dernières, et ce au sein d'un archivage rigoureux. Les conceptions d'une base de données et d'un système d'information géographique sont venues répondre à ce besoin.

A. Création et présentation de la base de données (BDD)

De nombreux facteurs physiques comme humains sont nécessaires à la bonne compréhension de l'activité sédimentaire des bassins étudiés. En utilisant le logiciel Access[®] afin d'intégrer, centraliser et analyser les données, l'objectif a été de mettre en place un outil simple et utile à la gestion des bassins-versants, utilisable par le plus grand nombre d'acteurs. L'architecture de cette BDD permet à la fois d'intégrer les données existantes mais

aussi de nouvelles pour n'importe quels autres bassins en Indonésie. Il s'agit donc d'un outil évolutif et communautaire capable de gérer les données à échelle nationale. L'exemple qui va être ici développé concerne l'intégration et la structuration du nombre conséquent de postes pluviométriques et de stations hydrologiques pour lesquelles nous disposons de données journalières sur plusieurs dizaines d'années, rendant indispensable leur gestion dans une BDD.

1. Mise en forme des données

Les données ont été acquises auprès de différents organismes sous différentes formes allant de l'archive papier, jauni par le temps et l'humidité, aux fichiers numériques les plus récents. Ces données ont fait l'objet d'une sélection rigoureuse et ont été ensuite standardisées afin de les intégrer dans la BDD. Une liste a été dressée pour compiler au mieux toutes les informations concernant les stations (nom, localisation, période de données disponibles, type de données etc.) Toutes ces données, avant d'être intégrées dans la base, ont préalablement fait l'objet d'un premier tri afin d'en écarter les entrées inutiles ou clairement fausses (voir annexe 4. Les problèmes de fiabilité des données).

a. Acquisition des données

Une grande majorité des données concernant les débits a été acquise en format texte de manière générale. Il a alors été nécessaire de transférer toutes ces informations sous Excel[®] afin d'être à même de les traiter. Pour cela le logiciel Omnipage[®] a été utilisé pour convertir les données stockées sous format texte en données numériques. Une seconde vérification a été effectuée afin de corriger les erreurs de conversion assez fréquentes avec ce type de logiciel (OCR). (Fig. 78)

Figure 78 : Exemple de données collectées en format texte

2004.PUB												
S.CITARUM-NANJUNG												
NO. POS DUGA AIR : 02-016-04-02												
TAHUN : 2004												
INDUK SUNGAI : CITARUM												
LETAK GEOGRAFI : - 107832 BT - 006057 L5												
LUAS DAERAH PENGALIRAN : 1718.0 KM2 ,ELEVASI : 654.00												
LOKASI : PROP. JAWA BARAT, KAB. BANDUNG, KEC. BATUJAJAR KAMP. NANJUNG DARI BANDUNG KE												
ARAH CIMINDI BELOK KIRI +/- 10 KM SAMPAI DI JEMBATAN CITARUM POS BERADA DI												
SEBELAH KANAN ALIRAN SUNGAI CITARUM.												
KETERANGAN POS DUGA AIR :												
TAHUN DIDIRIKAN : 17/ 7/1973 OLEH DPMA												
PERIODE PENCATATAN : TANGGAL 17/ 7/1973 SAMPAI DENGAN 31/12/2004												
JENIS ALAT : PESAWAT OTOMATIK TAHUNAN /PDAB												
ALIRAN EXTRIM :												
ALIRAN TERBESAR : M.A. = 4.30(+0.00) M ; Q = 213.73 M ³ /DET ; TGL 26-01-2004												
ALIRAN TERKECIL : M.A. = 0.75(+0.00) M ; Q = 5.089 M ³ /DET ; TGL 17-10-2004												
ALIRAN EXTRIM YANG PERNAH TERJADI S/D TAHUN 2004 :												
ALIRAN TERBESAR : M.A. = 5.35(+0.17) M ; Q = 505.88 M ³ /DET ; TGL 15-04-1999												
ALIRAN TERKECIL : M.A. = 0.52(+0.01) M ; Q = 0.143 M ³ /DET ; TGL 15-04-2002												
PENENTUAN BESARNYA ALIRAN :												
BERDASARKAN PERSAMAAN LENGKUNG DEBIT : Q = 12.995 (H - 0.130) ^{1.961}												
YANG DIBUAT MENURUT DATA HASIL PENGUKURAN DEBIT DARI TAHUN 1999 S/D TAHUN 2003												
TABEL BESARNYA ALIRAN HARIAN (M ³ /DET) :												
Tanggal	JAN.	PEB.	MAR.	APR.	MEI.	JUN.	JUL.	AGU.	SEP.	OKT.	NOP.	DES.
1	39.4	116.5	102.7	110.6	36.8	36.8	15.4	9.45	15.4	10.8	5.58	109.9
2	56.2	109.9	97.2	99.9	46.7	33.9	14.8	9.02	30.7	10.6	5.58	89.8
3	40.7	103.4	149.1	90.5	63.2	31.9	15.1	9.02	13.3	8.60	5.58	69.4
4	56.2	102.7	199.9	80.8	66.0	32.7	14.6	8.81	11.0	18.3	5.75	36.1
5	48.1	121.8	156.7	71.7	101.3	36.8	13.8	8.39	17.4	9.45	5.58	25.5
6	43.9	107.7	169.9	67.7	64.3	33.5	13.5	8.19	7.98	9.23	6.64	20.4
7	38.5	104.8	151.6	64.9	58.8	30.3	15.9	8.19	7.01	8.81	21.4	27.5
8	40.3	113.5	140.6	70.0	120.2	28.4	17.7	7.96	7.01	8.39	28.8	24.1
9	36.4	105.6	128.7	78.4	113.5	25.8	28.0	7.78	6.82	7.39	49.6	32.3
10	85.9	92.5	100.6	79.6	132.7	24.8	32.7	7.78	7.78	7.01	45.3	35.1
11	75.9	82.7	71.7	98.6	176.3	29.5	50.6	7.98	8.19	6.64	37.2	27.3
12	66.5	63.2	115.0	87.9	160.2	35.9	30.6	8.39	7.78	6.28	31.5	46.7
13	51.6	48.1	146.5	73.5	125.6	47.7	43.9	7.98	7.39	6.10	24.4	72.9
14	96.5	42.1	201.8	66.0	155.9	38.5	40.7	7.78	7.20	5.58	17.1	101.3
15	85.9	39.8	198.9	61.5	112.8	35.9	39.8	8.39	7.39	5.42	12.2	155.0
16	78.4	46.7	167.3	56.2	85.3	32.7	37.2	7.78	7.20	5.58	9.89	138.3
17	70.6	89.8	188.4	50.6	100.6	26.2	33.9	7.01	6.82	5.42	9.45	75.3
18	71.7	75.9	162.8	45.8	111.3	20.8	33.1	6.82	9.23	7.96	10.1	157.5
19	65.5	131.5	144.9	40.3	124.8	21.7	31.5	7.78	11.8	6.19	15.1	115.7
20	64.9	166.4	137.5	41.1	109.1	21.1	29.2	7.78	9.23	8.19	21.1	158.5
21	45.8	162.8	110.6	166.4	112.8	21.4	27.7	7.39	10.8	5.92	34.3	85.3

b. Standardisation sous Excel

Toutes les données, provenant d’organismes différents avec des formats propres à chacun, ont dû adopter un format standard. Ce travail a été effectué sous Excel®. (Fig. 79) Ce nouveau format reprend les informations collectées ailleurs :

Pour les stations hydrologiques : nom de la station, code de la station, valeur, valeur maximale, valeur minimale et valeur moyenne.

Pour les stations pluviométriques : nom de la station, code de la station, valeur maximale, valeur minimale, valeur moyenne, total précipité par mois et le nombre de jours pluvieux par mois.

Le format permet alors une impression directe sur papier au format A4.

Discharge (m ³ /sec) at Citarum-Nanjung station (N° 02-016-04-02)												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	39,4	116,5	102,7	110,6	36,8	36,8	15,4	9,45	15,4	10,8	5,58	109,9
2	56,2	109,9	97,2	99,9	46,7	33,9	14,8	9,02	30,7	10,6	5,58	89,8
3	40,7	103,4	149,1	90,5	63,2	31,9	15,1	9,02	13,3	8,6	5,58	69,4
4	56,2	102,7	199,9	80,8	66	32,7	14,6	8,81	11	18,3	5,75	38,1
5	48,1	121,8	156,7	71,7	101,3	36,8	13,8	8,39	17,4	9,45	5,58	25,5
6	43,9	107,7	169,9	67,7	64,3	33,5	13,5	8,19	7,98	9,23	6,64	20,4
7	38,5	104,8	151,6	64,9	58,8	30,3	15,9	8,19	7,01	8,81	21,4	27,3
8	40,3	113,5	140,8	70	120,2	28,4	17,7	7,98	7,01	8,39	28,8	24,1
9	36,4	105,6	128,7	78,4	113,5	25,8	28	7,78	6,82	7,39	49,6	32,3
10	85,9	92,5	100,6	79,6	132,7	24,8	32,7	7,78	7,78	7,01	45,3	35,1
11	75,9	82,7	71,7	98,6	176,3	29,5	50,6	7,98	8,19	6,64	37,2	27,3
12	66,5	63,2	115	87,9	160,2	35,9	50,6	8,39	7,78	6,28	31,5	46,7
13	51,6	48,1	146,5	73,5	125,6	47,7	43,9	7,98	7,39	6,1	24,4	72,9
14	96,5	42,1	201,8	66	155,9	38,5	40,7	7,78	7,2	5,58	17,1	101,3
15	85,9	39,8	198,9	61,5	112,8	35,9	39,8	8,39	7,39	5,42	12,2	155
16	78,4	46,7	167,3	56,2	85,3	32,7	37,2	7,78	7,2	5,58	9,89	138,3
17	70,6	89,8	188,4	50,6	100,6	26,2	33,9	7,01	6,82	5,42	9,45	75,3
18	71,7	75,9	162,8	45,8	111,3	20,8	33,1	6,82	9,23	7,98	10,1	137,5
19	66,5	181,8	144,9	40,3	124,8	21,7	31,5	7,78	11,8	8,19	15,1	115,7
20	64,9	166,4	137,5	41,1	109,1	21,1	29,2	7,78	9,23	8,19	21,1	158,5
21	45,8	162,8	110,6	166,4	112,8	21,4	27,7	7,39	10,8	5,92	34,3	85,3
22	63,2	145,7	89,2	153,3	93,8	21,1	26,6	8,19	24,8	6,28	67,1	159,3
23	112,8	133,5	81,5	157,6	75,9	18,9	24,4	7,2	95,1	8,39	75,3	159,3
24	134,3	117,2	75,9	131,1	71,7	25,8	22,4	7,01	85,9	8,81	52,6	165,5
25	153,3	102	70	113,5	62,1	23,4	19,5	7,01	80,2	8,39	49,1	126,4
26	209,7	88,5	78,4	94,5	54,6	21,7	17,7	6,82	7,9	6,64	62,1	129,5
27	197	105,6	75,3	79	55,7	19,5	15,9	6,82	64,9	7,01	61	81,5
28	180,9	93,8	69,4	66,5	54,6	19,2	13,5	6,64	84	6,82	95,1	68,8
29	157,6	93,1	65,4	52,6	72,9	16,2	10,8	6,64	74,7	6,28	84	66,5
30	127,9		104,1	45,8	57,2	15,4	15,4	7,01	59,4	5,75	115	67,1
31	102,7		117,2		44,8		14,8	7,01		5,58		70
Mean	87,07	101,97	124,81	83,20	91,02	27,58	25,18	7,74	28,85	7,74	35,45	86,44
Min	36,4	39,8	65,4	40,3	36,8	15,4	10,8	6,64	6,82	5,42	5,58	20,4
Max	209,7	181,8	201,8	166,4	176,3	47,7	50,6	9,45	95,1	18,3	115	165,5

Data from Dinas Pengelolaan Sumber Daya Air

Figure 79 : Données acquises après la mise en forme et correction sous Excel

c. Importation des données dans Access®

Les données, une fois corrigées et converties dans un format standardisé, ont été préparées pour être intégrées dans Access®. Le format a dû être adapté afin que ces données puissent être facilement exportables dans la nouvelle base de données (Fig.80). Une fois ce travail effectué, la conversion a pu être opérée et a permis la lecture et le travail sous Access® (Fig.81).

Chapitre 3 – Acquisition des données et présentation de la méthodologie

Code ile	Nom ile	Code SWS	Nom SWS	Code DAS	Nom DAS	Type données	Code Station Hydro	Nom station hydro	Date	Débit (M³/sec)	Source	Taux de lacune mensuel (%)
3138_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/1/1918	23.76	TIEDA	0.00%
3139_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/2/1918	16.05	TIEDA	0.00%
3140_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/3/1918	12.04	TIEDA	0.00%
3141_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/4/1918	8.24	TIEDA	0.00%
3142_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/5/1918	7.50	TIEDA	0.00%
3143_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/6/1918	5.90	TIEDA	0.00%
3144_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/7/1918	5.84	TIEDA	0.00%
3145_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/8/1918	5.70	TIEDA	0.00%
3146_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/9/1918	5.64	TIEDA	0.00%
3147_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/10/1918	5.50	TIEDA	0.00%
3148_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/11/1918	5.50	TIEDA	0.00%
3149_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/12/1918	10.20	TIEDA	0.00%
3150_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/13/1918	32.45	TIEDA	0.00%
3151_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/14/1918	55.12	TIEDA	0.00%
3152_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/15/1918	41.01	TIEDA	0.00%
3153_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/16/1918	24.70	TIEDA	0.00%
3154_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/17/1918	13.60	TIEDA	0.00%
3155_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/18/1918	7.50	TIEDA	0.00%
3156_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/19/1918	5.92	TIEDA	0.00%
3157_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/20/1918	5.50	TIEDA	0.00%
3158_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/21/1918	5.44	TIEDA	0.00%
3159_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/22/1918	5.30	TIEDA	0.00%
3160_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/23/1918	5.18	TIEDA	0.00%
3161_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/24/1918	4.84	TIEDA	0.00%
3162_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/25/1918	4.61	TIEDA	0.00%
3163_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/26/1918	4.31	TIEDA	0.00%
3164_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/27/1918	4.06	TIEDA	0.00%
3165_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/28/1918	4.04	TIEDA	0.00%
3166_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/29/1918	4.16	TIEDA	0.00%
3167_02	Java	02_04	Citarum	02_04_008	Citarum	H	02_016_04_02	Citarum-Nanjung	9/30/1918	3.86	TIEDA	0.00%

Figure 80 : Données au format base de données sous Excel

Code	Nom ile	Code	Nom SWS	Code D	Nom DAS	Type	Code Station	Nom station hydro	Date	Débit (M3/sec)	Source	Taux de lacune
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/1/1918	23.76	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/2/1918	16.05	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/3/1918	12.04	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/4/1918	8.24	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/5/1918	7.10	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/6/1918	5.90	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/7/1918	5.84	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/8/1918	5.70	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/9/1918	5.64	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/10/1918	5.50	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/11/1918	5.50	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/12/1918	10.20	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/13/1918	32.45	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/14/1918	55.12	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/15/1918	41.01	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/16/1918	24.70	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/17/1918	13.60	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/18/1918	7.80	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/19/1918	5.92	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/20/1918	5.50	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/21/1918	5.44	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/22/1918	5.30	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/23/1918	5.18	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/24/1918	4.84	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/25/1918	4.61	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/26/1918	4.31	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/27/1918	4.06	TIEDA	0.00%
02	Java	02.04	Citarum	02.04.008	Citarum	H,J	02.016.04.02	Citarum-Nanjung	9/28/1918	4.04	TIEDA	0.00%

Figure 81 : Données au format base de données après intégration dans Access

2. Organisation des données dans la BDD

Une fois acquises et corrigées, les données ont été intégrées dans une BDD afin de les stocker de manière ordonnée et les traiter rapidement. Chacune des tables contient les informations nécessaires à la localisation dans l'espace et le temps de ces données intégrées. Les tables sont construites en intégrant une clé (primaire) permettant d'individualiser chacune des entités ainsi que la mise en relation de ces différentes tables.

a. Le système relationnel

Le système relationnel (Fig. 82) présente la structure de la base de données et les relations entre les différentes tables. Ce dernier donne l'aperçu de l'architecture du système et doit par conséquent être conçu avec soin. Une organisation spatiale se fondant sur l'imbrication des multiples échelles d'études a été ainsi retenue. La relation pour les données hydrologiques et pluviométriques a été basée sur les principes suivants :

- Une île possède un ou plusieurs bassins hydrologiques.
- Un bassin hydrologique possède un ou plusieurs bassins versants.
- Un bassin-versant possède un ou plusieurs postes pluviométriques et une ou plusieurs stations hydrologiques.
- Chaque poste et station disposent de plusieurs types de données.

De conception assez simple, cette base de données présente l'avantage de pouvoir accéder aux données par plusieurs entrées. En effet, il est possible de rechercher les données par SWS (*Satuan Wilayah Sungai*) qui sont les grands bassins fluviaux (2_SWS), par DAS (*Daerah Aliran Sungai*) qui sont les bassins-versants (3_DAS), par Date (4_Date) ou par type de données (4_Type données). Travaillant uniquement sur l'île de Java dans le cadre de cette thèse, la présence d'une table île (1_Pulau) permettra à l'avenir d'intégrer d'autres données provenant de bassins situés sur d'autres îles de l'archipel rendant ainsi cette base utilisable à l'échelle nationale.

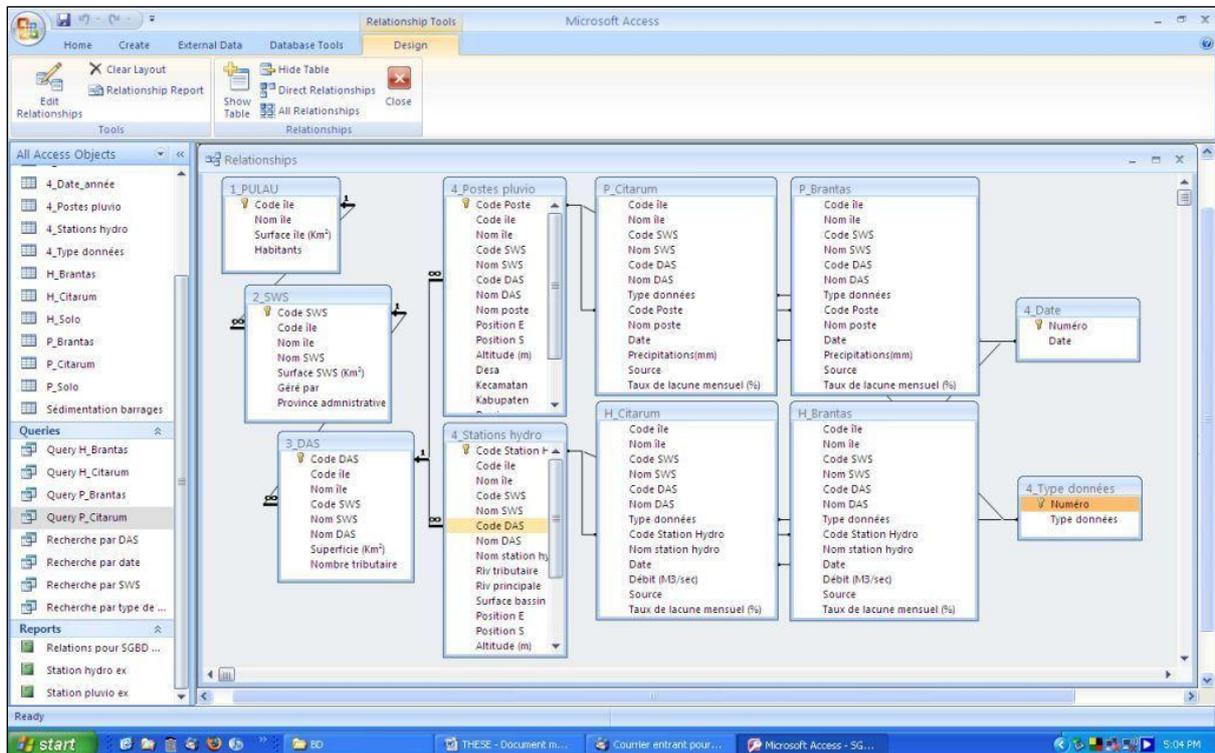


Figure 82 : Structure de la base de données hydrologiques et pluviométriques (Citarum et Brantas)

b. Des requêtes pour optimiser la recherche de données

Afin de rendre les recherches plus rapides dans la base de données, des requêtes ont été créées afin de filtrer et d'extraire les données voulues. Il est en effet possible d'interroger le logiciel pour obtenir les données d'une station en particulier sur une période bien précise. Un exemple ci-dessous est donné pour le poste pluviométrique de Cisondari dans le bassin du Citarum où il s'agit de rechercher les données concernant le régime pluviométrique mensuel du secteur entre 1980 et 2000 et le taux de lacune mensuel des données (Fig.83). Une fois les informations spécifiées, le logiciel effectue une extraction des données correspondantes et les affiche sous forme de tableau ou de graphique, comme montré dans la partie suivante (Fig.84).

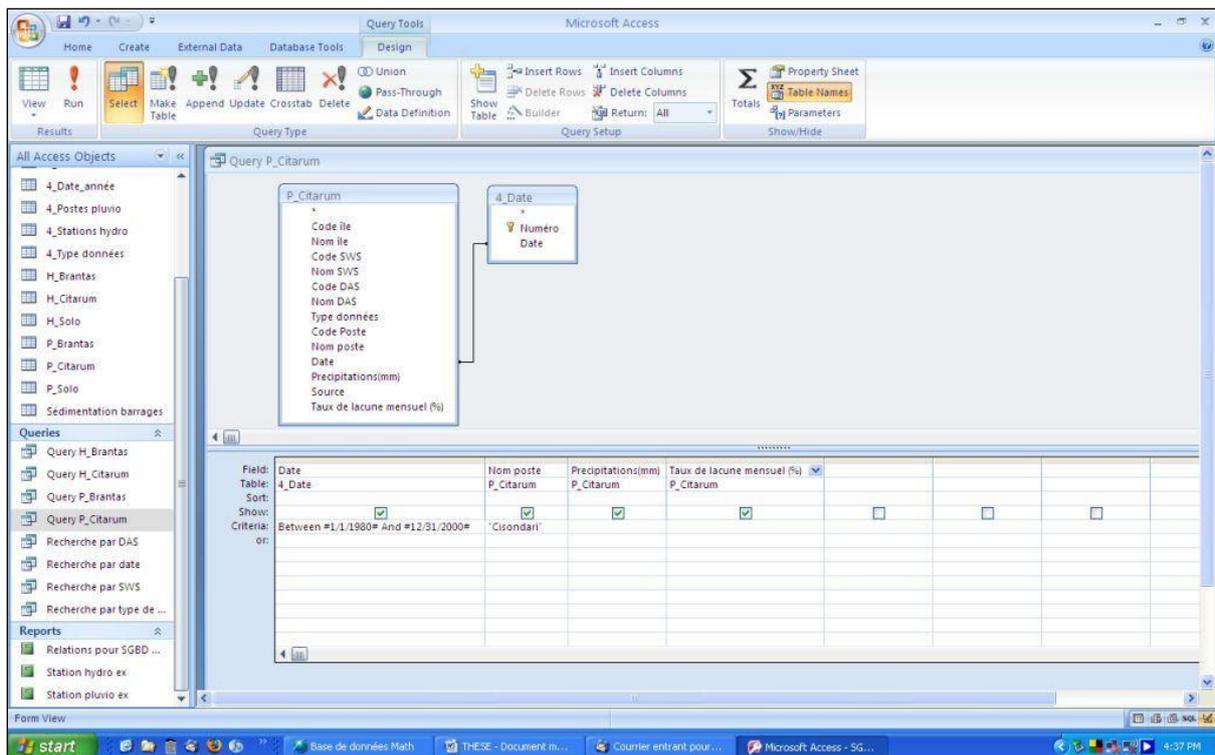


Figure 83 : Fenêtre de recherche de données (exemple de la table P_Citarum)

c. La représentation graphique des données

Une fois les critères sélectionnés, un graphique est créé automatiquement pour afficher les données (Fig.84). Une comparaison entre plusieurs stations peut aussi être réalisée afin de connaître, par exemple, la différence de pluviométrie entre une station en amont et une autre en aval. Il est aussi possible d'afficher des données de différentes manières allant des totaux annuels pour une station jusqu'aux valeurs enregistrées toutes les six minutes pour des stations disposant de ces données. Les recherches sur les données de débit peuvent aussi être traitées de la même manière.

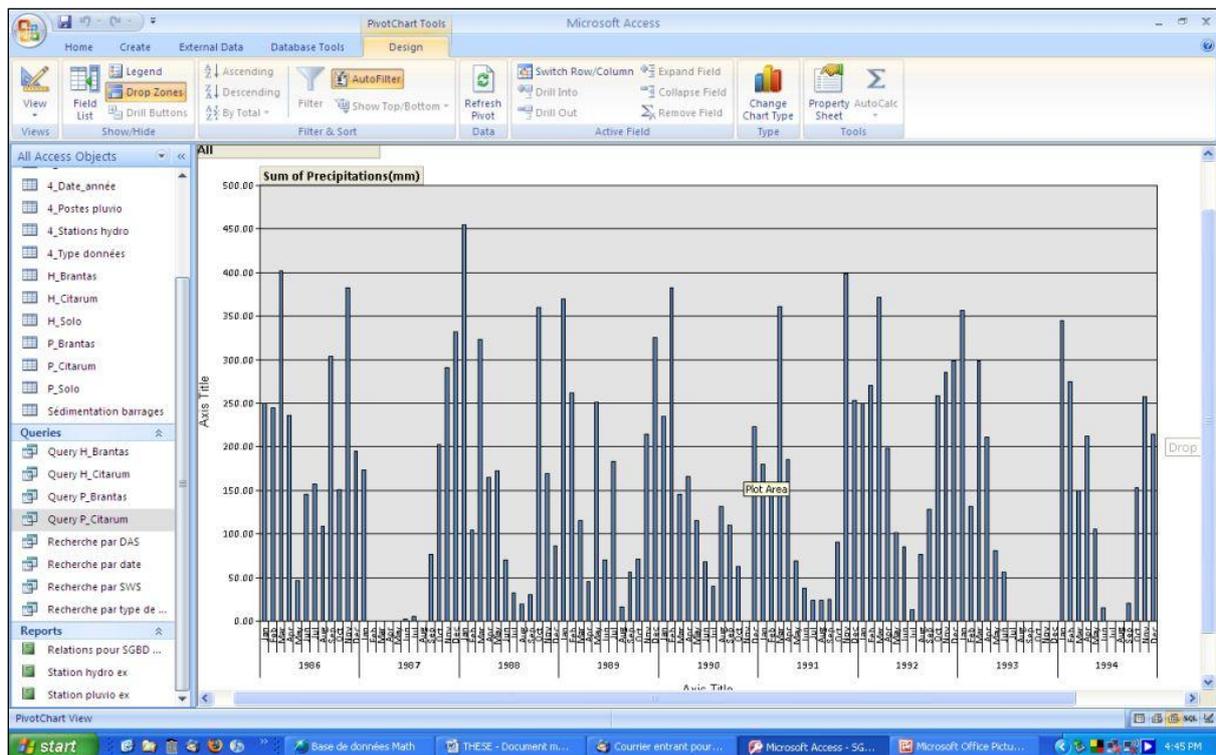


Figure 84 : Graphique en sortie automatique pour le poste pluviométrique de Nanjung (bassin-versant de la Kali Konto – Java-Est). Données mensuelles entre 1986 et 1994.

3. BDD sédimentaire

a. L'évolution des volumes sédimentaires dans les réservoirs

Un autre volet de cette base de données a aussi été consacré à la gestion des données sédimentaires afin d'étudier le rythme de sédimentation des grands barrages. Pour cela il a été créé une table « Barrages » qui reprennent toutes les informations utiles (localisation, capacité, opérateur, fonctions etc.) et une table « Sédimentation barrages » regroupant pour sa part toutes les données disponibles des sondages sédimentaires dans les réservoirs étudiés (Fig.85 et 86).

Nom barrage	Date	Capacité (millions m3)	Remarque
Jatiluhur	1963	3000	Capacité initiale
Jatiluhur	1987	2556	
Jatiluhur	1995	2458	
Jatiluhur	2000	2448	
Cirata	1988	2165	Capacité initiale
Cirata	2000	1926.91	
Saguling	1986	982	Capacité initiale
Saguling	2004	730.5	
Wonogiri	1981	730	Capacité initiale
Sutami	1972	343	
Sutami	1977	261.68	
Sutami	1982	221.29	
Mrica	1988	193.5	Capacité initiale
Sutami	1987	192.41	
Sutami	1989	192.39	
Mrica	1989	190.12	
Sutami	1992	189.97	
Mrica	1990	186.68	
Sutami	1994	186.27	
Sutami	1995	184.59	
Sutami	1997	183.42	
Mrica	1991	180.66	
Sutami	1999	180.45	
Mrica	1992	176.87	
Sutami	2002	176	
Sutami	2003	174.57	
Mrica	1993	173.39	
Mrica	1994	170	

Figure 85 : Table « Sédimentation barrages »

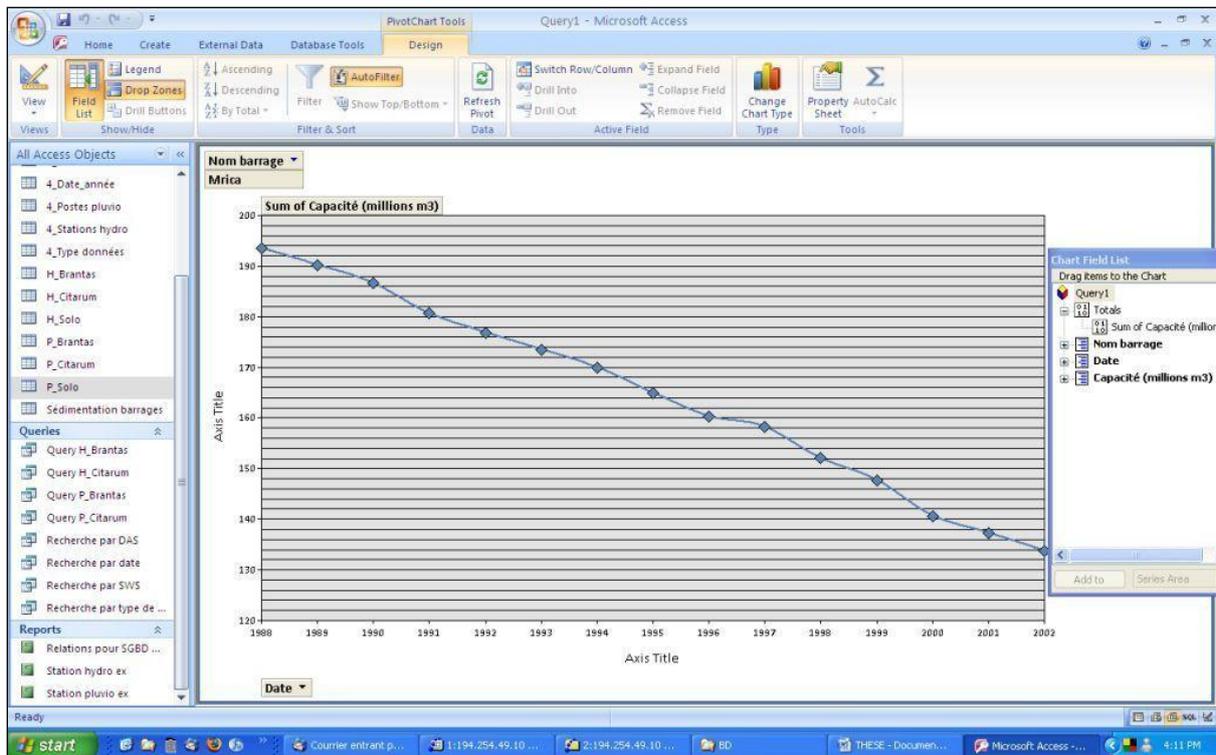


Figure 86 : Graphique montrant la baisse de la capacité du réservoir de Mrica (Java-Centre) entre 1988 et 2002

b. Les profils transversaux du fond des réservoirs

Cette base de données permet aussi de travailler plus finement sur les données issues des échosondages. Lorsqu'elles ont été disponibles, nous avons intégré les mesures des profils transversaux effectués (Fig.87). Avec ces données, la BDD permet alors de représenter graphiquement l'évolution du profil au cours du temps de chacune des sections renseignées et de mieux en comprendre les logiques d'accumulation dans les différentes parties du réservoir.

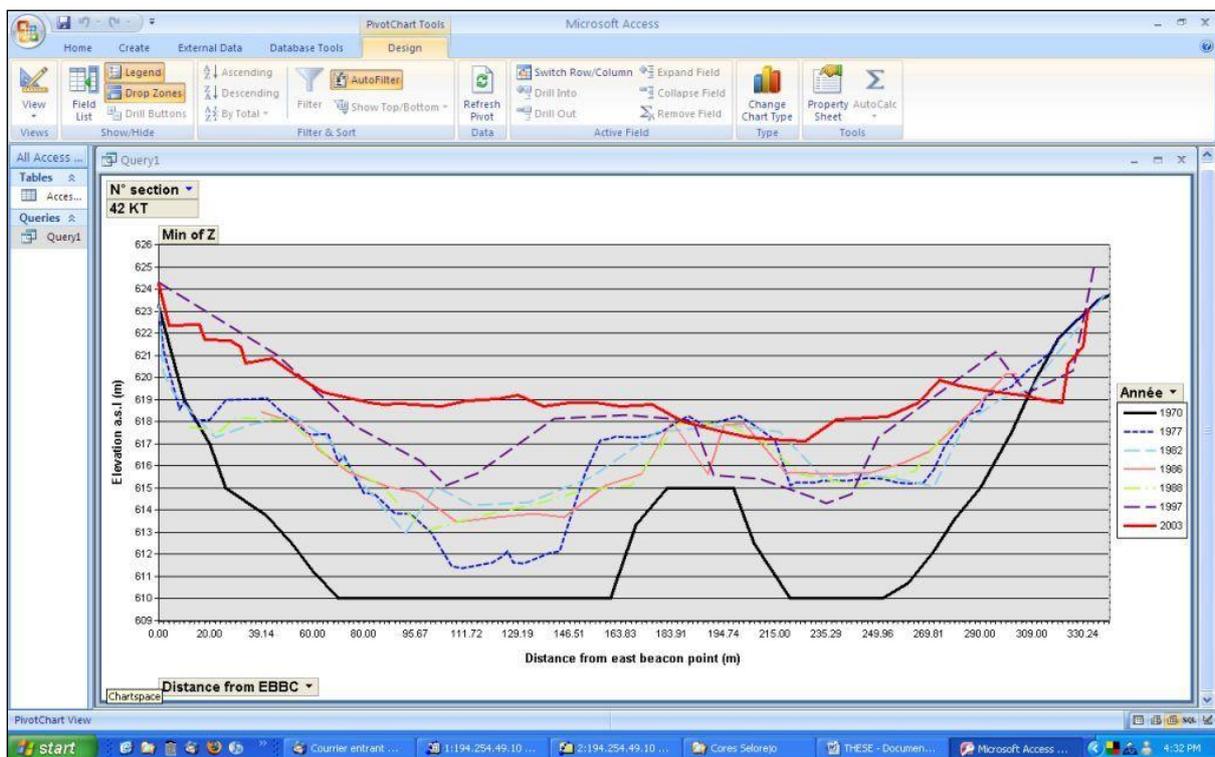


Figure 87 : Évolution d'une section transversale entre 1970 et 2003 dans le réservoir de Selorejo (Java-Est)

L'intérêt d'une base de données développée sous ACCESS®, au-delà de sa facilité d'utilisation et de consultation, réside aussi dans sa capacité à être partagée par plusieurs utilisateurs et de faciliter ainsi les échanges entre différentes structures productrices d'informations (municipalités ou organismes gouvernementaux).

B. Utilisation des images satellitaires pour une étude diachronique de l'occupation des sols

L'objectif est ici de quantifier et de décrire, à l'aide d'outils de télédétection, l'évolution des surfaces boisées qui passe principalement par l'identification des fronts pionniers dégagés au profit de nouvelles terres agricoles (principalement rizicoles). Il s'agit également de déterminer l'expansion des zones urbaines et les mutations qu'un tel développement engendre sur le milieu. Un des avantages de l'imagerie satellitaire est de pouvoir suivre l'évolution d'un paysage ou d'un phénomène particulier à plus ou moins long terme en analysant des images acquises à différentes dates. Travailler à l'aide de ces images devient encore plus utile lorsqu'il s'agit d'étudier l'occupation des sols sur des surfaces très vastes. Elles permettent, grâce aux différentes réponses spectrales des bandes qui composent l'image, de pouvoir déterminer l'occupation des sols et fournissent alors de précieuses informations (Tab.17).

Bande	Longueur d'onde	Utilisation
Bande 1	Bleu : 0.45 - 0.52 μm	Turbidité de l'eau Identification de cultures Cartographie forestière
Bande 2	Vert : 0.52 - 0.60 μm	Réflectance de la végétation
Bande 3	Rouge : 0.63 - 0.69 μm	Analyse de la végétation Différenciation des plantes Identification de cultures
Bande 4	Proche IR : 0.76 - 0.90 μm	Analyse de la végétation Analyse de la biomasse Humidité du sol
Bande 5	IR moyen : 1.55 - 1.75 μm	Humidité de la végétation Humidité du sol Cartographie forestière
Bande 6	IR thermique : 10.4 - 12.5 μm Résolution spatiale de 120 m	Stress végétal
Bande 7	IR moyen : 2.08 - 2.35 μm	Analyse des minéraux et des roches

Tableau 17 : Les bandes spectrales de Landsat TM et leur utilisation

1. La composition colorée

Dans le cadre de notre travail dont la problématique est d'analyser principalement l'évolution du couvert forestier, plusieurs combinaisons avec les bandes 2, 3, 4, 5 et 7 ont été utilisées. La combinaison des bandes 5-4-3 affichées respectivement en rouge, vert et bleu nous a permis d'identifier les grands types de végétation. Cette composition permet également une bonne séparation des eaux temporaires vis-à-vis des autres systèmes d'occupation du sol, une bonne discrimination visible entre les végétaux, les zones

inondables et les surfaces cultivées, principaux systèmes d'occupation du sol du bassin-versant. Cependant, quelques difficultés apparaissent pour la délimitation précise des différents espaces végétaux (Major et al., 1990). La technique de la classification non dirigée a été utilisée dans le but d'avoir une vue d'ensemble sur la géographie des unités d'occupation du sol. Les images générées par la classification ont servi de documents de validation pour confirmer les observations faites sur les compositions colorées.

Malgré le manque d'homogénéité remarqué principalement à l'intérieur des zones boisées et des plantations (de thé et de café essentiellement) qui ne facilite pas le zonage des images, la procédure de délimitation sur écran des unités d'occupation du sol a été rendue possible grâce aux différents travaux de terrain et à la consultation des documents disponibles. La numérisation des contours des unités d'occupation du sol identifiées sur le terrain et regroupées selon des catégories prédéfinies, a généré des données vectorielles qui pu être vérifiées et validées sur le terrain lors des missions. Pour passer à une analyse simplifiée de l'évolution de l'occupation du sol, nous avons identifié les thèmes ou classes suivants :

- Lacs
- Rivières
- Construction/
Bâtiments
- Montagnes
- Pâturage
- Habitats
- Plantations/Jardins
- Rizières irriguées
- Rizières pluviales
- Buissons
- Champ agricole

Les autres compositions possibles associées à chaque type de milieu en fonction de la combinaison réalisée sont résumées dans le tableau 18. Ce tableau précise aussi quelles sont les distinctions et confusions visuelles qu'il est possible de faire entre chaque type de surface pour les compositions colorées. Le détail méthodologique se trouve en annexe 5.

Couleurs / Bandes spectrales			Principaux types de milieux				
Rouge	Vert	Bleu	Eau	Végétation	Sols nus / cultures	Bâti	Commentaires
3	2	1	Bleu foncé (eau profonde ou peu turbide) à bleu cyan (faible profondeur ou forte turbidité)	Vert foncé (forêt), vert très foncé (mangrove)	Vert pomme	Blanc	Risque de confusion entre l'eau et la végétation / Risque de confusion entre certains sols nus et les bâti / Distinction entre la végétation et les sols nus, mais pas de différenciations à l'intérieur de chacun de ces deux milieux / Différenciation de plusieurs types d'eau
4	3	2	Bleu foncé (eau profonde ou peu turbide) à bleu cyan (faible profondeur ou forte turbidité)	Rouge vif (forêt), rouge plus terne (mangrove)	Rouge - rosé	Bleu très clair	Bonne séparation de l'eau et des autres types de surface / Différenciation de plusieurs types d'eau / Distinction claire de chaque type de surface / Confusion possible entre certains sols cultivés et la végétation
5	4	2	Bleu soutenu (eau profonde ou peu turbide) à bleu légèrement plus clair (faible profondeur ou forte turbidité)	Vert vif (forêts), vert plus terne (mangrove)	Vert pomme	Rose - mauve	Distinction nette entre l'eau et les autres types de surface / Différenciation moins nette de plusieurs types d'eau / Bonne séparation de la végétation et des sols nus (cultures, bâti) / Confusion possible entre certains sols nus et le bâti
7	5	4	Noire	Bleu (forêt), bleu légèrement plus foncé (mangrove)	Bleu ciel	Jaune - orange	Distinction nette entre l'eau et les autres types de surface / Bonne séparation de la végétation et des sols nus (cultures, bâti) / Confusion possible entre certains sols nus et le bâti
4	3	5	Vert foncé (eau profonde ou peu turbide) à vert clair (faible profondeur ou forte turbidité)	Pourpre (forêt), pourpre légèrement plus foncé (mangrove)	Rose pâle	Bleu ciel à blanc	Bonne séparation de l'eau et des autres types de surface / Différenciation de plusieurs types d'eau / Bonne séparation de la végétation et du bâti / Risque de confusion entre certains sols cultivés et la végétation

Tableau 18 : Analyse de différentes compositions colorées sur Landsat TM

2. Une étude diachronique de l'évolution des sols et du couvert forestier

L'utilisation de l'informatique permet de visualiser les données multi-temporelles en les superposant dans une composition colorée diachronique. On ne combine alors plus trois canaux différents d'une même scène comme dans une composition habituelle, mais deux ou trois bandes spectrales identiques acquises à des dates différentes. La composition résultante présentera des couleurs uniquement là où des changements seront apparus au cours du temps, pour l'une ou l'autre des dates considérées. Les régions de l'image qui n'ont pas subi de changements apparaîtront dans différents niveaux de gris. Une telle composition colorée ne peut être alors réalisée que si les différentes scènes sont parfaitement superposables, au pixel près. En effet, lors d'une analyse diachronique, il est nécessaire de rendre comparable l'apparence sur écran des zones invariantes à différentes périodes.

Chaque image a donc été corrigée géométriquement (ou orthorectification) au préalable.

Nous n'avons pas eu recours ici à de corrections atmosphériques. Celles-ci sont difficiles à mettre en œuvre en l'absence de données sur l'état de l'atmosphère et de sa variabilité spatiale aux dates considérées. En revanche, des images prises en saison sèche ont été privilégiées pour bénéficier du moins de couverture nuageuse possible. Cependant, une approche empirique a été utilisée : la technique de rehaussement global des images appliquée par défaut consiste en effet à effectuer une dilatation d'histogramme, en sélectionnant deux valeurs de seuil S_{min} et S_{max} . Celles-ci seront respectivement affectées aux valeurs 0 et 255 lors de l'affichage des images sur écran. Les valeurs S_{min} et S_{max} sont calculées automatiquement à partir de l'histogramme cumulé des comptes numériques dans l'image, en considérant les fréquences cumulées de 2 % des pixels (S_{min}) et 98 % des pixels (S_{max}). Cette technique s'avère efficace pour une analyse visuelle comparative des images. Pour une comparaison des valeurs de luminance entre deux dates, il est alors nécessaire d'identifier des zones invariantes et de recourir aux techniques de spécification d'histogramme, voire à des transformations radiométriques basées sur les réponses spectrales de ces invariants (Caloz et Collet, 2001).

Les corrections géométriques et colorimétriques des images, les compositions colorées et les classifications non dirigées ont été traitées avec le logiciel de traitement d'images ENVI® pour les images présentées dans les figures 76 et 77. Ce sont donc plus de 30 images allant de 1972 à 2004 qui ont servi à l'analyse de l'occupation des sols. Leurs résolutions spatiales

varient de 30 m pour les plus récentes (TM et ETM+) à 60 m pour les images plus anciennes (MSS), facteur dont il faudra tenir compte lors de l'analyse des images.

3. Exemple pour le bassin amont du fleuve Solo

Le bassin amont du Solo correspond à la partie supérieure du fleuve jusqu'à son entrée dans le réservoir de Wonogiri. Pour étudier l'évolution de l'occupation des sols dans ce secteur nous nous sommes basés sur une carte d'occupation des sols au 1/25 000^{ème} réalisée par le *Bakosurtanal* datant de 1993, que nous avons comparé à une composition colorée à partir d'une image satellitaire de mai 2005. Nous avons ainsi pu déterminer les changements significatifs qui sont intervenus durant cette période (Fig.88 et 89). Pour ces deux dates le logiciel ArcGIS a été utilisé dans la numérisation et la création des cartes d'occupation du sol. La mise en page des deux cartes, quant à elles, a été réalisée à l'aide du logiciel Adobe Illustrator®.

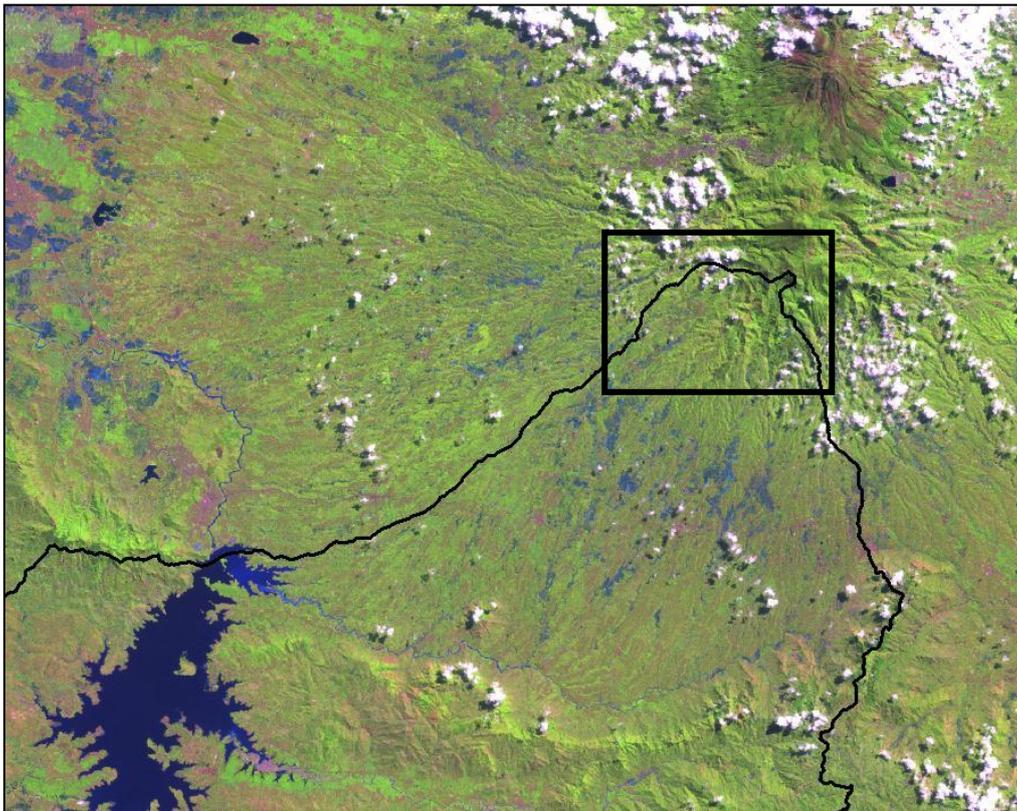


Figure 88 : Composition colorée en 5-4-3 sur le bassin amont du Solo (13-05-2005)
La partie encadrée représente le secteur qui est présenté sur la figure 89.

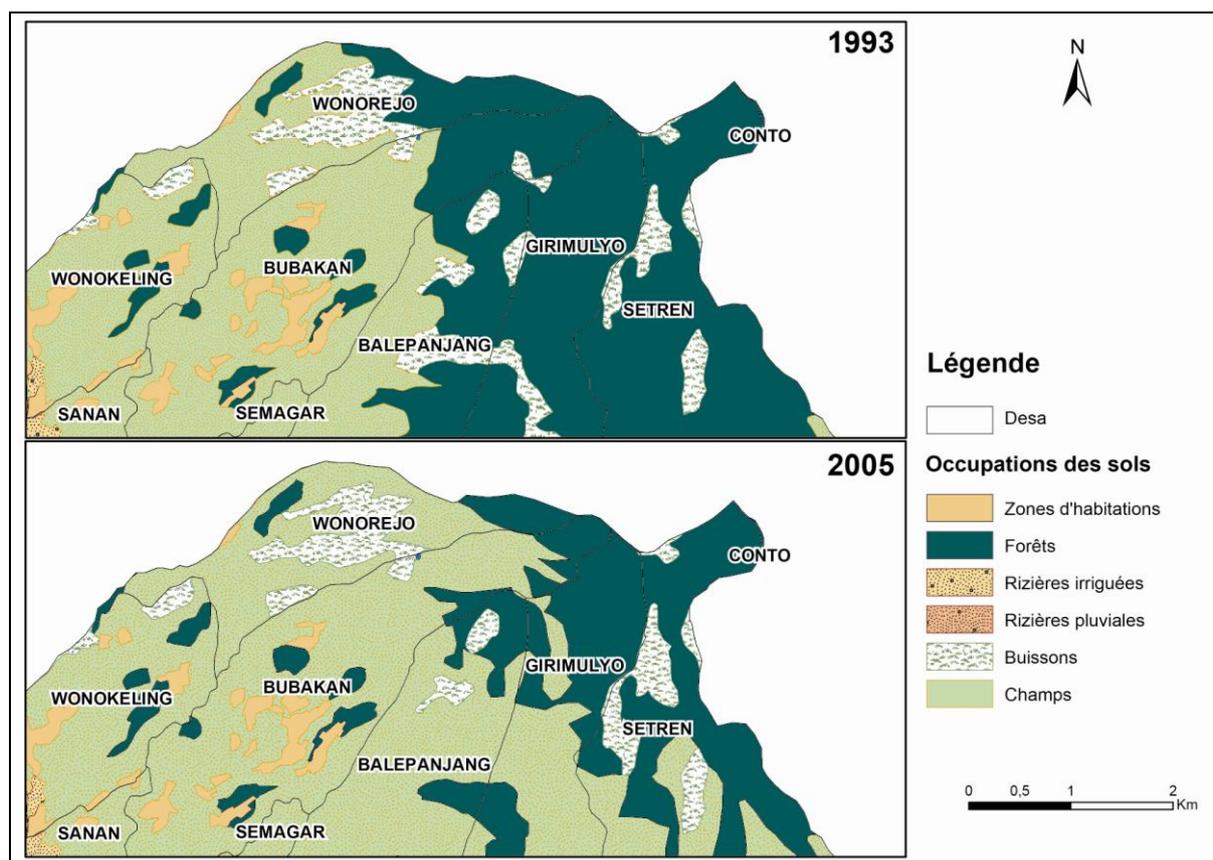


Figure 89 : Le recul des surfaces boisées entre 1993 et 2005 sur les versants du Mont Lawu dans le bassin amont du Solo

C. Création et présentation du système d'information géographique (SIG)

Le dernier outil sur lequel s'appuie cette recherche est un système d'information géographique (SIG) créé à l'aide du logiciel ArcGIS®. Celui-ci permet de centraliser toutes les données digitales (raster et vecteur) de nos terrains d'études et d'y intégrer les informations issues de la base de données présentées dans la partie précédente. L'objectif est de développer un outil performant capable de spatialiser, de cartographier, de créer de nouvelles informations et de contribuer ainsi à une décision plus rapide et plus efficace.

1. Traitement des données : une amélioration des outils existants

a. Vérification et correction des données recueillies

Avant toute utilisation des données collectées, a été effectué un important travail de correction. Chaque organisme traitant ses données en interne, beaucoup de couches d'informations étaient redondantes et difficilement comparables en l'état avec les données produites par les autres organismes. Chacune des couches a alors dû être analysées pour en sélectionner les plus cohérentes d'entre elles, les corriger et les géoréférencer dans un

même système. Par exemple, l'association de tous les vecteurs qui composaient un seul et même cours d'eau a permis de les renommer et de calculer leur longueur. Il en a été de même pour les courbes de niveau afin d'attribuer correctement les valeurs faisant référence à la même altitude. Fermer de nombreux polygones encore ouverts a aussi facilité le calcul de leurs surfaces. Ensuite, par croisement, la meilleure des données recueillie pour chaque couche d'information a été renommée, intégrée dans le SIG et classée par thème et par bassin.

b. La qualité des données recueillies

Une grande partie des données acquises dans les différents bureaux ont révélé qu'il ne s'agissait que de cartographie assistée par ordinateur (CAO). La digitalisation des données était généralement de mauvaise qualité et sans informations associées. L'avantage de créer un SIG réside, à l'inverse, dans le fait de pouvoir disposer de toutes les couches d'informations accessibles depuis un seul et même outil. Pour se faire ces informations doivent alors avoir la même projection et être correctement géoréférencées. Elles doivent aussi être rattachées à une base de données afin de croiser entre elles ces informations et ainsi en obtenir de nouvelles, utiles et servant d'aide à la décision. C'est par exemple ici le cas où en « cliquant » sur la station de Cirasea-Cenkrong, nous obtenons alors tous les renseignements nécessaires et inhérents à cette dernière tels que son code, le type d'instrumentation, la période ou encore les données disponibles etc. (Fig. 90).

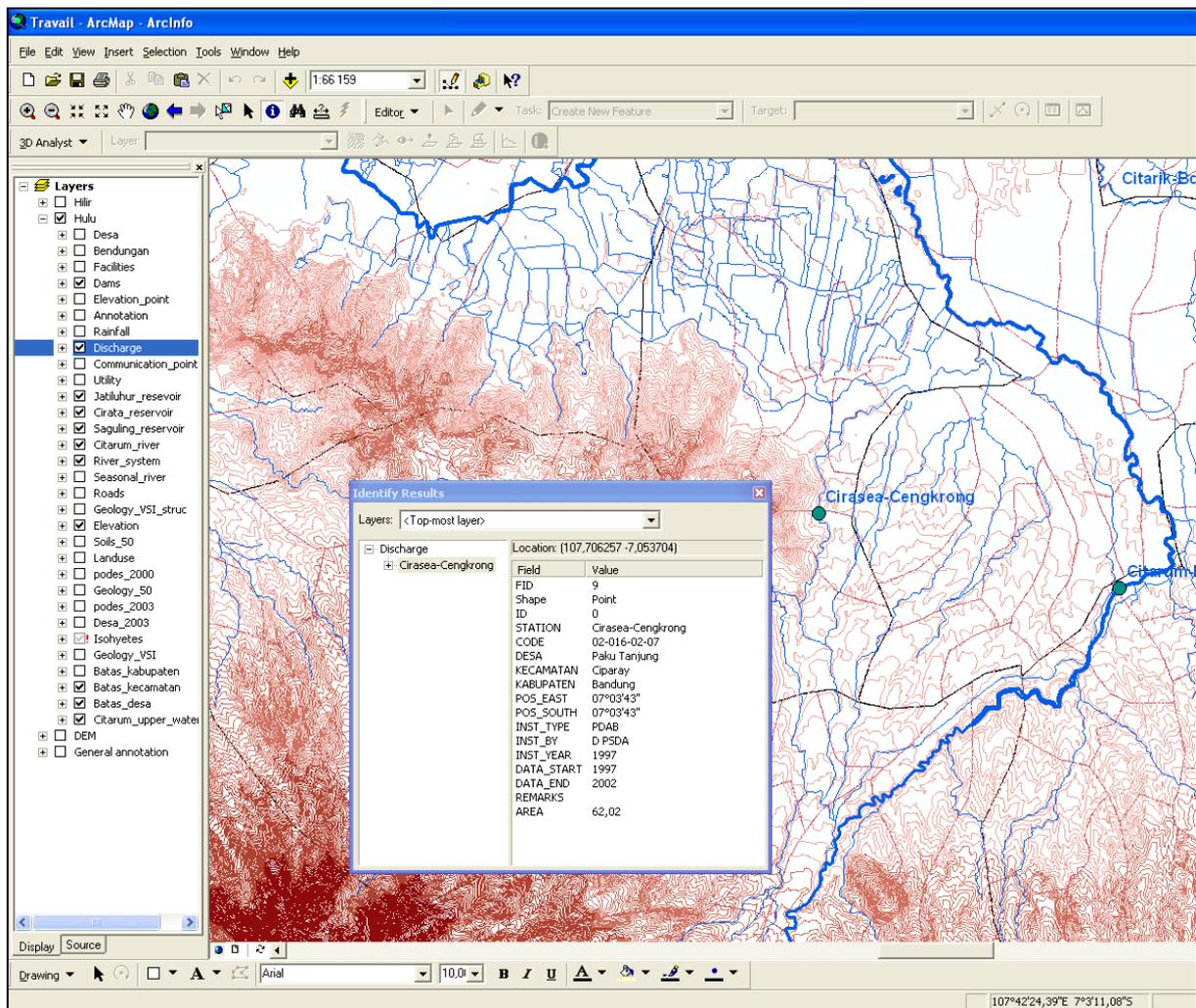


Figure 90 : Exemple d'informations disponibles dans le SIG pour la station de Cirasea-Cengkong dans le bassin du Citarum

2. Application des données : l'édition de nouvelles cartes thématiques

L'utilisation des SIG dans cette recherche nous a aidés à mieux comprendre nos différents terrains d'étude en disposant, sous forme digitale, d'informations thématiques précises.

a. Un outil d'appui au travail de terrain

Une fois toutes les informations numérisées, cet outil a permis l'édition de cartes spécifiques pour le travail préparatoire aux missions de terrain. Travaillant sur des bassins très vastes, grâce au SIG, il a été plus aisé de déterminer les zones qui pouvaient être les plus représentatives des conditions générales du bassin et ainsi nous guider dans le choix des terrains à étudier (Fig.91). Toutes les données (primaires et secondaires) collectées sur le terrain ont été intégrées pour compléter ou mettre à jour la base de données. Cet outil occupe donc une place centrale et primordiale dans notre travail d'acquisition et d'analyse.

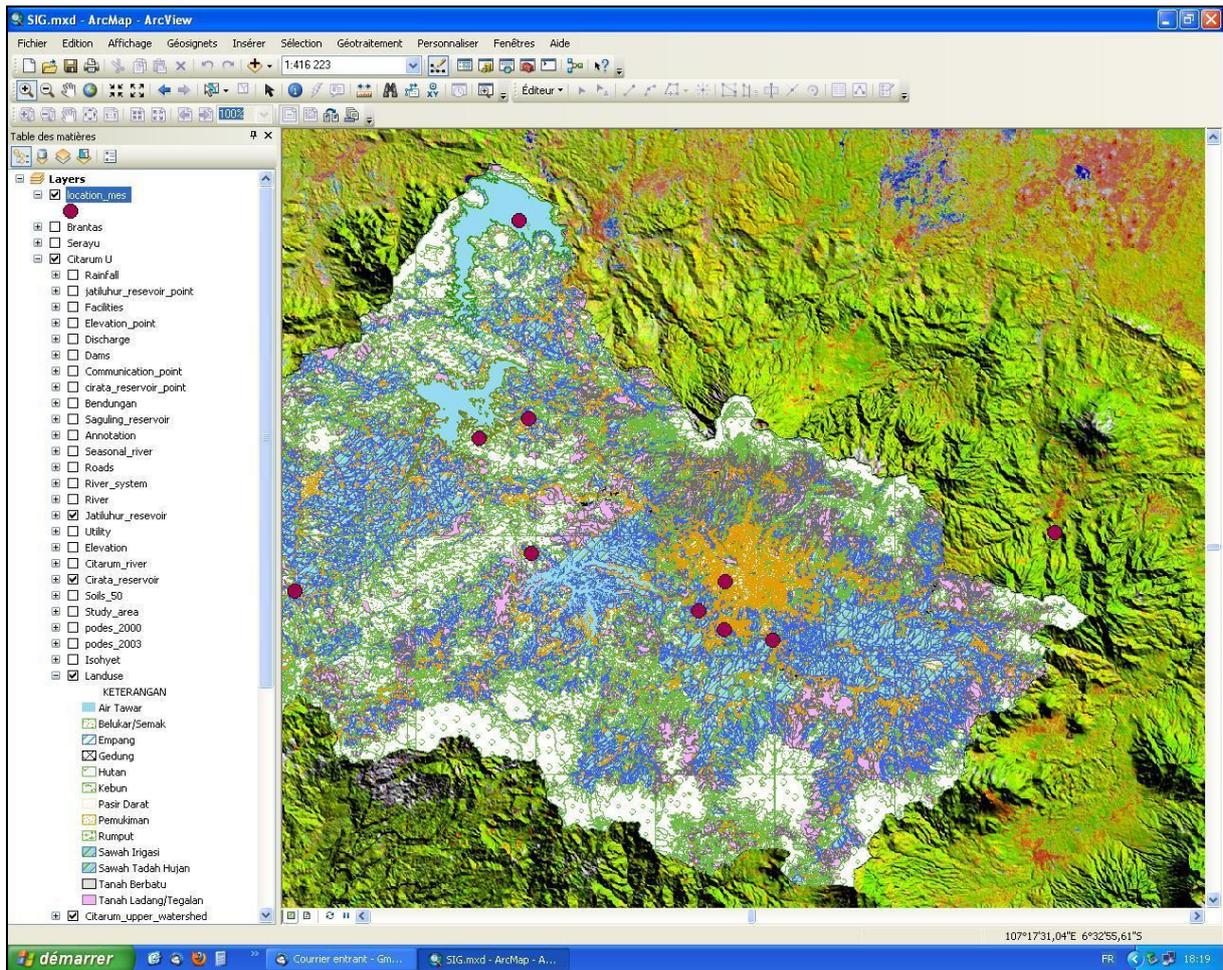


Figure 91 : Carte d'occupation des sols dans le bassin-versant amont du Citarum, réalisée à partir de l'analyse des images satellitaires et des missions terrain pour validation.

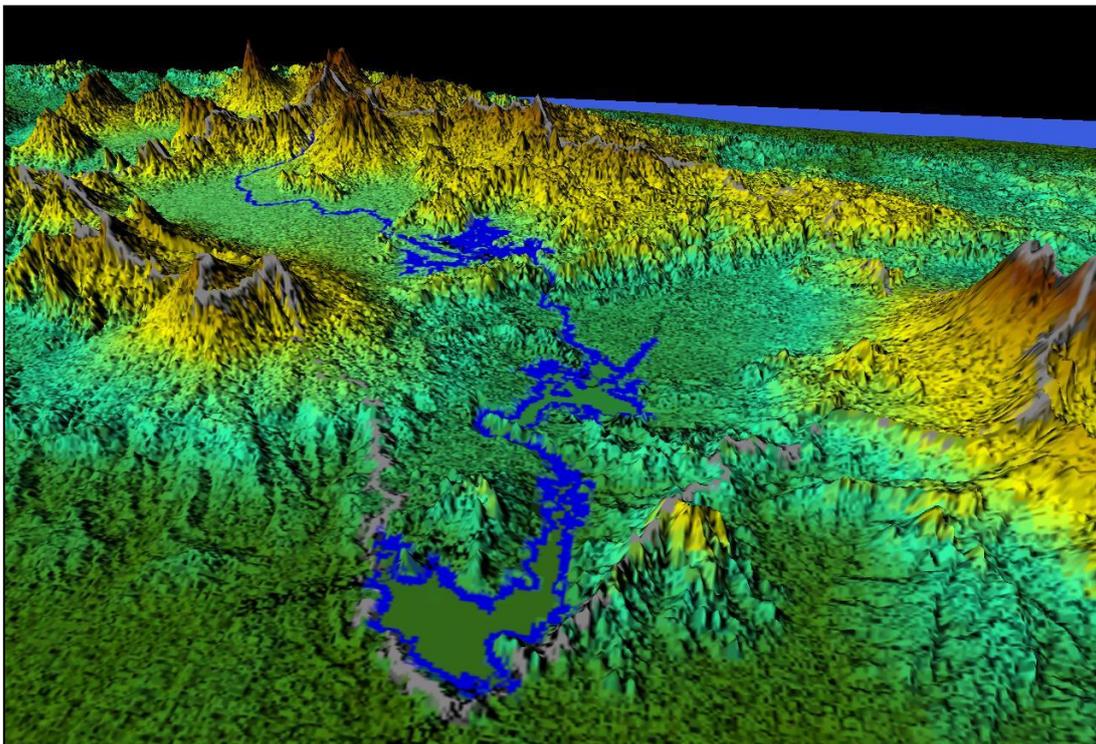


Figure 92 : Vue 3D du bassin amont du Citarum

- b. La création de carte par croisement d'informations : Le cas du bassin de la Konto à Java-Est.

Une autre force des SIG est sa capacité à créer de nouvelles cartes synthétisant des données de différentes couches d'informations. C'est le cas ici du bassin de la Konto où pour créer une carte d'érosion potentielle du bassin-versant, les données pluviométriques, topographiques, pédologiques et d'occupation des sols ont été croisées pour aboutir à la cartographie présentée en figure 93. Pour chacune de ces cartes thématiques il a été dressé un indice d'érodibilité présenté ci-dessous (Tab.19).

	1 : pas d'érosion	2 : érosion légère	3 : érosion modérée	4 : érosion importante	5 : érosion forte
Carte des pentes	Entre 3% et 8%	Entre 8% et 15%	Entre 15% et 25%	Entre 25% et 45%	Pente > 45%
Carte des isohyètes	2200 mm	2400 mm	2600 mm	2800 mm	3000 mm
Carte des sols	Gunung Butak ; Kraantjelek/ Sebalu ; Selorejo ; Sebalu ; Kraantjelek ; Jombok : Sols très bien drainés, très profonds	Nebrong serie ; Kaumrejo serie ; Coban Rondo : Sols bien drainés, profonds, parfois terrassés	Bendosari, kraantje lek ; Sereng toglo : Drainage modéré ou au contraire excessif, sols assez profonds	Kelet ; Tawongsari ; Pujon ; bendosari-Pinjal : Sols excessivement ou mal drainés, sensibles au ravinement (gullies)	Slip and landslides surfaces : Excessivement drainés, minces, sensibles à l'érosion hydriques, glissements de terrains
Carte de l'occupation du sol	Forêts	Buissons et broussailles	Rizières irriguées	Cultures non irriguées et plantations	Villages et sols nus

Tableau 19 : Classification des facteurs d'érosion

NB : Les critères d'érodibilité ont été expliqués dans le chapitre précédent.

Un indice allant de 1 (degré de plus faible érosion potentielle) à 5 (degré le plus élevé) a été attribué à chacune des parcelles en fonction de la susceptibilité de chacun des facteurs (pentes, isohyètes, sols, occupation du sol). Le degré d'érosion potentielle de chaque parcelle a été calculé en cumulant, pour chacune des parcelles, les indices de différentes cartes thématiques utilisées. On arrive alors à un total de 4 (degré 1 pour chaque facteur) pour les zones les moins sujettes à l'érosion et pouvant atteindre 20 (degré 5 pour chaque facteur) pour les zones les plus touchées.

Ces résultats obtenus compris entre 4 et 20 sont classés de la manière suivante :

Classes	Degré d'érosion	risque très faible  risque très fort
entre 4 et 6	1	
entre 6 et 8	2	
entre 8 et 10	3	
entre 10 et 12	4	
entre 12 et 14	5	
entre 14 et 16	6	
entre 16 et 18	7	
entre 18 et 20	8	

On obtient alors la répartition suivante :

Degré d'érosion	Nombre de parcelles	%	-> Classe modale
1	27	0,77%	
2	250	7,13%	
3	821	23,42%	
4	1238	35,33%	
5	824	23,50%	
6	308	8,79%	
7	35	1%	
8	2	0,06%	

Environ 80% des parcelles sont comprises entre le degré 3 et le degré 5 ce qui constitue un risque global assez important pour tout le bassin-versant. Le SIG nous permet également de localiser avec précision les zones de risque :

- Les zones 7 et 8 se trouvent sur les flancs du complexe Kawi/ Butak, qui se composent de plantations, avec des pentes à plus de 45% et de fortes précipitations (2 800 à 3 000 mm/an).
- Les zones classées 5 et 6 se répartissent pour la grande partie sur le piémont du complexe Kawi / Butak également, très pentus et parcourus par un réseau hydrographique dense. On les retrouve sur les sommets de l'Anjasmoro ainsi que sur quelques parcelles du piémont, mais de manière un peu plus clairsemées.
- Les zones classées 3 et 4 recouvrent toutes les pentes de l'Anjasmoro jusque dans la dépression intervolcanique.
- Le risque 1 et 2 se cantonne en aval le long de la kali Konto et s'étend de manière clairsemée dans la dépression intervolcanique, ainsi qu'en proximité du barrage.

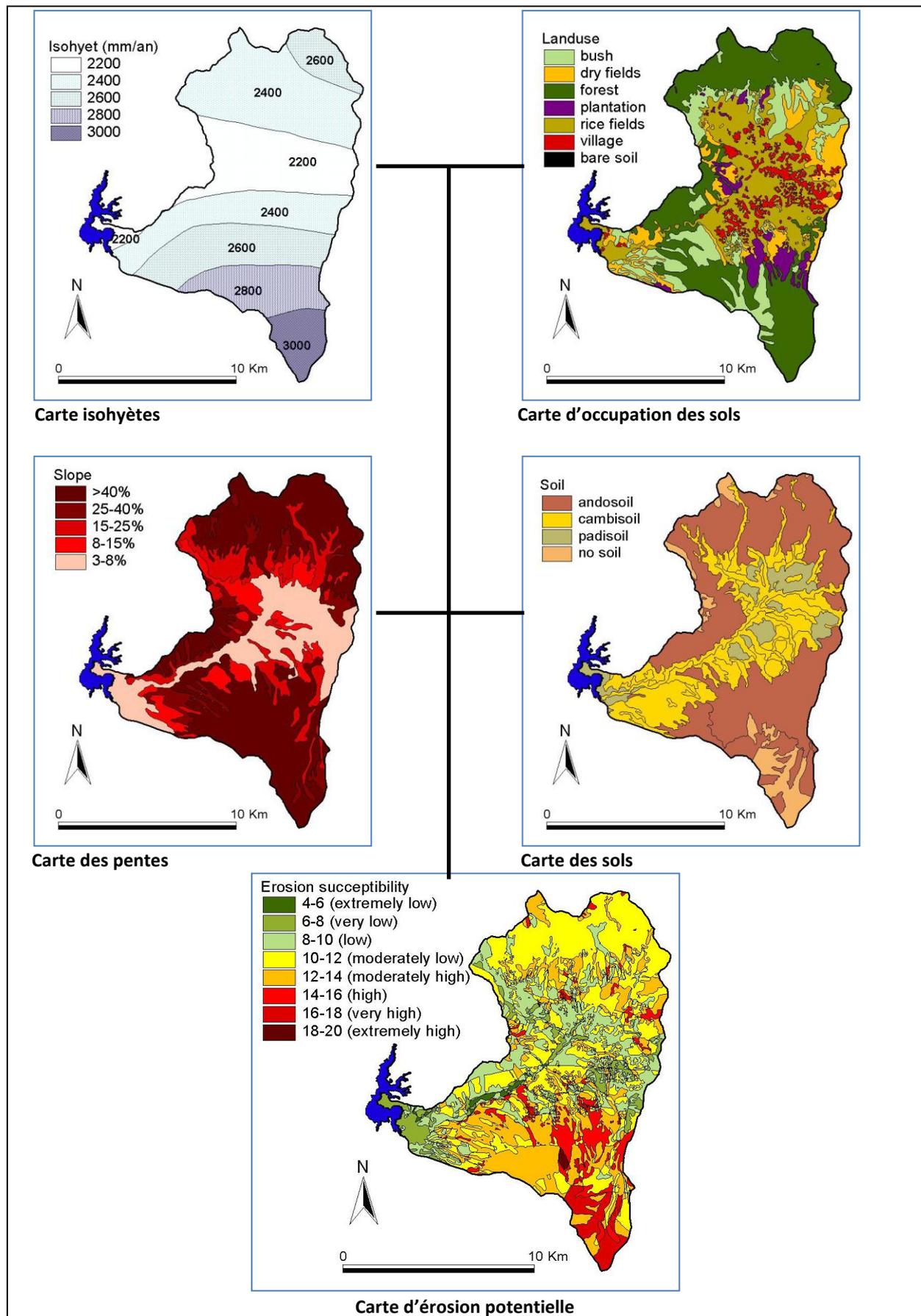


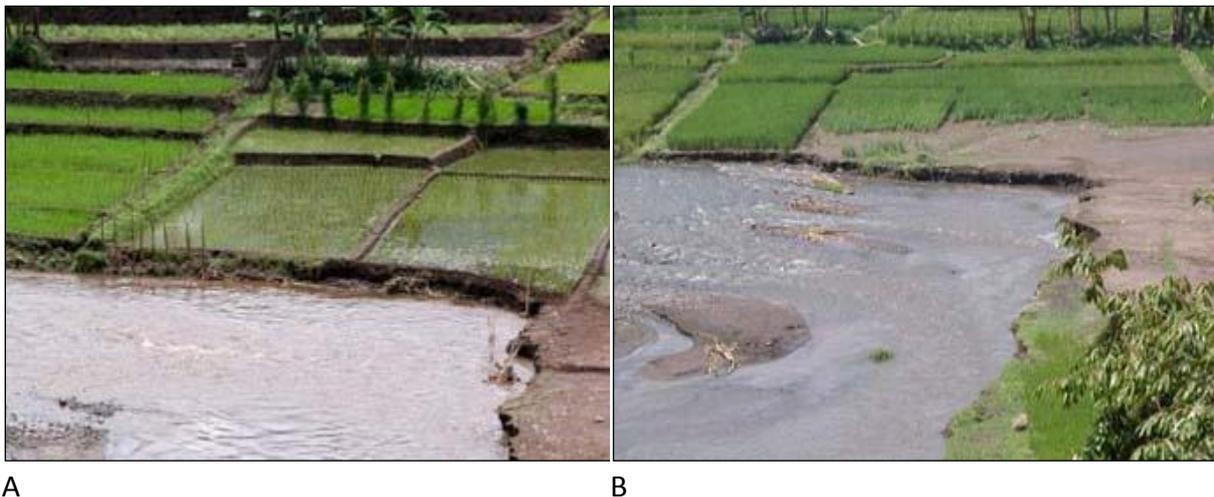
Figure 93 : Exemple de carte d'érosion potentielle sur le bassin versant de la kali Konto, Java-Est

III. Une approche naturaliste

Toute étude géographique doit être complétée par une bonne connaissance du terrain d'étude. En effet, la bonne perception de ce dernier à travers une observation minutieuse des conditions existantes permet de mettre en évidence les zones sensibles et représentatives sur lesquelles une attention particulière doit être portée. Certaines hypothèses de travail ont pu être ainsi validées ou revues lors des différentes missions.

A. Un suivi de la morphologie des cours d'eau

Comme présenté précédemment, le cadre physique javanais connaît des transformations rapides sous l'influence des facteurs climatiques. On le constate particulièrement dans la modification du tracé des cours d'eau. Lors des forts épisodes pluvieux, des crues puissantes modifient de manière notable le lit en érodant activement les berges. Ces matériaux représentant une source supplémentaire de sédiments qui peuvent aboutir dans les réservoirs. Leurs suivis ont un rôle important pour notre étude. Le plus souvent possible nous avons donc essayé de suivre des secteurs à différentes périodes afin de rendre compte des dynamiques érosives qui affectent les berges de nos cours d'eau (Fig. 94 et 95).



A **B**
Figure 94 : La kali Konto à Panggung juste en amont du Tokol dam, Desa Mulyorejo, Java-Est, les 04/02/2003 (A) et 08/04/2003 (B)

Lors des crues, le débit augmente fortement donnant au cours d'eau plus de force pour le transport mais aussi davantage pour arracher des nouveaux matériaux et parfois aussi remanier le chenal dans lequel il s'inscrit.



A

B

Figure 95 : Protection à la sortie de Ngeprih, Desa Sukomulyo, Java-Est, les 04/02/2003 (A) et 13/08/2006 (B)
Sur ces deux clichés, on note l'installation d'un muret de protection afin de maintenir les terres agricoles sur les berges à l'abri des crues.

B. Une étude de la condition des versants

Tout comme le suivi effectué pour les cours d'eau, toutes les missions de terrain ont permis de mieux observer l'état des versants présents et de repérer les secteurs présentant des conditions fortement déstabilisées « naturellement » ou sous l'action du défrichage et de certaines pratiques agricoles (Fig.96).



Figure 96 : Glissement de terrain, bassin de la kali Konto, Java-Est, le 05/09/2006

Les pratiques agricoles qui consistent à découper les versants afin d'y installer de nouvelles terres cultivables provoquent régulièrement des glissements de terrain plus ou moins importants.

Enfin, les différentes missions de terrain ont également permis, d'une part, de vérifier la présence et l'état des différents instruments de mesures mais aussi de collecter les données manquantes d'autre part. Ces dernières sont présentées dans la partie suivante.

IV. Rencontres et entretiens avec les acteurs

La recherche de ces données a été complétée par un important travail bibliographique mené en France afin de faire une synthèse de l'existant dans ce domaine. Pour compléter et actualiser ce travail, trois missions de terrain de longue durée (16 mois au total) ont été effectuées. Des rencontres répétées avec les différents acteurs ainsi que la collecte de nombreuses données nous ont permis de mieux appréhender les rouages de la gestion des ressources en eau en Indonésie.

Après avoir dressé le paysage des différents organismes (gouvernementaux, internationaux et universitaires) qui possédaient des données concernant nos bassins d'étude, nous allons présenter les différents acteurs rencontrés lors de nos missions de terrain. En effet, afin d'obtenir une compréhension plus fine des enjeux présents, de nombreux échanges ont eu lieu de manières répétées avec les différents organismes ayant une responsabilité dans les bassins étudiés. Ces entretiens nous ont également permis de mieux situer le rôle de chacun des acteurs et des relations qu'ils entretenaient entre eux. Ces rencontres nous ont aussi permis d'obtenir les autorisations nécessaires pour accéder aux rapports des précédentes études réalisées sur le sujet, que chacune des institutions avaient archivé en ses locaux.

Les acteurs rencontrés

La stratégie d'enquête a consisté à interviewer plusieurs personnes dans chacun des organismes afin de ne pas se limiter à un discours unique et à un seul point de vue de la situation. Nous avons essayé, autant que possible, de sonder tous les niveaux hiérarchiques afin de bien distinguer et déterminer les champs d'actions de ces derniers. Ayant mis en avant le côté international de la gestion des grands bassins indonésiens, nous avons dû côtoyer des personnes de différentes nationalités. Ces rencontres ont été menées en indonésien pour la majeure partie du temps, mais aussi en anglais ou encore en français selon l'origine des interlocuteurs (Tab.20).

ORGANISMES GOUVERNEMENTAUX		
<i>Organisation</i>	<i>Nom</i>	<i>Fonction</i>
Ministère des travaux publics (PU)	Basuki Hadimuljono	Inspecteur général des ressources en eau
	Mohd Ali	Chef du service de conservation des ressources en eau
	Raymond Kemur	Chef du service de la planification et du développement des ressources en eau
	Leonarda B Ibnusaid	Service de collecte des données hydroclimatiques
	Ratna Hidayat	Chercheur en environnement (qualité de l'eau)
Ministère des forêts (DepHut)	Harry Santoso	Directeur de la gestion des bassins-versants et de la réhabilitation des terres
Ministère du plan (Bappenas)	Donny Azdan	Directeur du service ressources en eau et irrigation
	Budhi Santoso	Chef du bureau irrigation
ENTREPRISES PUBLIQUES		
Perum Jasa Tirta I (Malang)	Tjoek Walujo Subijanto	Directeur général
	Widyo Parwanto	Directeur du bureau recherche et développement
	Raymond Valiant R.	Directeur de l'unité strategy et business development
	Fahmi Hidayat	Directeur de l'unité management et développement technique
Perum Jasa Tirta II (Purwakarta)	Djendam Gurusinga	Directeur général
	Herman Idrus	Directeur du bureau recherche et développement
	Sustisna Pikrasaleh	Chef du département PPASA
Perum Jasa Tirta I (Solo)	Erwin Budoyo	Directeur bureau technique
PT. PLN (Bureau central)	Kabul Sutijono Sugeng	Spécialiste en environnement
Indonesia Power (Saguling)	Sumarna Prawiranegara	Manager général
PJB Cirata	H. Syarifudin	Directeur technique
UNIVERSITES ET AGENCES DE RECHERCHE		
Puslitbang	Agung B. Ibrahim	Directeur de la station expérimentale en hydrologie
	Petrus Syariman	Hydrologue / chercheur
	Moelyadi Moelyo	Chercheur en ressources en eau
VSI	Surono	Directeur mitigation et risque géologique
ITB	Imam A. Sadisun	Professeur associé au laboratoire de géologie et ingénierie
Bandung Institute of Technology	Andojo Wurjanto	Chef du programme ingénierie océanographique
UGM	Junun Sartohadi	Géomorphologue
	Danang Sri Hadmoko	Géomorphologue
CIRAD	Jean-Guy Bertault	Directeur régional Asie du Sud Est
	Jean Marie Lopez	Agronome
IRD	Michel Larue	Directeur de l'antenne Indonésie
BAKOSURTANAL	Rudolf W. Matindas	Directeur
ORGANISMES INTERNATIONAUX		
Nippon Koei	Norio Takawanagi	Chef du service exécution technique
	Schinichiro Tanimoto	Ingénieur en sciences de l'environnement
	Minoru Ouchi	Manager général
BCEOM	Olivier Bechet	Directeur régional Indonésie et Sud Pacifique
South Java Flood control project	Flavio Tommasi	Chef de projet
ICWRMP	Iskandar Nugroho	Planning ressources en eau
	Ratih Widaningsih	Spécialiste en environnement
	Eric Quincieu	Spécialiste en gestion des ressources en eau
NEDECO	Gerard Pichel	Chef de projet

Tableau 20 : Liste des personnes rencontrées

(Les fonctions des personnes présentées dans ce tableau sont celles occupées lors de notre rencontre et sont susceptibles d'avoir évolué depuis).

Des entretiens semi-dirigés

Lors de toutes ces rencontres nous avons suivi un schéma similaire. Il s'agissait de discussions semis-dirigées pour obtenir des informations sur :

- les rôles et les domaines de compétences de l'organisme,
- le rôle précis de la personne interviewée pour connaître ses attributions dans l'institution et son rôle décisionnel,
- les principaux partenaires pour appréhender les rapports au même échelon (relation horizontale) et/ou aux échelons supérieurs ou inférieurs (relation verticale),
- les projets passés, présents et futurs.

Toutes ces informations nous ont permis d'affiner notre compréhension de la gestion des ressources en eau en Indonésie et plus particulièrement sur l'île de Java à travers nos bassins d'étude. Il est aussi apparu que la gestion de ces vastes espaces – où doivent cohabiter des intérêts parfois divergents – apparaît de manière ardue, et ce en particulier face à la multiplicité des acteurs et de leurs relations multiscalaires. Une réflexion à ce sujet sera développée dans le dernier chapitre.

Un suivi difficile des acteurs

Ces entretiens ont été plus ou moins faciles à obtenir en fonction des acteurs. Les rencontres avec les personnes possédant un poste décisionnel restent assez compliquées en Indonésie du fait qu'elles nécessitent de nombreuses démarches administratives comme celle de posséder une lettre de recommandation d'une personne supérieurement hiérarchique ou d'un institut d'accueil jouant le rôle de « sponsor ». Se tisser un réseau de relations au fil des missions fût donc nécessaire afin de nous permettre de rencontrer les acteurs ciblés. Un second problème ayant ralenti ces rencontres fut la forte mobilité des acteurs mêmes. Nous n'avons, qu'à de trop rares occasions, pu avoir un seul interlocuteur au même poste durant toute la durée des recherches. En effet, qu'il s'agisse de consultants ou d'experts présents de manière ponctuelle en fonction de l'avancement du projet ou encore des personnes touchées par les différents remaniements gouvernementaux, il nous a souvent fallu reprendre cette phase de rencontre depuis le début. À titre d'exemple, au poste d'Inspecteur général des ressources en eau – poste clé du Ministère des travaux publics puisqu'en relation directe avec le Ministre –, quatre personnes se sont succédées entre 2003 et 2012 (M. Roestam Sjarief, M. Basuki Hadimuljono, M. Amron et M. Hasan en mars 2012).

Comprendre les mécanismes et les rythmes de la sédimentation dans les réservoirs est une étude complexe faisant appel à de diverses et très nombreuses données. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes sources d'informations qui ont été utilisées pour cette recherche et les différentes méthodes pour traiter ces données. La création d'une base de données a permis l'analyse des données hydroclimatiques alors qu'un SIG a permis de regrouper toutes les informations nécessaires de nos bassins afin de pouvoir étudier les changements d'occupation des sols en particulier. Un regard critique a aussi été porté sur la qualité des données recueillies afin d'en fixer les limites. Ces données, après traitement, aboutissent aux résultats qui vont être présentés dans le chapitre 4, puis discutés dans le chapitre 5.

CHAPITRE 4 : ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE LA SÉDIMENTATION DANS LES LACS DE BARRAGE

Ce quatrième chapitre présente, à partir des données disponibles, l'évolution de la sédimentation des lacs de barrages javanais. Les données vont être étudiées à deux pas de temps différents afin de rendre compte d'une part des tendances à « long terme » (échelle pluri-décennale) puis d'autre part sur une vision plus fine à l'échelle pluri-annuelle, mettant en valeur les évolutions des vingt dernières années. Cette partie permet de mettre en lumière l'existence ou non de tendances et d'entrevoir quelles sont les hypothèses expliquant les rythmes de sédimentation dans les différents réservoirs de l'île de Java.

I. La sédimentation des réservoirs de barrage – bilan pluri-décennal

La figure 97 représente l'évolution du volume de chacun des réservoirs entre sa mise en service et le dernier relevé connu. L'utilisation d'une échelle logarithmique permet de regrouper sur la même figure les volumes initiaux pour l'ensemble des ouvrages. Toutefois, son interprétation nécessite certaines précautions. En effet, la pente des droites traduit uniquement la perte moyenne annuelle du volume potentiel d'eau des réservoirs, les pentes les plus inclinées présentent, quant à elles, les vitesses les plus fortes. Cette représentation ne permet pas de comparer les volumes perdus dans les réservoirs les uns par rapport aux autres, les dimensions étant différentes d'un réservoir à l'autre. Par exemple, dans le cas de Jatiluhur, alors que la pente de la droite est faible, les volumes perdus sont très importants alors que dans le cas de Sengguruh on observe l'inverse : la perte relative paraît très importante mais le volume du réservoir étant plus petit, les volumes concernés sont beaucoup plus faibles (Tab.21). Dans une approche opérationnelle pour les gestionnaires, la perte relative de réservoir disponible est un élément déterminant alors que la première, celle qui intéresse le géomorphologue, se préoccupe des volumes bruts se déposant dans le réservoir car elle rend compte des transferts sédimentaires dans la partie en amont du réservoir.

Les deux approches étant indissociables, nous nous intéresserons donc à la fois aux pertes effectives en volume pour obtenir une bonne quantification des volumes de sédiments arrivant dans un réservoir mais aussi à la capacité-même de celui-ci.

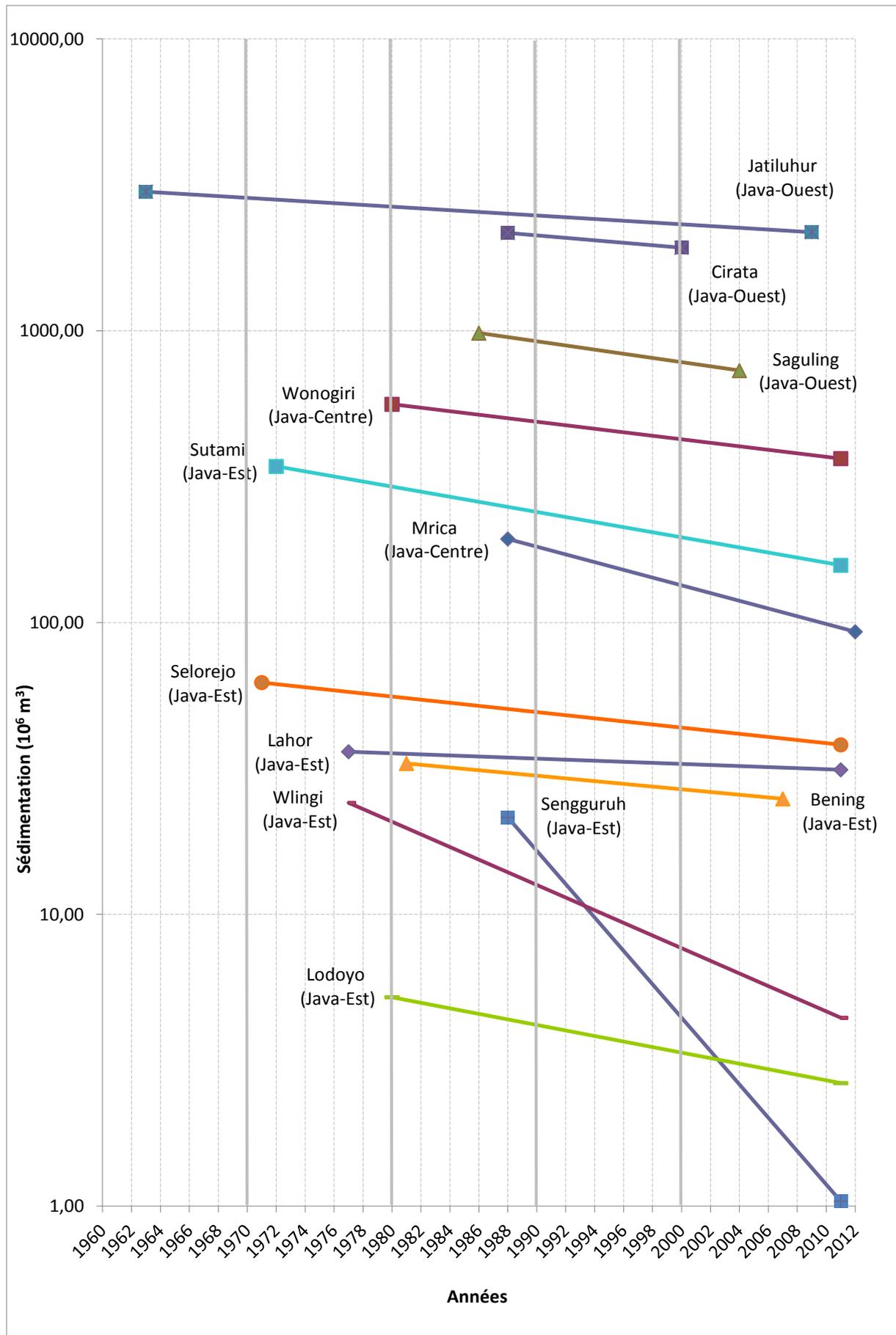


Figure 97 : Sédimentation moyenne pour les barrages étudiés à Java depuis leur mise en service.

A. Des taux de sédimentation variables

S'intéresser aux volumes sédimentaires entrant dans les réservoirs des barrages permet de rendre compte de la production sédimentaire dans la partie du bassin en amont de l'ouvrage. Fonctionnant comme un piège à sédiments, ce dernier est un bon indicateur de la dégradation des sols du bassin-versant.

1. Analyse du volume perdu dans les réservoirs

Le tableau 21 dresse un état de la sédimentation en présentant la sédimentation moyenne annuelle due à la présence des différents barrages. On note ainsi des volumes très hétérogènes variant entre $19,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour le réservoir de Cirata à $105\,000 \text{ m}^3$ pour celui de Lodoyo. En termes de volume brut ce sont donc les barrages de Java-Ouest qui accumulent le plus de sédiments.

Barrages	Surface du bassin (km ²)	Volume initial (10 ⁶ m ³)	Dernier volume connu (10 ⁶ m ³)	Volume total de sédiments (10 ⁶ m ³)	Période étudiée	Sédimentation moyenne annuelle (10 ⁶ m ³)
Cirata	4 119	2 165	1 926,91	2 192,09	1988 – 2000	19,841
Jatiluhur	4 500	3 000	2 178	2 322	1963 – 2009	17,870
Saguling	2 283	982	730,5	1 552,5	1986 – 2004	13,972
Wonogiri	1 350	560	364,94	985,06	1980 – 2011	6,292
Sutami	2 050	343	157,17	1 892,83	1972 – 2011	4,765
Mrica	1 022	193,5	93	929	1989 – 2012	4,370
Sengguruh	1 659	21,5	1,04	1 657,96	1988 – 2011	0,890
Selorejo	236	62,3	38,11	197,89	1971 – 2011	0,605
Wlingi	2 890	24,1	4,42	2 885,58	1977 – 2011	0,579
Bening	89,5	37,5	25,72	64,62	1981 – 2007	0,453
Lahor	160	36,1	29,03	130,97	1977 – 2011	0,208
Lodoyo	3 017	5,9	2,64	3 014,36	1980 – 2011	0,105

Tableau 21 : Taux de sédimentation moyen dans les réservoirs étudiés

2. Une relation forte avec la taille des réservoirs

La figure 98 met en relation le volume initial des réservoirs et les taux de sédimentation moyens constatés dans la figure 97 ci-dessus. On s'aperçoit alors de la forte corrélation entre ces deux facteurs. En effet, ce sont les mêmes réservoirs qui sont à la fois les plus volumineux comme ceux connaissant les taux de sédimentation moyens annuels les plus élevés.

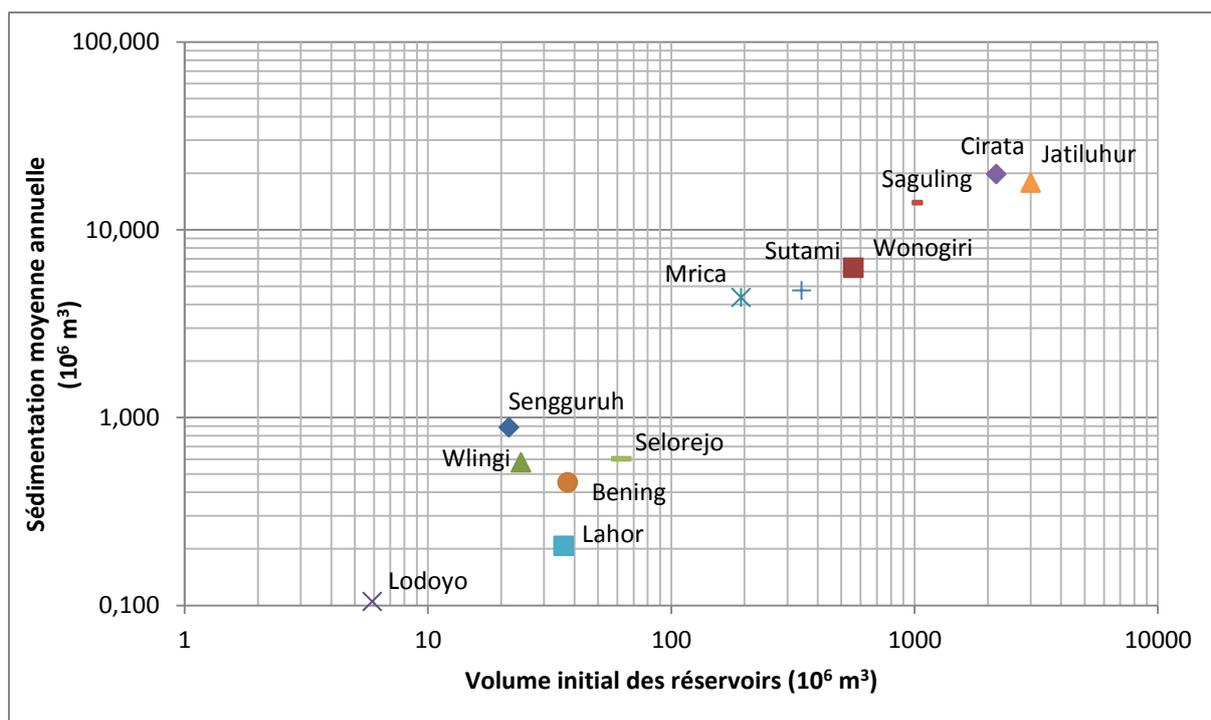


Figure 98 : Relation entre le volume initial et la sédimentation moyenne annuelle des réservoirs étudiés

Au regard du tableau 21 et de la figure 98, la classification suivante peut être mise en place :

- les grands réservoirs avec un volume initial supérieur à $1\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$,
- les réservoirs moyens avec un volume initial compris entre 100 et $999 \times 10^6 \text{ m}^3$
- et enfin les petits réservoirs avec un volume initial inférieur à $100 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Les grands réservoirs, tous situés à Java-Ouest, sur le cours du Citarum sont ceux qui accumulent les plus gros volumes de sédiments. Les trois premiers barrages ont des taux annuels compris entre 11 et $20 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. Le réservoir de Cirata connaît quant à lui le taux annuel le plus élevé avec près de $20 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

Pour les réservoirs Mrica et Sutami et Wonogiri compris entre $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ et $999 \times 10^6 \text{ m}^3$, on observe des taux de sédimentation annuels plus faibles, avoisinant les $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit deux à quatre fois moins que les taux constatés pour les grands réservoirs.

Plus nombreux dans cette dernière classe et tous situés à Java-Est, les taux de sédimentation moyens annuels des petits réservoirs sont bien plus hétérogènes. Sengguruh, le premier réservoir sur le cours du Brantas, est celui qui connaît le taux annuel le plus important avec $890\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ suivi des autres ayant des taux de sédimentation compris entre 100 000 et $600\,000 \text{ m}^3$ par an.

On constate que cette répartition par volume de réservoirs correspond aussi à une répartition géographique (gradient ouest/est), les plus volumineux d'entre eux se trouvant à

Java-Ouest. Ce gradient ouest-est correspond également à un gradient de précipitations, qui sera présenté dans le chapitre suivant.

B. La perte moyenne annuelle de la capacité des réservoirs

Après la description des volumes de sédimentation dans la partie précédente, il s'agit ici de raisonner en fonction de la capacité des réservoirs et de saisir le pourcentage de volume utile perdu annuellement par chacun des réservoirs. Cette donnée est au centre des préoccupations dans la gestion des ouvrages par les organismes qui en ont la charge, eux-mêmes étant les garants du maintien des fonctions de l'ouvrage dans leur pérennité.

1. Analyse de la capacité perdue dans les réservoirs

Le tableau 22 reprend en partie le tableau 21 à la différence qu'il présente dans sa dernière colonne la capacité moyenne annuelle perdue exprimée en pourcentage. On se rend compte que le classement des barrages est alors très différent de celui proposé précédemment. Ce classement correspond à ce qu'on a pu constater sur la figure 97.

Barrages	Volume initial (10 ⁶ m ³)	Dernier volume connu (10 ⁶ m ³)	Période étudiée	Sédimentation moyenne annuelle (10 ⁶ m ³)	Capacité moyenne annuelle perdue (%)
Sengguruh	21,5	2,32	1988 – 2011	0,890	4,14%
Wlingi	24,10	4,41	1977 – 2011	0,579	2,40%
Mrica	193,50	119,50	1989 – 2012	4,370	2,26%
Lodoyo	5,90	2,03	1980 – 2011	0,105	1,78%
Saguling	982	730,50	1986 – 2004	13,972	1,42%
Sutami	343	174,57	1972 – 2011	4,765	1,39%
Bening	37,50	25,72	1981 – 2007	0,485	1,21%
Wonogiri	560	120	1980 – 2011	6,292	1,12%
Selorejo	62,30	44,01	1971 – 2011	0,605	0,97%
Cirata	2165	1926,91	1988 – 2000	19,841	0,92%
Jatiluhur	3000	2178	1963 – 2009	17,870	0,60%
Lahor	36,10	30,77	1977 – 2011	0,208	0,58%

Tableau 22 : Perte moyenne annuelle en pourcentage de la capacité des réservoirs

Les valeurs sont ici échelonnées de 0,6% pour le réservoir de Lahor à près de 4% pour le réservoir de Sengguruh. Or les pertes dans les réservoirs mondiaux présentés dans la littérature sont de l'ordre de 0,2% (pour les réservoirs américains et dans la région du Maghreb) et 2 à 3% pour les réservoirs chinois (McCully, 2001, Remini, 2009) cela montre bien les vitesses extrêmement rapides du comblement de certains des réservoirs sur l'île de Java.

2. Une relation mettant en évidence d'autres enjeux

La figure 99, qui dresse la relation entre le volume des réservoirs et la perte annuelle moyenne de la capacité de ces derniers peut être comparée à la figure 98. La relation apparaît moins linéaire même si les plus petits réservoirs connaissent une perte plus rapide de leur capacité de stockage comparé aux grands réservoirs. On peut établir le constat suivant :

- 4 réservoirs ont une perte moyenne annuelle inférieure à 1% : Lahor / Jatiluhur / Cirata et Selorejo ;
- 5 réservoirs ont des valeurs situées entre 1% et 2% : Saguling / Sutami / Bening / Lodoyo et Wonogiri ;
- Enfin 3 réservoirs ont des valeurs supérieures à 2% : Wlingi / Sengguruh et Mrica

Toutefois à capacité initiale égale, on note que certains réservoirs connaissent une perte plus rapide que les autres. C'est le cas pour ceux de Lahor et de Bening avec respectivement une perte de 0,58% et 1,29%, il en est de même pour ceux de Wlingi et Sengguruh avec respectivement 2,40% et 4,14%. Le cas du réservoir de Wonogiri montre, quant à lui, que de grands réservoirs peuvent aussi voir leur capacité se réduire fortement chaque année. Il est donc nécessaire de s'interroger sur les causes d'un comblement aussi rapide mettant en péril les fonctions principales des barrages.

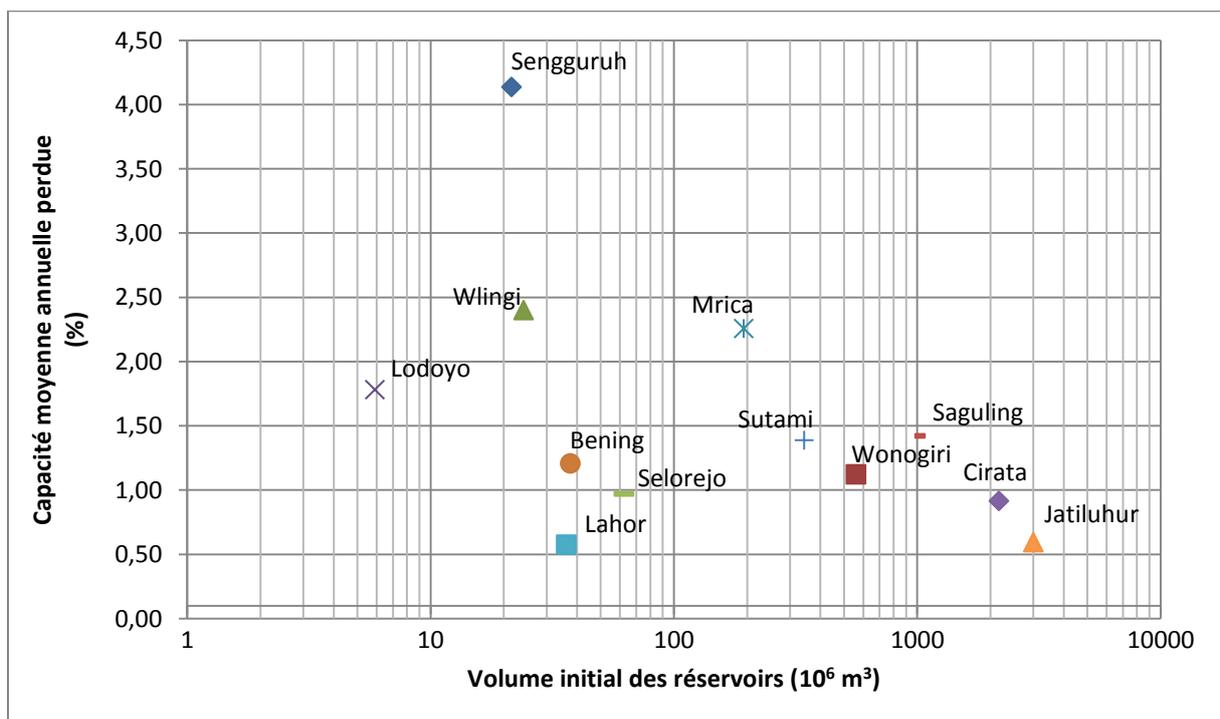


Figure 99 : Relation entre le volume initial et la capacité moyenne annuelle perdue des réservoirs étudiés

C. Capacité brute restante des réservoirs

Les dernières données sur la capacité restante connue pour chaque réservoir (Fig.100) montrent qu'ils se situent à des stades différents de leur évolution.

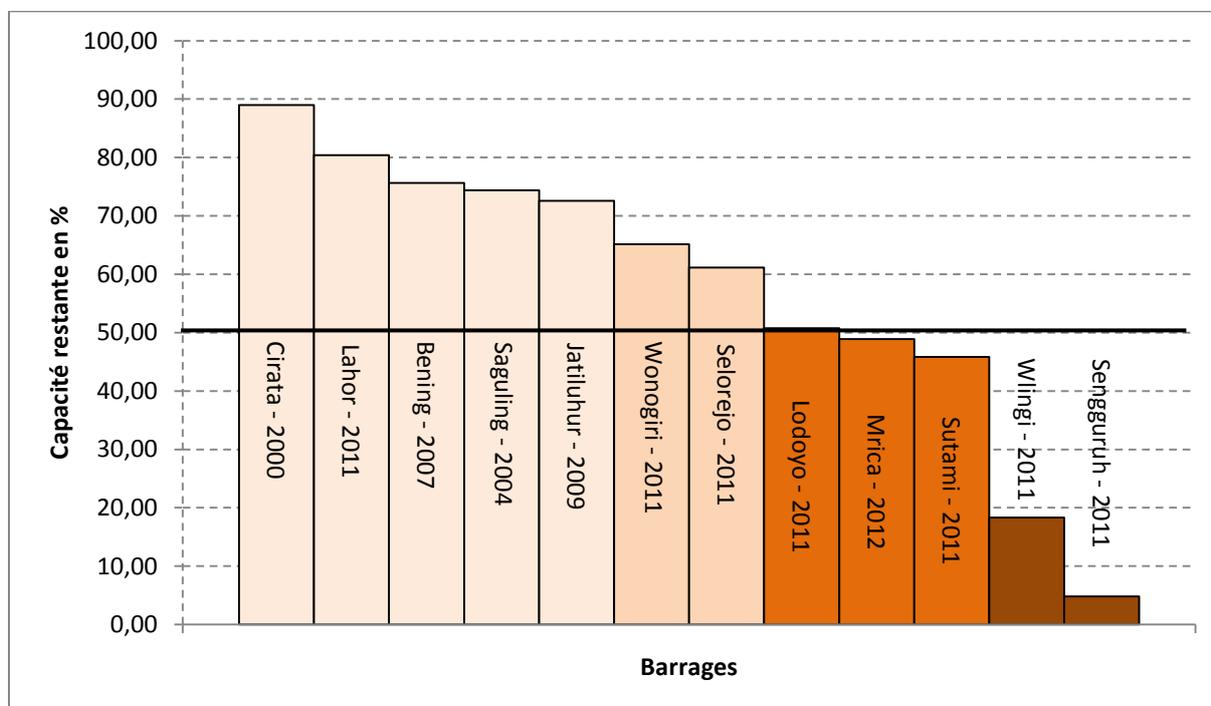


Figure 100 : Capacité restante des réservoirs selon les derniers chiffres connus

1. Capacité restante supérieure à 50%

Sept des douze barrages ont encore une capacité de leurs réservoirs supérieure à 50%. Il s'agit des barrages de Cirata, Lahor, Bening, Saguling, Jatiluhur, Wonogiri et Selorejo. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces chiffres : une construction récente du barrage, des faibles taux de sédimentation ou les deux facteurs conjugués. La grande capacité de stockage restante aux barrages de Bening (1981), Saguling (1986), et Cirata (1988) peut être expliquée par la jeunesse de ces derniers, construits après 1980. Certains barrages construits avant 1980 comme Jatiluhur (1963), Selorejo (1971) ou Lahor (1977) ont aussi gardé une capacité de stockage importante pour des raisons qu'il faudra comprendre : protection par des barrages situés plus en amont des barrages déjà existants ? Faibles taux d'érosion dans le bassin-versant ? Mesures de conservation et/ou de reboisement ?

2. Capacité inférieure à 50%

Les barrages de Sutami (1972), Mrica (1988) et Lodoyo (1980) ont une capacité restante variant entre 40 et 50%. Les barrages dont les capacités restantes sont inférieures à 30% sont d'ores et déjà dans un état critique. Wlingi (1977), Sengguruh (1988) ont tous deux perdu plus de 70% de leur volume initial et ces derniers sont aussi ceux qui connaissant les pertes de capacité annuelles les plus élevées (Tab. 22). Tous ces barrages assurant de nombreuses fonctions, certains d'entre eux vont se trouver confrontés à des choix difficiles qui auront, quoi qu'il en soit, de forts impacts financiers. Malgré des volumes de sédiments plus importants à Java-Ouest, il semblerait que les réservoirs les plus touchés par la sédimentation soient ceux de plus petit volume, situés principalement à Java-Est.

II. Rythmes de sédimentation à l'échelle pluri-annuelle

Après avoir décrit l'évolution globale de la sédimentation dans les réservoirs javanais permettant de mettre en lumière les grandes tendances, cette partie s'intéresse de manière plus précise à l'étude des variations inter-annuelles des taux de sédimentation. L'analyse se fonde sur les données des différents échosondages réalisés et permettra de déterminer la perte de volume des réservoirs en montrant la régularité ou non de cette baisse. Un intérêt plus particulier sera ensuite porté à la période s'étirant des années 90 jusqu'à nos jours, où tous les barrages étudiés étaient alors en service permettant une étude comparée entre eux. Les réservoirs de Cirata et de Saguling ne disposant que d'une seule donnée d'échosondage ont été intentionnellement écartés, ne pouvant ainsi faire part de variation.

A. Étude des rythmes de sédimentation

La figure 101 détaille la diminution de la capacité des réservoirs par périodes plus ou moins régulières en fonction du nombre d'échosondages qui ont été effectués. Il est alors possible de travailler sur l'évolution des rythmes de sédimentation depuis la mise en service des barrages. La figure montre que la diminution est rarement linéaire et que tous les réservoirs n'ont pas été affectés de la même manière. Il est donc possible de séparer les réservoirs en deux catégories en fonction des rythmes qu'ils ont connus.

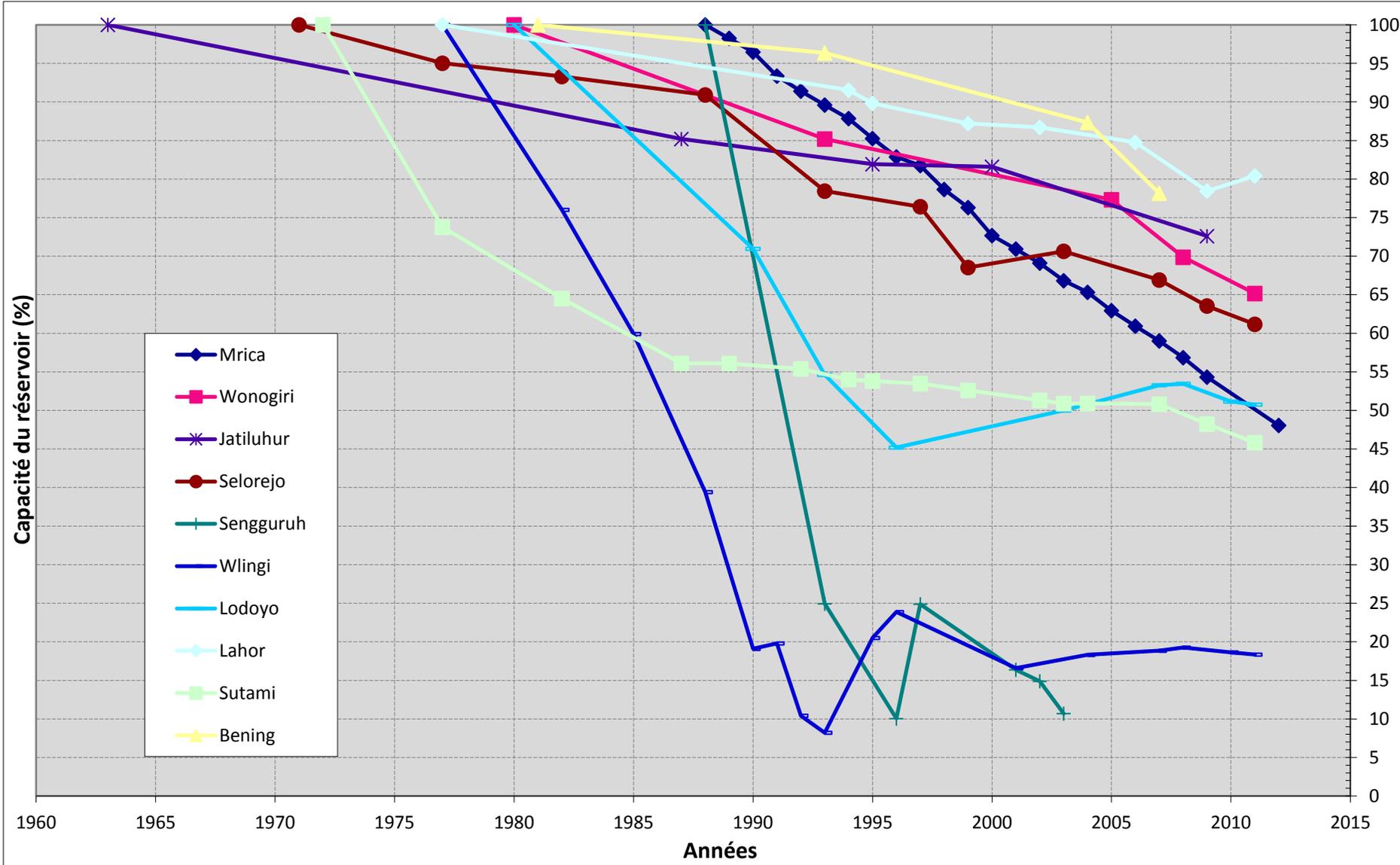


Figure 101 : Évolution de la capacité des réservoirs à Java depuis les années 60.

1. Baisses légères et régulières

Sept ouvrages connaissent depuis leur mise en service une baisse modérée et régulière dans le temps. Il s'agit des barrages de Jatiluhur, Mrica, Wonogiri, Lahor, Selorejo, Bening et Sutami (Tab. 23).

Jatiluhur, le plus ancien des trois barrages (1963) en enfilade sur le cours du Citarum est aussi le plus en aval. Quatre échosondages ont été effectués par le Puslitbang Sumber Daya Air entre 1987 et 2009 et nous donnent ainsi une idée de la sédimentation dans le lac de barrage. Mis en service en 1963 avec une capacité initiale de $3\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$, ce réservoir a vu sa capacité se réduire à $2\,178 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 2009, soit une perte de $822 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit plus de 27%. Nous pouvons constater dans cette évolution que la perte de capacité la plus nette fût durant la période 2000-2009 avec un rythme de $30 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. La première période de 1963 à 1987 présente un rythme assez élevé de $18,5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ alors que durant la période de 1987 à 1995, le rythme de sédimentation a été sensiblement moins rapide puisque la perte s'est élevée à $12,25 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. Enfin entre 1995 et 2000, on constate une nette baisse de la sédimentation avec seulement $2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. Le rythme de sédimentation a donc fortement varié tout au long de la période étudiée surtout lors des 15 dernières années où les taux moyens annuels entre les deux dernières périodes ont été multipliés par 15 malgré la construction des barrages de Saguling 1986 et Cirata en 1988.

Le barrage de Mrica est le grand barrage sur le cours du Serayu, en exploitation depuis 1988 et d'une capacité initiale de $193,5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ce barrage est suivi annuellement par *Indonesia Power* depuis sa mise en service, ce qui constitue donc une source d'information importante dans les rythmes de sédimentation. On note en 2012 une perte totale de capacité de $100,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit près de 52%, avec une baisse constante et régulière de la vitesse de sédimentation. Sur la période étudiée, les vitesses de sédimentation varient entre $2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ et $7 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. Cependant, le fait le plus remarquable se situe en 1997-1998 où la vitesse de sédimentation passe alors, en une seule année, de $2,17 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ à $6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$. Il s'agira alors de comprendre ce qui a pu provoquer une accélération aussi brutale de la sédimentation.

Le réservoir de Wonogiri, seul réservoir dans le bassin du Solo, d'une capacité initiale de $560 \times 10^6 \text{ m}^3$ a été suivi à quatre reprises depuis 1993. Le premier sondage en 1993 fait état d'une accumulation de $82,90 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit une sédimentation moyenne de $6,37 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ pour la période 1980-1993. Sa perte totale de capacité a été estimée à $195,07 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 2011, soit près de 39%. La période qui fait état de la sédimentation la plus importante est en 2005 et 2008 avec des vitesses de sédimentation de près de $14 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ qui témoigne de la forte sédimentation récente dans ce réservoir.

Le barrage de Lahor fonctionne en parallèle au barrage de Sutami mais n'a été mis en service qu'en 1977 avec une capacité initiale de $36,10 \times 10^6 \text{ m}^3$. Nous disposons de 7 échosondages couvrant la période 1994-2011. Le dernier échosondage, réalisé en 2011, fait état d'une capacité restante de $29,03 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit une perte de $7,08 \times 10^6 \text{ m}^3$ sur la période, soit près de 20%. Les valeurs de pertes annuelles restent assez faibles en comparaison des autres barrages avec des valeurs inférieures à $1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, excepté pour la première période entre 1977 et 1994 avec $3,05 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

Le barrage de Selorejo est un des deux seuls grands barrages étudiés à Java-Est qui ne se situe pas sur le cours du fleuve Brantas, mais sur un de ses affluents – la kali Konto – dans la partie amont du bassin. L'entrée en service du barrage date de 1971 où la capacité initiale était de $62,30 \times 10^6 \text{ m}^3$. La présence du volcan Kelud dans la zone amont du bassin de la kali Konto explique certainement que ce barrage ait été suivi de façon régulière. Dix échosondages ont ainsi été réalisés entre 1971 et 2011 par *Jasa Tirta*. Le dernier sondage a révélé que la capacité du réservoir s'est réduite à $38,11 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit une perte totale de $24,19 \times 10^6 \text{ m}^3$, correspondant à 39% de sa capacité. On note ainsi deux périodes où s'observe un passage brutal de valeurs faibles à de valeurs fortes. En revanche, entre 1982 et 1988 la vitesse de sédimentation s'était nettement affaiblie puisqu'on relève seulement $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments déposés. Lors de la période de 1988 à 1993, on constate une augmentation brutale de ces valeurs puisqu'elles montèrent jusqu'à $7,77 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cette dernière période semble avoir connu de grands bouleversements pour que ses taux puissent y avoir été multipliés par 5. La période 1997-1999, quant à elle, présente des valeurs encore plus rapides puisque ce sont $4,91 \times 10^6 \text{ m}^3$ qui se sont déposés dans le bassin en seulement deux ans. Ces valeurs nous amèneront ainsi à étudier spécialement les deux périodes

mentionnées ci-dessus, c'est à dire de 1988 à 1993 puis de 1997 à 1999. Cette seconde période se situe pendant la crise économique et politique de la *Reformasi*. La période 1999-2003 a connu, pour sa part, un regain de la capacité certainement imputable à l'intervention humaine (lâché d'eau ou curage) avant de connaître une sédimentation comprise entre $500\,000\text{ m}^3\text{ an}^{-1}$ et $1\,000\,000\text{ m}^3\text{ an}^{-1}$ sur la période allant de 2003 à 2011.

Le réservoir de Bening construit au début des années 80 sur la rivière Widas – tributaire du Brantas – a connu trois suivis de sa capacité, d'une capacité initiale de $32,90 \times 10^6\text{ m}^3$, qui fait état en 2007 d'une perte cumulée de $7,18 \times 10^6\text{ m}^3$, soit plus de 22%. La période qui a connu une forte sédimentation est 2004-2007 avec une sédimentation moyenne annuelle d'environ $1 \times 10^6\text{ m}^3\text{ an}^{-1}$. Tout comme ce qui a été remarqué à Wonogiri, la sédimentation semble s'être fortement accélérée lors de la dernière décennie.

Le barrage de Sutami est le plus ancien des ouvrages installés sur le cours du Brantas puisqu'il a été mis en fonction en 1972, avec une capacité initiale de $343 \times 10^6\text{ m}^3$. Un total de 15 échosondages réalisés en intégralité par *Jasa Tirta* nous permet de retracer la sédimentation dans ce lac de barrage. La capacité du réservoir s'est réduite à $157,17 \times 10^6\text{ m}^3$ en 2011, soit une perte cumulée sur la période étudiée de $185,83 \times 10^6\text{ m}^3$, soit 54%. La période où la sédimentation a été la plus importante correspond à sa mise en fonction entre 1972 et 1977 avec une vitesse de $90 \times 10^6\text{ m}^3$, représentant la moitié de la totalité des sédiments déposés. La période suivante de 1977 à 1982 a ensuite connu un ralentissement sensible avec des taux baissant d'un tiers. La vitesse de sédimentation a continué à diminuer lors des périodes suivantes avec $28,88 \times 10^6\text{ m}^3$ avant de connaître sur toutes les périodes qui s'en sont suivies des valeurs inférieures à $5 \times 10^6\text{ m}^3$. Ce réservoir présente donc des rythmes qui se démarquent des précédents avec des taux très forts avant 1985, qui ont fortement diminué par la suite. Toutefois, depuis 2009, on note une reprise de la sédimentation à raison d'environ $4,1 \times 10^6\text{ m}^3\text{ an}^{-1}$ qui témoigne d'une perturbation récente des conditions dans ce bassin.

Chapitre 4 – Analyse de l'évolution de la sédimentation dans les lacs de barrage

Rivières (km)	Barrages Localisation	Surface BV (km ²)	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	Année	Capacité restante (10 ⁶ m ³)	Année	Sédimentation de la période (10 ⁶ m ³)	Sédimentation cumulée (10 ⁶ m ³)	Période		Taux de sédimentation (m ³ /km ² /an)
Solo (540)	Wonogiri (Java-Centre)	1 350	560,00	1980	477,10	1993	82,90	82,90	1980	1993	4 724
					433,00	2005	44,10	127,00	1993	2005	2 722
					391,28	2008	41,72	168,72	2005	2008	10 301
					364,94	2011	26,35	195,07	2008	2011	6 505
Brantas (320)	Lahor (Java-Est)	160	36,10	1977	33,05	1994	3,05	3,05	1977	1994	1 121
					32,43	1995	0,62	3,67	1994	1995	3 875
					31,48	1999	0,95	4,62	1995	1999	1 484
					31,30	2002	0,18	4,80	1999	2002	375
					30,60	2006	0,70	5,50	2002	2006	1 094
					28,32	2009	2,28	7,78	2006	2009	4 750
					29,03	2011	-0,70	7,08	2009	2011	-2 203
Konto	Selorejo (Java-Est)	236	62,30	1971	59,20	1977	3,10	3,10	1971	1977	2 189
					58,13	1982	1,07	4,17	1977	1982	907
					56,64	1988	1,49	5,66	1982	1988	1 052
					48,87	1993	7,77	13,43	1988	1993	6 585
					47,61	1997	1,26	14,69	1993	1997	1 335
					42,70	1999	4,91	19,60	1997	1999	10 403
					44,01	2003	-1,31	18,29	1999	2003	-1 388
					41,69	2007	2,32	20,61	2003	2007	2 458
					39,59	2009	2,10	22,71	2007	2009	4 449
					38,11	2011	1,48	24,19	2009	2011	3 138
Widas	Bening (Java-Est)	89,5	32,90	1981	31,70	1993	1,20	1,20	1981	1993	1 117
					28,74	2004	2,96	4,16	1993	2004	3 007
					25,72	2007	3,02	7,18	2004	2007	11 248
Brantas (320)	Sutami (Java-Est)	2 050	343,00	1972	253	1977	90	90,00	1972	1977	8 780
					221,29	1982	31,71	121,71	1977	1982	3 094
					192,41	1987	28,88	150,59	1982	1987	2 818
					192,39	1989	0,02	150,61	1987	1989	5
					189,97	1992	2,42	153,03	1989	1992	393
					185,27	1994	4,7	157,73	1992	1994	1 146
					184,59	1995	0,68	158,41	1994	1995	332
					183,42	1997	1,17	159,58	1995	1997	285
					180,45	1999	2,97	162,55	1997	1999	724
					176,00	2002	4,45	167,00	1999	2002	724
					174,57	2003	1,43	168,43	2002	2003	698
					174,60	2004	-0,03	168,40	2003	2004	-15
					174,29	2007	0,31	168,71	2004	2007	50
					165,45	2009	8,84	177,55	2007	2009	2 156
157,17	2011	8,283	185,83	2009	2011	2 020					

Chapitre 4 – Analyse de l'évolution de la sédimentation dans les lacs de barrage

Serayu (158)	Mrica (Java- Centre)	1 022	193,50	1 988	190,12	1989	3,38	3,38	1988	1989	3 310
					186,68	1990	3,44	6,82	1989	1990	3 367
					180,66	1991	6,02	12,84	1990	1991	5 889
					176,87	1992	3,78	16,63	1991	1992	3 701
					173,39	1993	3,49	20,11	1992	1993	3 413
					170,00	1994	3,39	23,50	1993	1994	3 314
					164,98	1995	5,02	28,52	1994	1995	4 915
					160,37	1996	4,60	33,13	1995	1996	4 505
					158,20	1997	2,17	35,30	1996	1997	2 128
					152,20	1998	6,00	41,30	1997	1998	5 870
					147,66	1999	4,54	45,84	1998	1999	4 440
					140,63	2000	7,03	52,87	1999	2000	6 876
					137,25	2001	3,38	56,25	2000	2001	3 309
					133,73	2002	3,52	59,77	2001	2002	3 447
					129,30	2003	4,43	64,20	2002	2003	4 335
					126,40	2004	2,90	67,10	2003	2004	2 838
					121,80	2005	4,60	71,70	2004	2005	4 501
					117,90	2006	3,90	75,60	2005	2006	3 816
					114,20	2007	3,70	79,30	2006	2007	3 620
					110,00	2008	4,20	83,50	2007	2008	4 110
105,12	2009	4,88	88,38	2008	2009	4 775					
93,00	2012	12,12	100,50	2009	2012	3 953					
Citarum (269)	Jatiluhur (Java-Ouest)	4 500	3 000,00	1 963	2556,00	1987	444,00	444,00	1963	1987	4 111
					2458,00	1995	98,00	542,00	1987	1995	2 722
					2448,00	2000	10,00	552,00	1995	2000	444
					2178,00	2009	270,00	822,00	2000	2009	6 667

	Catalogue of rivers (Vol.1 & 3) UNESCO
	Institutional Strategies for Improving the Productivity of Agricultural Water Management (p.190)
	Jasa Tirta corporation
	Indonesia Power
	BTP DAS
	Puslitbang Sumber Daya Air

Tableau 23 : Tableau récapitulatif des échosondages effectués dans les différents réservoirs étudiés

2. Les fortes baisses

Pour les réservoirs suivants on observe des rythmes de sédimentation bien plus rapides tout au long de la période étudiée (Tab.24). Ils se différencient de ceux présentés dans la partie précédente par des taux très forts tout au long de leur histoire.

Le barrage de Sengguruh est l'ouvrage le plus en amont sur le cours du Brantas mais aussi le plus récent. Sa mise en service date de 1988 avec une capacité initiale de $21,50 \times 10^6 \text{ m}^3$. Nous disposons à l'heure actuelle de neuf échosondages réalisés par *Jasa Tirta*, dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le dernier échosondage de 2011 annonce une capacité restante de $1,04 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit une perte totale de $20,46 \times 10^6 \text{ m}^3$ (91% de la capacité du réservoir). Nous pouvons observer que la période de perte annuelle moyenne la plus forte correspond à 1988-1993 où la perte a alors atteint $16,14 \times 10^6 \text{ m}^3$. On note un regain $3,19 \times 10^6 \text{ m}^3$ opéré en 1997 alors que les données concernant les opérations de dragage dans ce réservoir ne mentionnent que $250\,000 \text{ m}^3$ de sédiments retirés (Fig.102). En comparant les données avec celles du réservoir de Sutami, il apparaît alors que la mise en service de Sengguruh en amont à la fin des années 80, a permis de réduire fortement le dépôt de sédiments dans le barrage de Sutami, en aval. Au regard de la capacité restante dans le réservoir de Sengguruh, on comprend alors que ses fonctions se soient fortement réduites, bien que la sédimentation reste très faible dans ce réservoir depuis une décennie.

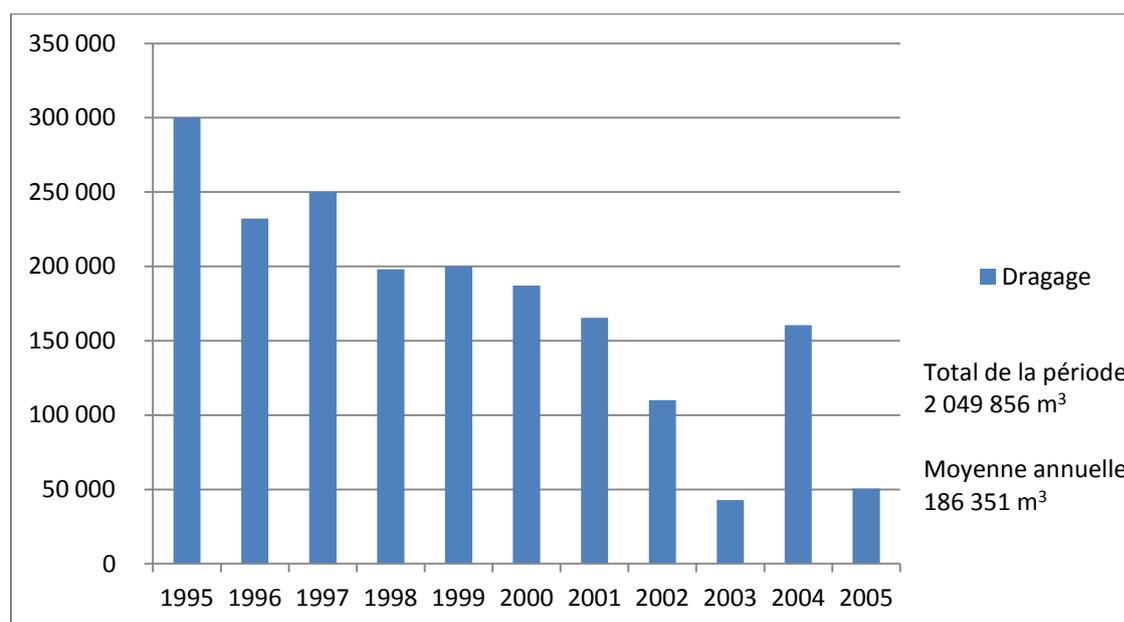


Figure 102 : Extraction des sédiments par dragage dans le barrage de Sengguruh entre 1995 et 2005 (PJT 1)

Le barrage de Wlingi (1977) se situe en aval de l'aire étudiée sur le bassin du Brantas. Nous disposons de 15 échosondages réalisés par *Jasa Tirta* entre 1982 et 2011. La capacité du lac de barrage est passée de $24,10 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 1977 à $4,42 \times 10^6 \text{ m}^3$ en 2011, date du dernier échosondage soit une perte de $19,69 \times 10^6 \text{ m}^3$ sur la période (82% de la capacité du réservoir). Tout comme les autres barrages sur le cours du Brantas, les premières périodes sont celles ayant connu de fortes vitesses de sédimentation. À partir des années 90, les taux ont été bien moins importants puisque le volume du réservoir s'était relativement stabilisé depuis, au prix de nombreuses interventions des responsables de l'ouvrage. Nous pouvons voir, d'après la figure ci-dessous (Fig.103), que de nombreux dragages ont été effectués afin de réduire le volume de sédiments déposé dans le lac de barrage. Il sera essentiel alors de prendre en considération les volumes dégagés (chiffres négatifs signalés dans le tableau) afin de réellement rendre compte des rythmes de sédimentation.

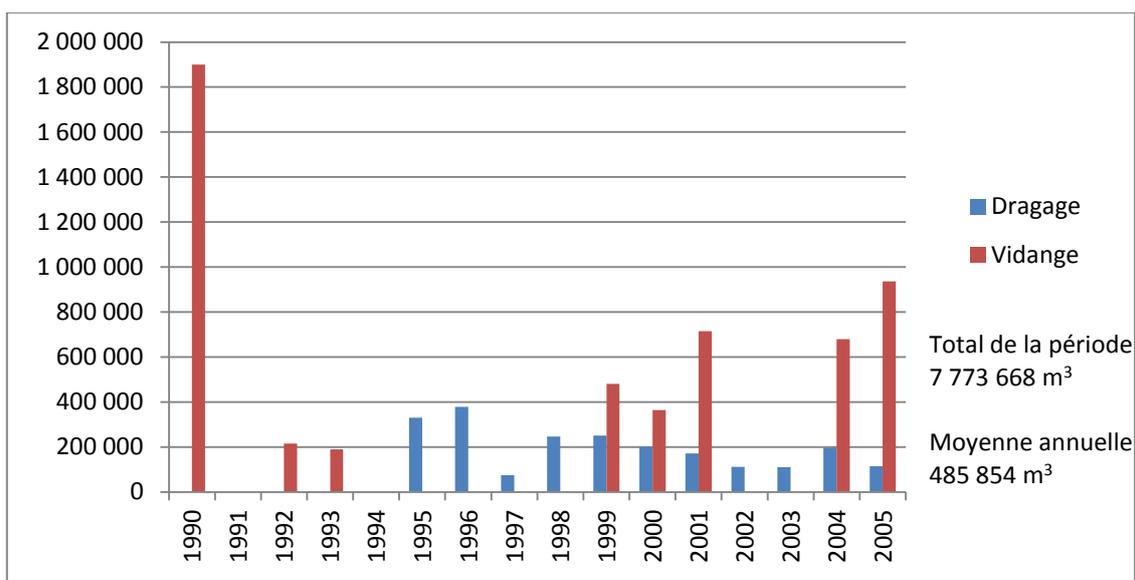


Figure 103 : Extraction des sédiments par vidange et dragage dans le barrage de Wlingi entre 1990 et 2005 (PJT 1)

D'après *Jasa Tirta* les volumes extraits par dragage ou par vidange partielle des réservoirs permettent en moyenne de récupérer entre $100\,000 \text{ m}^3$ et $500\,000 \text{ m}^3$ par an et ainsi entretenir la durée de vie des réservoirs. Relativement efficace pour certains réservoirs de Java-Est, ces mesures restent assez limitées pour les plus gros réservoirs qui accumulent plusieurs millions de mètres cube par an.

Dernier barrage sur le cours du Brantas dans sa partie amont, nous disposons pour Lodoyo de huit suivis sur la période allant de 1990 à 2011, d'une capacité totale de $5,20 \times 10^6 \text{ m}^3$. La perte totale causée par la sédimentation est de $2,56 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit plus de 49%. Les vitesses de sédimentation les plus fortes ont concerné la période comprise entre 1980 et 1996, avec des taux allant de $100\,000 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ à $300\,000 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

Chapitre 4 – Analyse de l'évolution de la sédimentation dans les lacs de barrage

Fleuves (km)	Barrages Localisation	Surface B.V (km ²)	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	Année	Capacité restante (10 ⁶ m ³)	Année	Sédimentation de la période (10 ⁶ m ³)	Sédimentation cumulée (10 ⁶ m ³)	Période		Taux de sédimentation (m ³ /km ² /an)
Brantas (320)	Sengguruh (Java-Est)	1 659	21,50	1988	5,36	1993	16,14	16,14	1988	1993	1 946
					2,16	1996	3,2	19,34	1993	1996	643
					5,35	1997	-3,19	16,15	1996	1997	-1 923
					3,52	2001	1,83	17,98	1997	2001	276
					3,20	2002	0,32	18,30	2001	2002	193
					2,30	2003	0,9	19,20	2002	2003	542
					1,48	2005	0,82	20,02	2003	2005	247
					1,02	2008	0,46	20,48	2005	2008	92
					1,04	2011	-0,023	20,46	2008	2011	-5
Brantas (320)	Wlingi (Java-Est)	2 890	24,10	1977	18,32	1982	5,78	5,78	1977	1982	400
					14,44	1985	3,88	9,66	1982	1985	448
					9,50	1988	4,94	14,60	1985	1988	570
					4,60	1990	4,90	19,50	1988	1990	848
					4,77	1991	-0,17	19,33	1990	1991	-59
					2,51	1992	2,26	21,59	1991	1992	782
					1,98	1993	0,53	22,12	1992	1993	183
					4,94	1995	-2,96	19,16	1993	1995	-512
					5,75	1996	-0,81	18,35	1995	1996	-280
					4,00	2001	1,75	20,10	1996	2001	121
					4,41	2004	-0,41	19,69	2001	2004	-47
					4,54	2007	-0,13	19,56	2004	2007	-15
					4,64	2008	-0,10	19,46	2007	2008	-35
					4,49	2010	0,15	19,61	2008	2010	26
4,42	2011	0,08	19,69	2010	2011	26					
Brantas (320)	Lodoyo (Java-Est)	3 017	5,20	1980	3,69	1990	1,51	1,51	1980	1990	50
					2,84	1993	0,85	2,36	1990	1993	94
					2,35	1996	0,49	2,85	1993	1996	54
					2,60	2003	-0,25	2,60	1996	2003	-12
					2,77	2007	-0,17	2,43	2003	2007	-14
					2,78	2008	-0,01	2,42	2007	2008	-3
					2,66	2010	0,12	2,54	2008	2010	20
					2,64	2011	0,02	2,56	2010	2011	7

	Catalogue of rivers (Vol.1 & 3) UNESCO
	Institutional Strategies for Improving the Productivity of Agricultural Water Management (p.190)
	Jasa Tirta corporation
	Indonesia Power
	BTP DAS
	Puslitbang Sumber Daya Air

Tableau 24 : Tableau récapitulatif des échosondages effectués dans les différents réservoirs étudiés

B. Analyse des rythmes de sédimentation

Pour les réservoirs disposant de données régulières il est possible d'affiner leur description et nous nous attacherons à en discerner les grandes phases sédimentaires. Il s'agit ici de comparer les différentes périodes où nous disposons de données afin de déterminer celles qui ont connu des rythmes anormalement élevés ou à l'inverse anormalement bas, par rapport à la sédimentation moyenne globale du réservoir. Nous en détermineront les causes dans le chapitre suivant. La question se pose alors de savoir si ces différents réservoirs ont ou non connu des rythmes de sédimentation similaires. Un intérêt particulier sera porté sur la période courant de 1990 à nos jours du fait que les barrages étudiés sont depuis lors tous en service.

1. Le réservoir de Mrica à Java-Centre

Si la courbe de la figure 101 montre une baisse assez linéaire de la capacité de stockage, l'étude de la figure 104 met en lumière des vitesses de sédimentation différentes selon les années. Alors qu'une grande partie des données se situent entre $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ et $4 \times 10^6 \text{ m}^3$, on constate des valeurs bien plus faibles en 1997 avec $2,17 \times 10^6 \text{ m}^3$. À l'inverse, 1991 et 1998 présentent des valeurs élevées avec un volume de $6,00 \times 10^6 \text{ m}^3$. La valeur maximale atteinte correspond à l'année 2000 où le volume de sédiments accumulé sur une année atteint les $7 \times 10^6 \text{ m}^3$. L'observation de cette figure affiche de fortes variations d'une année à l'autre qui seront analysées dans le chapitre 5.

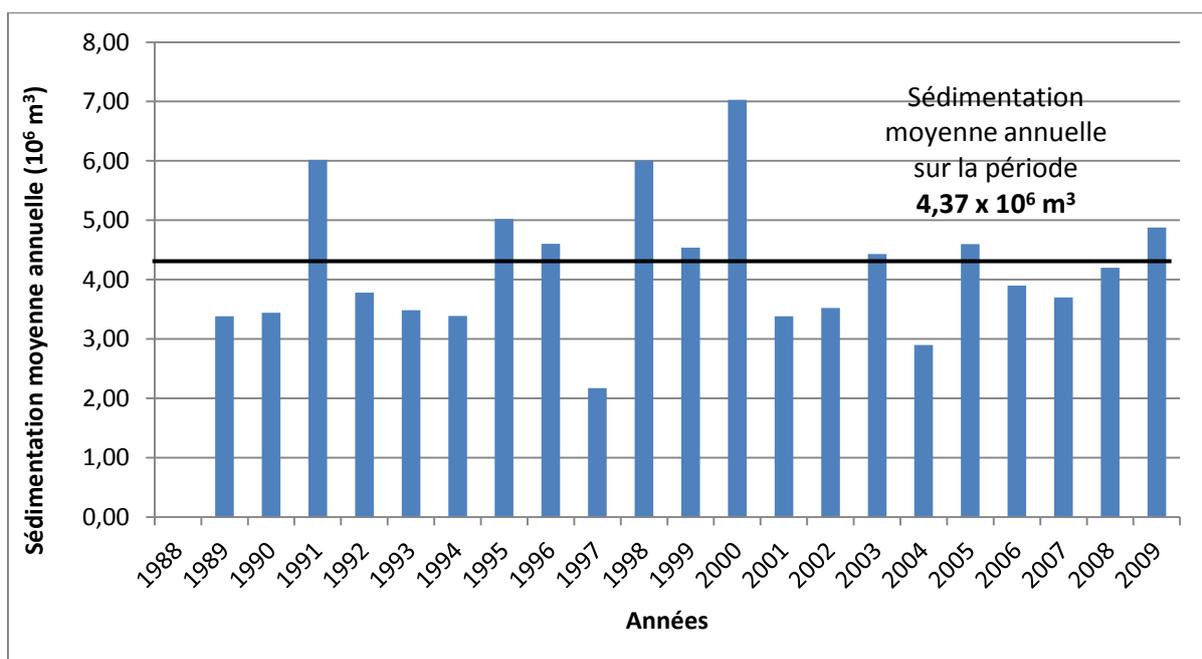


Figure 104 : Taux de sédimentation moyen annuel dans le réservoir de Mrica de sa construction à 2009

2. Le barrage de Jatiluhur à Java-Ouest

Pour la province de Java-Ouest, seul le réservoir de Jatiluhur dispose d'assez d'échosondages pour être représentatif. Les données étant discontinues, un calcul de la valeur moyenne annuelle a été effectué par interpolation pour les années se trouvant entre deux échosondages. Le tableau 25 présente ainsi l'écart à la moyenne annuelle de la sédimentation dans le réservoir pour les différentes périodes. Cela permet de distinguer les périodes ayant connu une activité sédimentaire plus rapide que la normale (en rouge sur le tableau). On constate que la période où les rythmes de sédimentation a été la plus élevée est la dernière entre 2000 et 2009 avec $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ de plus que la moyenne pour ce réservoir. Il est intéressant de s'interroger sur les interactions entre les trois barrages (Cirata et Saguling) pour ainsi voir quels effets ceux de l'amont ont sur celui le plus en aval.

Période	Sédimentation moyenne annuelle de la période ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Écarts à la moyenne
1963-1987	18,5	0,63
1987-1995	12,25	-5,62
1995-2000	2	-15,87
2000-2009	30	12,13

Moyenne = $17,87 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tableau 25 : Écarts à la moyenne de la sédimentation dans le réservoir de Jatiluhur

3. Le réservoir de Selorejo à Java-Est

On peut constater que les volumes de sédiment déposés dans le réservoir de Selorejo ont beaucoup varié durant la période d'étude. Les deux périodes qui correspondent à un rythme fort sont celles de 1988-1993 et de 1997-1999. Cette dernière période de deux ans a connu une nette augmentation de la sédimentation, correspondant aussi à ce qui a été relevé précédemment pour le réservoir de Mrica à Java-Centre. Notons aussi que la période de 2007-2009 a connu, quant à elle, un regain de sédimentation après deux périodes de baisse.

Période	Sédimentation moyenne annuelle de la période ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Écarts à la moyenne
1971-1977	0,517	-0,088
1977-1982	0,214	-0,391
1982-1988	0,248	-0,357
1988-1993	1,554	0,949
1993-1997	0,315	-0,290
1997-1999	2,455	1,850
1999-2003	-0,327	-0,932
2003-2007	0,580	-0,025
2007-2009	1,050	0,445
2009-2011	0,740	0,135

Moyenne = $0,605 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tableau 26 : Écarts à la moyenne de la sédimentation dans le réservoir de Selorejo

4. Le barrage de Wlingi à Java-Est

Pour le barrage de Wlingi on observe que les périodes à fort taux de sédimentation courent du début de son exploitation jusqu'au début des années 90. Les taux n'ont ensuite qu'augmenté pour finalement connaître une baisse importante, démontrant ainsi que des mesures ont été prises pour combattre la sédimentation rapide que connaissait le réservoir. Les deux périodes où les taux de sédimentation sont les plus significatifs sont 1988-1990 et 1991-1992. Comparé aux deux précédents réservoirs (Mrica et Selorejo), les périodes de forte sédimentation ont eu lieu avec une décennie d'avance.

Période	Sédimentation moyenne annuelle de la période (x 10 ⁶ m ³)	Écarts à la moyenne
1977-1982	1,156	0,577
1982-1985	1,293	0,714
1985-1988	1,647	1,068
1988-1990	2,450	1,871
1990-1991	-0,170	-0,749
1991-1992	2,260	1,681
1992-1993	0,530	-0,049
1993-1995	-1,480	-2,059
1995-1996	-0,810	-1,389
1996-2001	0,350	-0,229
2001-2004	-0,137	-0,716
2004-2007	-0,043	-0,622
2007-2008	-0,100	-0,679
2008-2010	0,075	-0,504
2010-2011	0,080	-0,499

Moyenne = 0,579 x 10⁶ m³

Tableau 27 : Écarts à la moyenne de la sédimentation dans le réservoir de Wlingi

5. Le barrage de Sutami à Java-Est

Pour le réservoir de Sutami il s'agit de la même configuration que pour le réservoir de Wlingi, avec des rythmes très élevés lors du début de l'exploitation du réservoir. Cependant la première période a été de loin la plus rapide avec un écart à la moyenne de 10 x 10⁶ m³. Depuis la fin des années 80, toutes les autres périodes présentent des valeurs bien inférieures à la moyenne de l'ordre de 3 x 10⁶ m³ à 5 x 10⁶ m³. Il s'agit alors de comprendre comment les forts taux constatés lors des premières périodes sont venus à décroître fortement par la suite.

Période	Sédimentation moyenne annuelle de la période (x 10 ⁶ m ³)	Écarts à la moyenne
1972-1977	18,000	13,235
1977-1982	6,342	1,577
1982-1987	5,776	1,011
1987-1989	0,010	-4,755
1989-1992	0,807	-3,958
1992-1994	2,350	-2,415
1994-1995	0,680	-4,085
1995-1997	0,585	-4,18
1997-1999	1,485	-3,28
1999-2002	1,483	-3,282
2002-2003	1,430	-3,335
2003-2004	-0,030	-4,795
2004-2007	0,310	-4,455
2007-2009	2,210	-2,555
2009-2011	4,112	-0,653

Moyenne = 4,765 x 10⁶ m³

Tableau 28 : Écarts à la moyenne de la sédimentation dans le réservoir de Sutami

C. Analogies et divergences de la sédimentation des réservoirs javanais

Afin de faire la synthèse des données concernant la sédimentation dans les réservoirs javanais, les figures suivantes en radars reprennent les principaux résultats pour chacun d'entre eux. L'étude portant sur de nombreux barrages, trois figures les présentent par province pour en faciliter la lecture (Fig.105, 106, 107). La partie supérieure de chacune des figures utilise une échelle logarithmique pour les mêmes soucis de représentation vus précédemment et dresse un état de la sédimentation dans les réservoirs. La partie inférieure permet d'établir la qualité et la précision des données en montrant le nombre de données disponibles, ainsi sur quelles périodes ces dernières s'étendent.

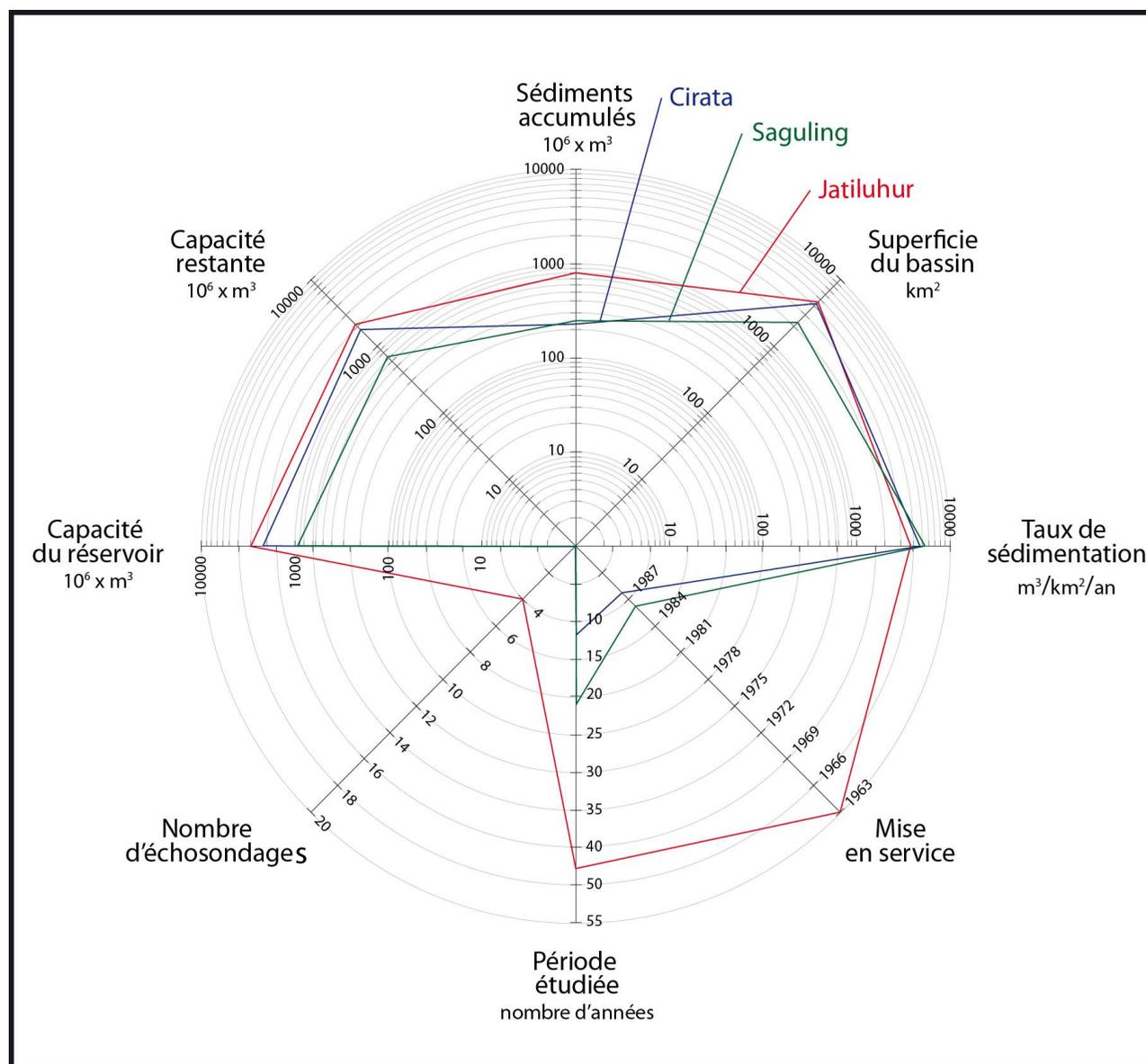


Figure 105 : Synthèse des résultats sur la sédimentation des réservoirs du bassin du Citarum

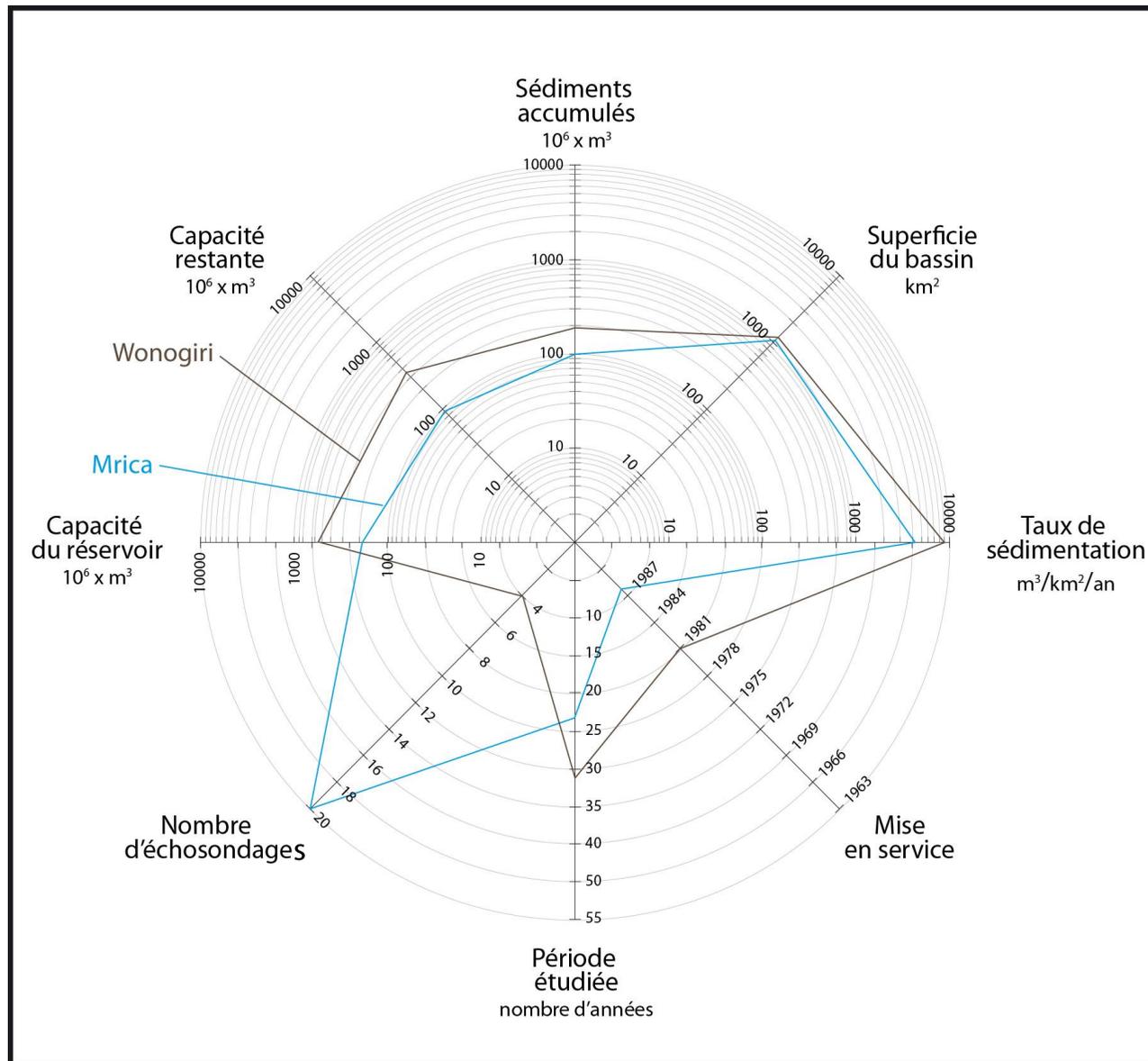


Figure 106 : Synthèse des résultats sur la sédimentation des réservoirs de Java-Centre

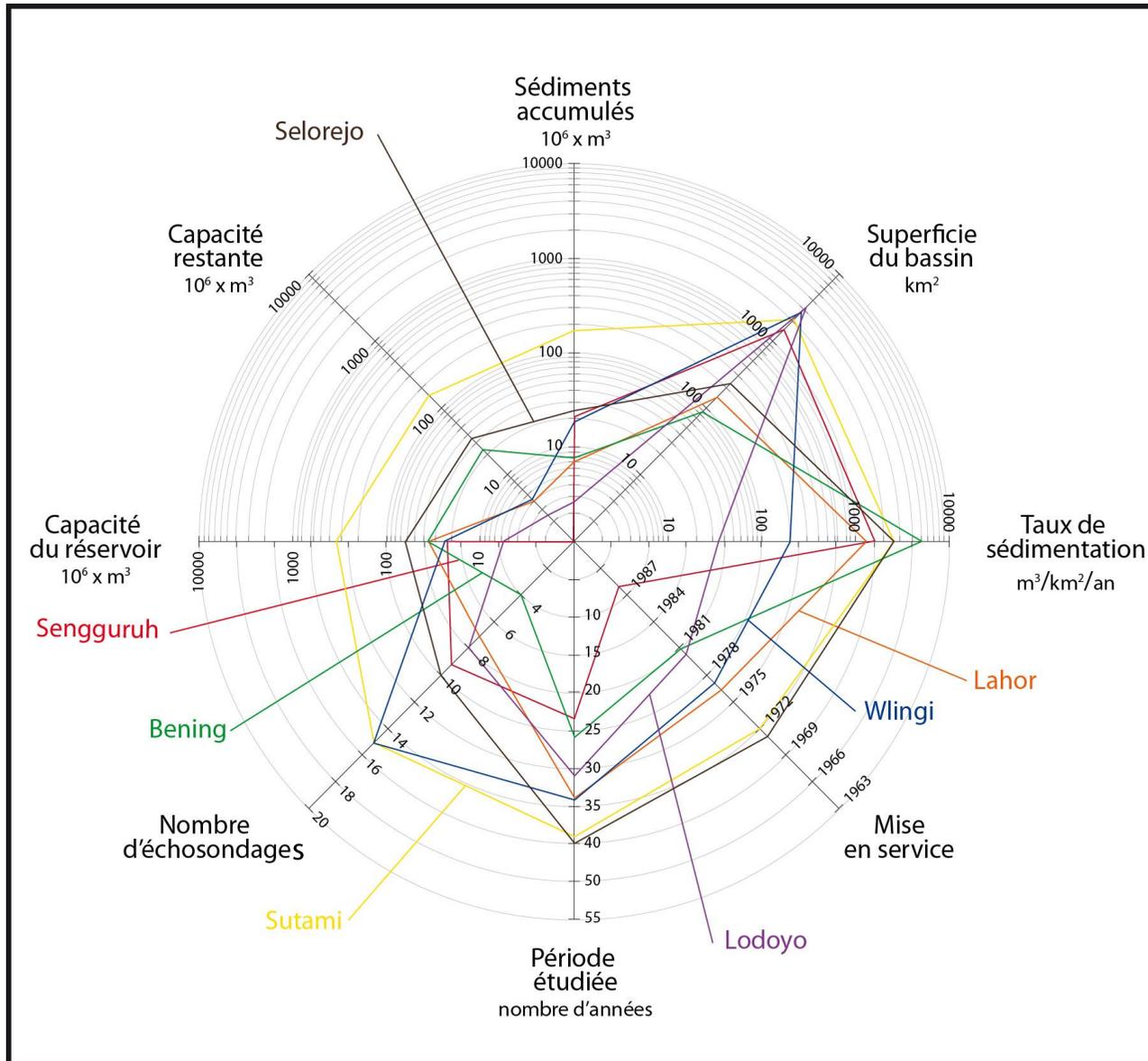


Figure 107 : Synthèse des résultats sur la sédimentation des réservoirs du bassin du Brantas

On peut ainsi noter une gradation décroissante de la taille des réservoirs d'ouest en est sur l'île de Java. Les réservoirs les plus importants en termes de volume ($> 1\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$) se trouvent pour la totalité dans le bassin du Citarum à Java-Ouest. Les deux réservoirs de Mrica et Solo, Java-Centre, ont quant à eux des réservoirs de taille moyenne se situant entre 200 et $700 \times 10^6 \text{ m}^3$. Enfin, les réservoirs du bassin du Brantas à Java-Est ont pour leur part des tailles inférieures à $100 \times 10^6 \text{ m}^3$, hormis celui de Sutami avec $343 \times 10^6 \text{ m}^3$. Il est alors pertinent de s'interroger sur le rôle de la taille de ces réservoirs dans les taux de sédimentation calculés. Celle-ci est-elle définie par des contraintes topographiques ou bien par des considérations d'ordre économique en réponse aux utilisations plus ou moins intensives qui peuvent être faites de ces barrages ? Cependant, on note que la capacité initiale des réservoirs n'est pas nécessairement en lien avec la surface du bassin, comme l'atteste la comparaison entre Jatiluhur ($3\,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour $4\,500 \text{ km}^2$) et Lodoyo ($5,90 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour $3\,017 \text{ km}^2$). De nombreuses configurations sont alors possibles.

Les barrages étudiés ont été construits entre les années 60 et 90 et ne permettent qu'une comparaison entre eux sur les 20 dernières années. Mis à part Jatiluhur à Java-Ouest, on note que les plus anciens barrages se situent dans le bassin du Brantas avec des constructions ayant débuté dans les années 70, alors que les autres barrages n'ont été mis en service qu'une décennie plus tard. Les réservoirs les plus âgés offrent ainsi la possibilité, du fait de leur longévité, d'une analyse plus approfondie de leurs rythmes de sédimentation.

Si une comparaison par durée d'exploitation des barrages est nécessaire dans l'approche de la gestion de cette sédimentation, il en est de même avec la comparaison des volumes déposés. Ainsi, de tels volumes compris entre $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Lodoyo) et $822 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Jatiluhur) démontrent l'importance des sédiments accumulés derrière tous ces ouvrages sur l'île de Java. Afin de comparer ces données, les résultats sont à ramener à la superficie des bassins (pour une meilleure prise en compte des volumes par unités de surface), puis ramener de nouveau à la durée des données disponibles. Les vitesses moyennes de sédimentation obtenues s'échelonnent entre $7 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ (Lodoyo) et plus de $10\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ (Wonogiri) et montrent une fois de plus les variations régionales en termes de production sédimentaire.

Des périodes de plus forte sédimentation ont pu être mises en lumière pour chacun des bassins, avec plus ou moins de précision, en fonction du nombre d'échosondages. Il s'agit alors de montrer quels sont les secteurs les plus touchés et à quelles périodes les taux ont été les plus forts. Les barrages étudiés sont aussi entretenus à intervalles plus ou moins régulier afin de leur permettre de conserver une capacité nécessaire à leur bon fonctionnement. Ces chiffres qui apparaissent en négatif sur les tableaux 23 et 24 montrent que sans ces mesures, les taux de sédimentation relevés pourraient être bien plus élevés.

Les résultats présentés dans ce chapitre rendent compte de la forte dégradation des sols des grands bassins javanais, ainsi que des périodes ayant connu une accélération des phénomènes érosifs, contribuant au remplissage des retenues. La comparaison de ces rythmes entre les différents réservoirs permet de voir que l'île de Java connaît des rythmes de sédimentation très élevés dans son ensemble. La fluctuation de ces rythmes ont été assez similaires dans les différents bassins étudiés sous-entendant une perturbation générale à grande échelle. Il s'agit alors de comprendre ce qui explique ces variations élevées. S'agit-il seulement d'un milieu naturellement favorable à la sédimentation ou l'origine de celle-ci serait anthropique, ou encore serait-ce la conjugaison de ces deux facteurs ? Le chapitre qui suit va ainsi s'attacher à en apporter les éléments de réponse.

CHAPITRE 5 : LES FACTEURS D'ÉVOLUTION DE LA SÉDIMENTATION

L'étude des données concernant l'état de la sédimentation dans les réservoirs javanais a laissé apparaître des rythmes rapides qui ont fortement varié depuis leur mise en service. Ce chapitre propose de comprendre les mécanismes qui contribuent au fort apport en sédiments dans les retenues de barrage. Une première partie décryptera les facteurs morpho-climatiques à Java et montrera en quoi l'environnement javanais facilite le transfert rapide des matériaux mobilisables vers l'aval. Une logique de l'amont vers l'aval permettra d'analyser tout d'abord l'érosion sur les versants avant de nous intéresser au transport des matériaux érodés dans les cours d'eau. Une seconde partie expliquera en quoi l'impact des sociétés participe à l'accélération des processus sur les versants à travers la dégradation des sols ou au contraire à leurs ralentissements par la mise en place de mesures adaptées. La dernière partie s'attachera à montrer les relations existantes entre ces impacts naturels et anthropiques et les taux de sédimentation dans les réservoirs.

I. Les facteurs naturels

Cette partie s'attache à mettre l'accent sur le rôle des conditions naturelles du contexte javanais ainsi que leurs influences sur la sédimentation des réservoirs.

A. Les précipitations, un agent érosif puissant sur les terres volcaniques de Java

L'étude des précipitations permet de rendre compte des secteurs les plus pluvieux de l'île de Java et de mesurer leurs effets sur la sédimentation des réservoirs. Dans un second temps, la pluviométrie des terrains d'étude va être étudiée afin de préciser les conditions climatiques que connaissent chacun des secteurs. Puis nous démonterons comment les anomalies El Niño et La Niña impactent à leur tour les vitesses de sédimentation.

1. Des précipitations élevées

a. Un gradient pluviométrique ouest/est

Les conditions climatiques sur l'île de Java sont un élément majeur de compréhension des perturbations que connaît le milieu. La présentation des terrains d'étude dans le chapitre 2 montre que le régime du climat javanais est de type tropical humide, expliquant les fortes précipitations en saison des pluies. Par ailleurs, le caractère montagneux de l'île a une forte influence sur la pluviométrie. Le relief intensifie l'effet de mousson sur les versants au vent (nord et ouest), mais ses effets sont vivement atténués sur les versants sous le vent (sud et est) ainsi que dans les montagnes enclavées. La topographie extrêmement variée de l'île présente des reliefs étagés et hétérogènes qui influent fortement la distribution régionale des précipitations. La distribution de ces dernières est donc commandée d'une part par la mousson et d'autre part par la topographie (De Boer, 1950). On constate très nettement sur la figure 108 une gradation des cumuls pluviométriques d'ouest en est. En moyenne, les précipitations sont plus élevées à l'ouest, alors qu'en se déplaçant vers l'est celles-ci diminuent notablement avec des écarts d'environ 1 000 mm.

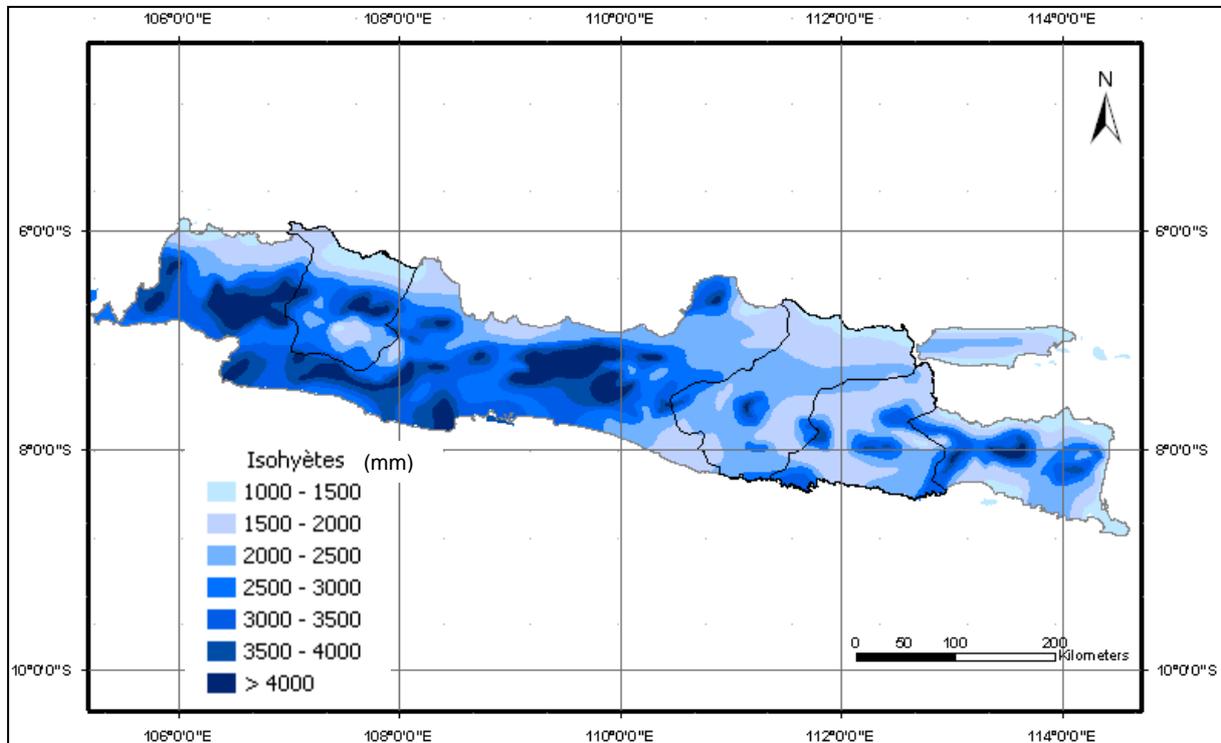


Figure 108 : Précipitations moyennes annuelles en Indonésie (Projet Cilcis, 2007)

Ce gradient ouest/est des précipitations correspond également à celui des capacités des réservoirs. En effet, les plus volumineux d'entre eux (Jatiluhur, Cirata et Saguling) se trouvent dans le secteur le plus arrosé de Java. Ces réservoirs sont aussi ceux qui ont accumulés les plus forts volumes de sédiments.

b. Une pluviométrie variable à l'échelle des bassins

À l'échelle régionale, la pluviométrie se présente de la manière suivante.

Les précipitations moyennes annuelles dans le bassin-versant amont du Citarum (Fig.109) sont d'environ 2 300 mm (Hart, 2002) avec des disparités entre les sous bassins-versants dues à la topographie du secteur. Les nombres de jours pluvieux s'échelonnent entre 108 et 145 jours par an, mais la disparité des totaux pluviométriques étant assez importante, implique de fait que certains sous bassins-versants soient alors plus exposés que d'autres au rôle érosif des pluies (Tab.29). Les maximums pluviométriques se trouvent ainsi au niveau du Mont Gede à l'ouest avec 4 250 mm/an, alors que le bassin de Bandung reçoit annuellement entre 1 250 mm et 1 750 mm de précipitations par an.

Sous bassin-versant	Précipitations (mm/an)	Nombre de jours pluvieux	Intensité (mm/jour)
Citarik	1 911	108	17,1
Cirasea	2 716	143	19,0
Cisangkuy	2 138	142	15,1
Ciminyak	1 562	115	13,6
Cihaur	1 817	134	13,6
Cikapundung	1 920	145	13,3
Ciwidey	2 233	127	17,6

Tableau 29 : Pluviométrie dans le bassin-versant amont du Citarum (Geophysics and Meteorological Agency, 1981)

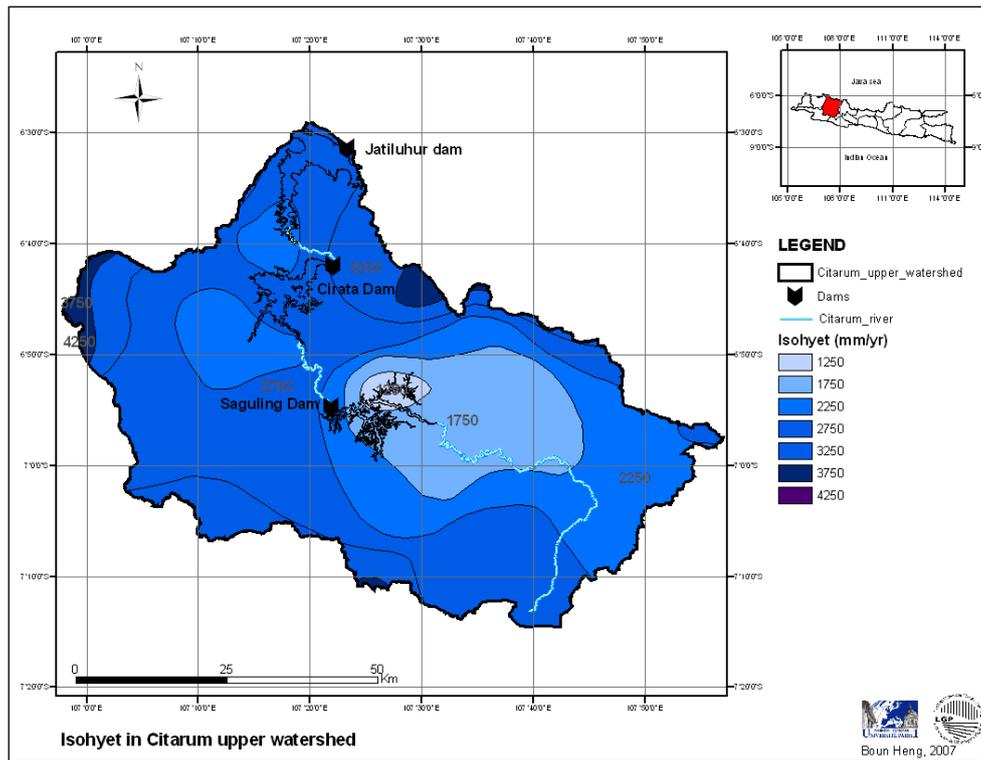


Figure 109 : Carte des isohyètes du bassin-versant amont du Citarum

Les précipitations annuelles moyennes dans le bassin amont du Solo avoisinent les 2 000 mm/an, basées sur les données de 36 stations entre 1975 et 2005. Elles s'échelonnent entre 1 750 mm/an aux abords du réservoir de Wonogiri pour atteindre les 3 250 mm/an au sommet du Mont Lawu (Fig.110).

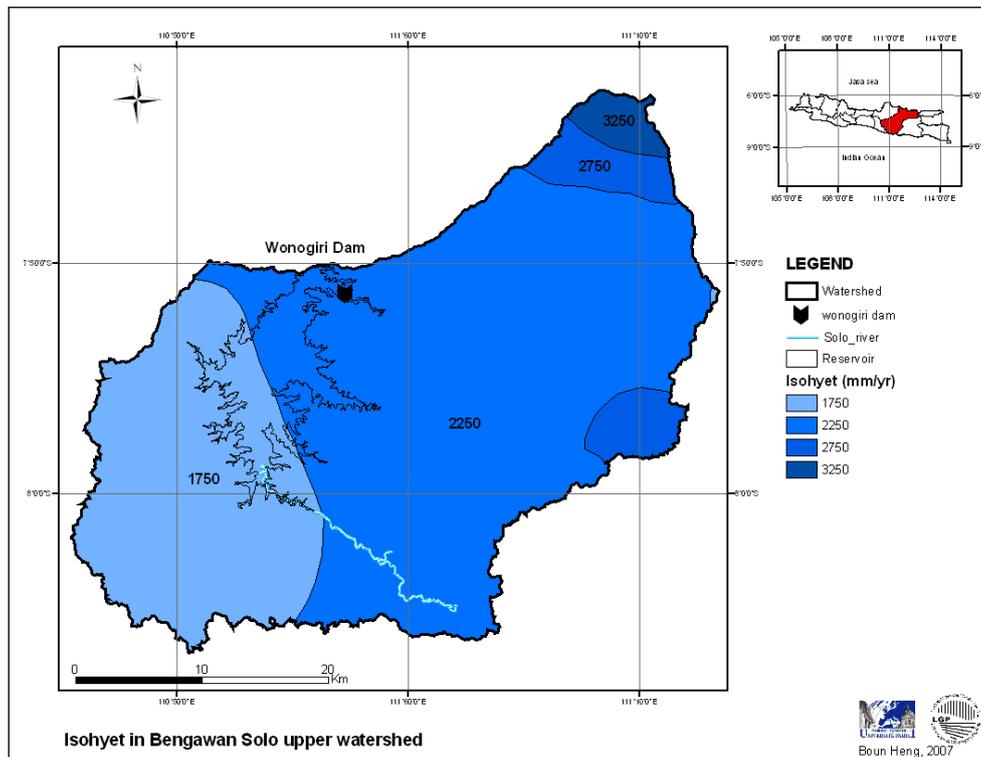


Figure 110 : Carte des isohyètes du bassin-versant amont du Solo

Enfin, concernant le bassin amont du Brantas (Fig.111), la pluviométrie varie entre 3 750 mm/an sur les plus hauts reliefs (Mont Kawi) et 1 250 mm/an dans la plaine fluviale du Brantas.

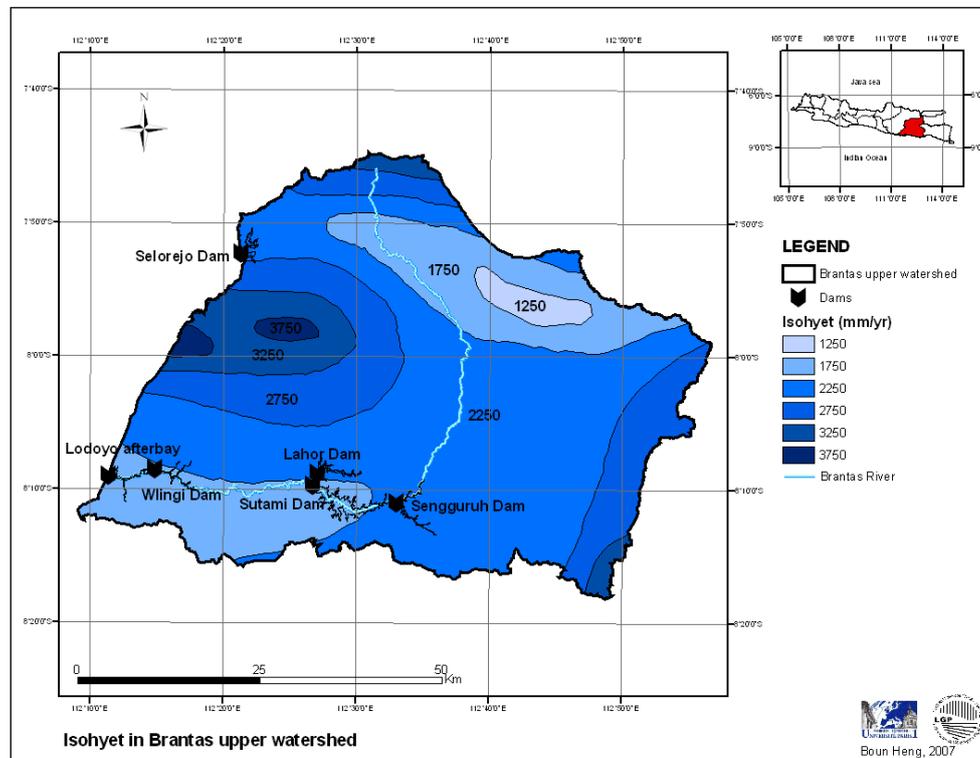


Figure 111 : Carte des isohyètes du bassin-versant amont du Brantas

Ces trois bassins présentent donc des conditions pluviométriques présentant un gradient plus ou moins important selon la présence des zones de reliefs et l'altitude de ces derniers. Pour chacun des bassins, ce sont ainsi les reliefs montagneux (voir chapitre 2 p.69) qui sont les plus arrosés et aussi les plus sujets au rôle érosif des précipitations. Ces matériaux décrochés sur les versants sont ensuite mobilisés par le ruissellement et transportés par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs. Il s'agit alors de comprendre les mécanismes de transport en analysant les débits et leurs relations avec les précipitations.

2. Les anomalies climatiques

Si le climat général de Java, avec ses intenses précipitations en saison des pluies, est le principal facteur de l'ablation des matériaux sur les versants, les cycles El Niño / La Niña, lorsqu'ils se produisent, accentuent aussi de manière sensible ces risques (Fig.112 et 113).

Ces anomalies semblent, d'après le tableau ci-dessous, survenir à des intervalles de plus en plus courts, laissant présager une augmentation de la sédimentation dans les périodes les plus récentes.

El Niño / La Niña 1950-2010					
Année	Classification	Année	Classification	Année	Classification
1950-1951	La Niña	1970-1971	La Niña	1990-1991	El Niño
1951-1952	Neutre	1971-1972	Neutre	1991-1992	El Niño
1952-1953	El Niño	1972-1973	El Niño	1992-1993	El Niño
1953-1954	Neutre	1973-1974	La Niña	1993-1994	Neutre
1954-1955	La Niña	1974-1975	La Niña	1994-1995	El Niño
1955-1956	La Niña	1975-1976	La Niña	1995-1996	La Niña
1956-1957	Neutre	1976-1977	El Niño	1996-1997	Neutre
1957-1958	El Niño	1977-1978	El Niño	1997-1998	El Niño
1958-1959	Neutre	1978-1979	Neutre	1998-1999	La Niña
1959-1960	Neutre	1979-1980	El Niño	1999-2000	La Niña
1960-1961	Neutre	1980-1981	Neutre	2000-2001	Neutre
1961-1962	Neutre	1981-1982	Neutre	2001-2002	Neutre
1962-1963	Neutre	1982-1983	El Niño	2002-2003	El Niño
1963-1964	El Niño	1983-1984	La Niña	2003-2004	Neutre
1964-1965	La Niña	1984-1985	La Niña	2004-2005	Neutre
1965-1966	El Niño	1985-1986	Neutre	2005-2006	Neutre
1966-1967	Neutre	1986-1987	El Niño	2006-2007	El Niño
1967-1968	Neutre	1987-1988	El Niño	2007-2008	La Niña
1968-1969	El Niño	1988-1989	La Niña	2008-2009	Neutre
1969-1970	El Niño	1989-1990	Neutre	2009-2010	El Niño

La Niña	fort	El Niño
La Niña	modéré	El Niño
La Niña	faible	El Niño

Figure 112 : Années El Niño et La Niña de 1950 à 2010 (Environnement Canada)

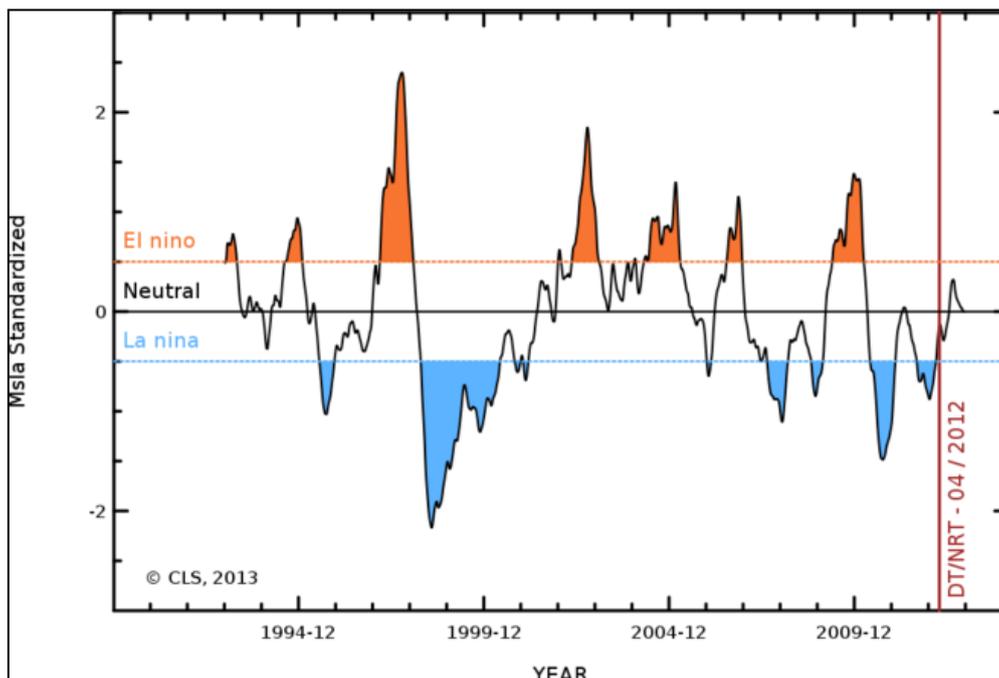


Figure 113 : Anomalies de hauteur de mer normalisées entre 1990 et 2012 (Aviso, 2012)

a. Les épisodes El Niño qui embrasent Java

Lors des périodes où le phénomène El Niño se produit, l'Indonésie connaît des précipitations moins soutenues en comparaison à une situation normale. Cette faible pluviométrie entraîne alors des périodes de sécheresse plus ou moins graves selon l'intensité du phénomène, à l'origine d'incendies. Ces incendies laissent les sols à nu, alors plus vulnérables à l'érosion. Ces pertes de sols se répercuteront et contribueront directement aux taux de sédimentation observés dans les réservoirs. Nous pouvons ainsi le remarquer sur la figure 114 ci-dessous lors de l'épisode El Niño de 2002, où de nombreux incendies ont touché l'est de Java.

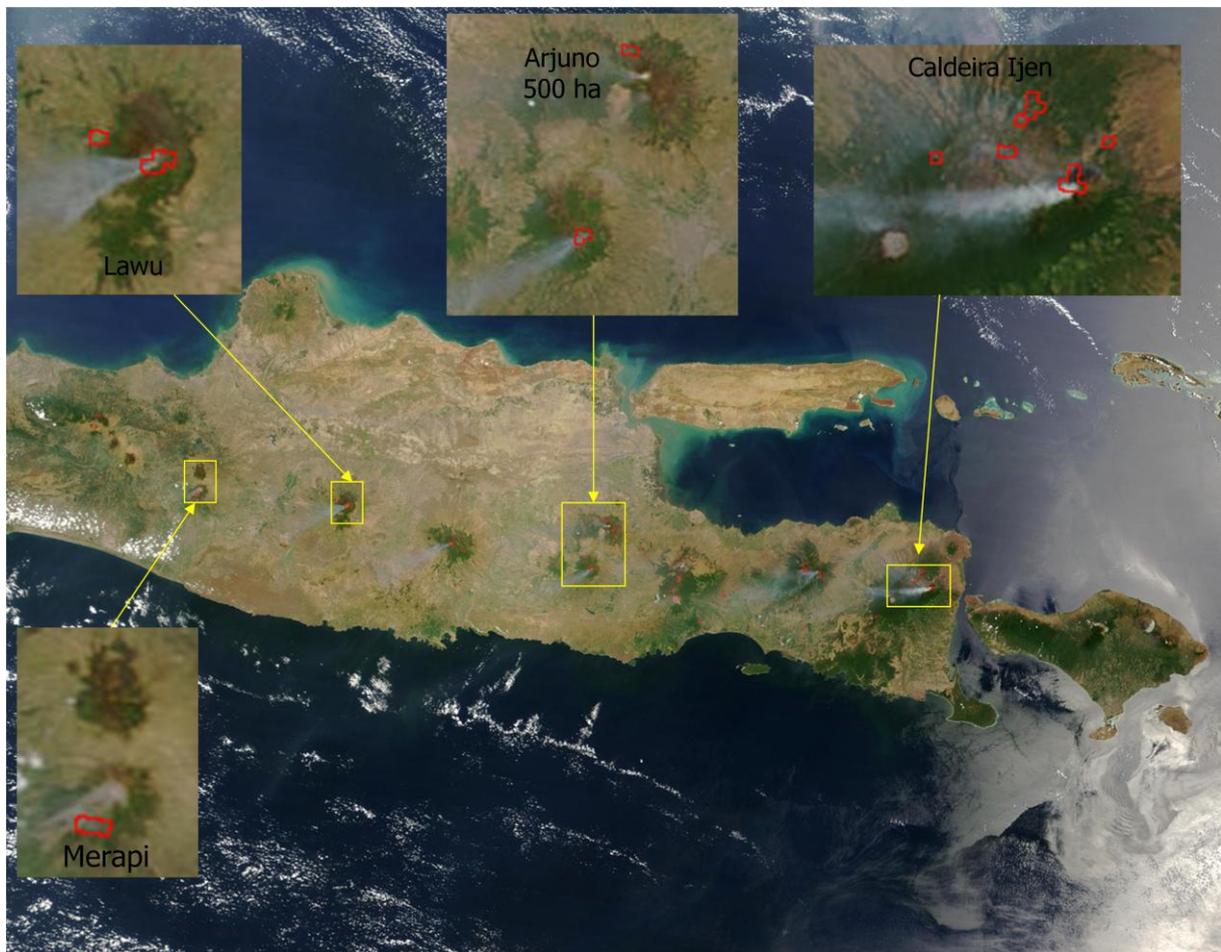


Figure 114 : Incendies de forêts à Java en octobre 2002 (image MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - <http://modis.gsfc.nasa.gov>)

Les incendies sont matérialisés par des points rouges sur l'image et les surfaces vertes représentent les espaces boisés, situés pour la plupart sur les pentes des volcans actifs.

Selon les spécialistes, le phénomène El Niño semble être réapparu en 2012 avec pour conséquence une forte sécheresse sur l'île de Java. On lui attribue aussi en octobre – mois qui marque l'entrée dans la saison des pluies en Indonésie en période normale – la disparition de 800 ha de forêts dans le parc forestier de Malang-Pasuruan en plein cœur du bassin du Brantas à Java-Est et 500 ha de détruits du fait des incendies sur les pentes du Mont Lawu à Java-Centre (Jakarta Globe, 2012). La figure 115 illustre parfaitement l'impact que peut avoir le phénomène sur la sédimentation des réservoirs, avec une baisse sensible des taux de sédimentation lors d'une année El Niño et parfois une augmentation l'année suivante (cf. Selorejo) en raison de la fragilisation des sols suite à un incendie.

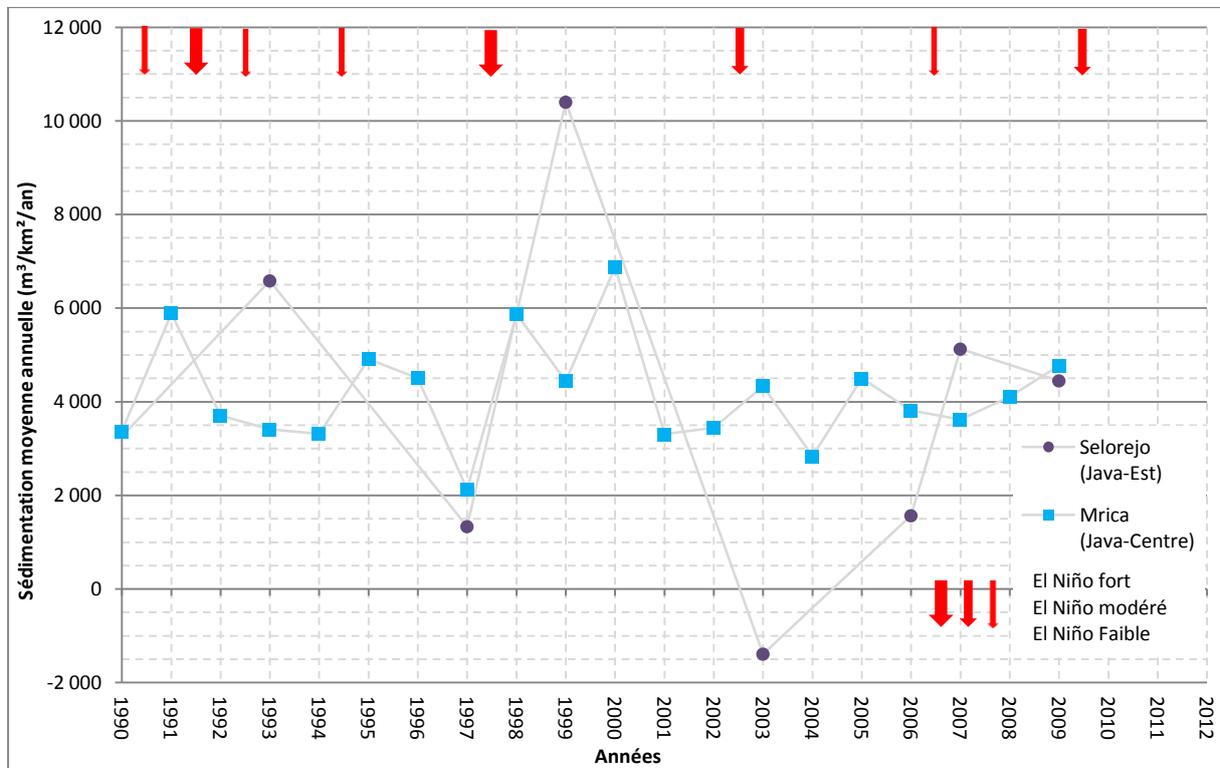


Figure 115 : Impact d'El Niño sur les taux de sédimentation

b. La Niña une perturbation favorisant glissements de terrain et crues

Lorsqu'un évènement La Niña se déclenche, l'île de Java connaît en revanche un climat bien plus humide avec de plus fortes précipitations entraînant une accélération du transfert sédimentaire. On note alors que les ruissellements deviennent plus forts sur les versants, entraînant un nombre croissant d'inondations et de crues, de plus forte intensité. Ces inondations constituent l'impact le plus significatif sur les processus de sédimentation, transportant 90% des sédiments dans les régions humides et semi humides (ICOLD, 1990).

L'écoulement, sa vitesse et la capacité de transport augmentent alors tous les trois lors de ces épisodes. Ces événements hydrologiques extrêmes peuvent transporter, à eux seuls, toute la matière érodée d'un bassin dans un fleuve. Cet effet de « nettoyage » par lequel le matériel est enlevé, est alors responsable du taux élevé de sédiment en transport pendant une inondation (Beyer-Portner, 1998). Ainsi, les phénomènes hydrologiques contribuent considérablement à la sédimentation, et plus particulièrement encore lors d'inondations extrêmes (Fig.116).

En 2007, le bassin du Solo a déploré une centaine de victimes principalement due aux glissements de terrain causés par les fortes précipitations atteignant 124 à 141 mm/jour. Ces crues d'une période de retour de 30 à 50 ans ont alors pris en défaut les infrastructures de protection qui étaient seulement dimensionnées pour des évènements avec une période de retour de 5 à 10 ans. Dans le bassin du Brantas la station pluviométrique de Dampi a enregistré un cumul de précipitations de 578 mm en 23 heures, causant une augmentation du niveau d'eau de près de 8 mètres dans le réservoir de Sutami (Hidayat, 2009). Ces évènements montrent l'importance des réservoirs dans le dispositif de protection des crues. Chargés d'accueillir le surplus d'eau engendré par les inondations, on comprend alors que la sauvegarde de leur capacité est indispensable dans l'atténuation des phénomènes climatiques extrêmes.

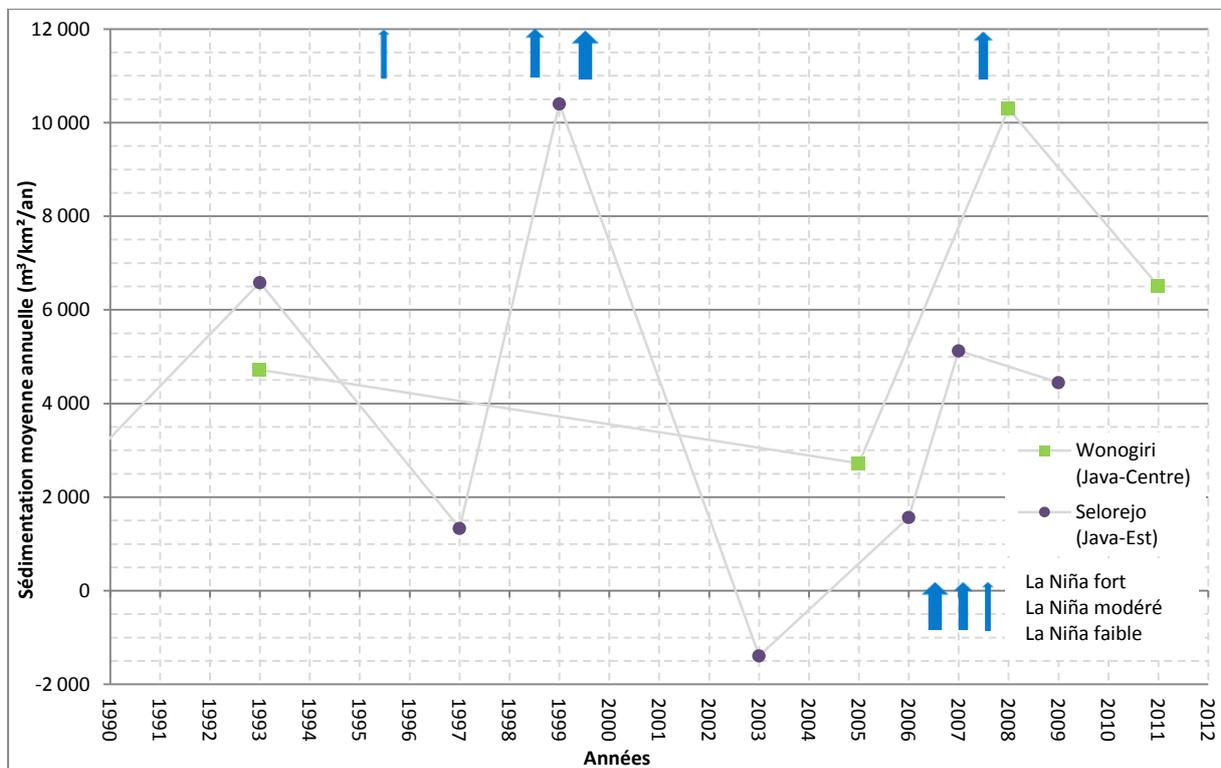


Figure 116 : Impact de La Niña sur les taux de sédimentation

Nous avons vu que la production sédimentaire est grandement influencée par la présence des deux phénomènes, El Niño et La Niña. Le rôle des réservoirs devient alors, plus qu'à l'accoutumée, primordial afin de tenter de gérer au mieux le déficit d'eau en période de Niño et d'en contrôler le surplus en période de Niña. Une forte sédimentation handicape ainsi sérieusement ces réservoirs à assumer leurs fonctions.

Les impacts sont encore plus forts lorsqu'un évènement de Niña vient à succéder à une période de Niño. Les versants touchés par la sécheresse et mis à nu par les incendies vont être brutalement lessivés par d'intenses précipitations, donnant lieu à un envasement accéléré des réservoirs. Par exemple, la grande sécheresse de 1997 liée au Niño (Fig.115) a provoqué de gigantesques incendies de forêt et ruiné les récoltes. L'épisode La Niña qui l'a suivi en 1998 et 1999 (Fig.116), a fourni de très fortes pluies sur ces mêmes zones mises à nu, entraînant crues et inondations, glissements de terrain et coulées de boue. Les ressources de nourriture du pays ont alors été détruites, nécessitant une importation de riz afin d'éviter une famine, tout ceci dans un contexte de crise économique qui entrainera peu après la chute du Général Suharto (*Reformasi*).

Si les conditions tropicales humides de Java sont naturellement favorables à la dégradation des sols volcaniques de l'île, les oscillations répétées d'El Niño et de La Niña ne viennent qu'amplifier les processus qui mènent à l'accélération de l'érosion des sols et par conséquent à la sédimentation dans les réservoirs.

B. Une forte érosion des sols

Les fortes précipitations à Java vont déclencher sur les versants l'ablation de matériel qui va être déplacé vers les thalwegs par ruissellement. Les multiples traces de l'érosion sur les versants marquent nettement le paysage javanais et montrent l'intensité du phénomène. Des études se sont intéressées à ce phénomène. Les résultats seront présentés ci-dessous. Une seconde partie dressera les questionnements – toujours d'actualité – concernant la recherche sur l'érosion des sols et la quantification du phénomène à Java.

1. Les empreintes de l'érosion sur les versants

L'érosion sur les versants javanais se manifeste sous de multiples formes dont les trois principales vont être présentées ci-dessous.

- L'érosion par affaissement de terrasses

Il est important de différencier les terres irriguées des terres non irriguées. En effet, l'érosion est beaucoup plus forte sur ces dernières, celles-ci se situant le plus souvent en haut de versant où l'irrigation est rendue impossible du fait de fortes pentes. Ces terrasses, de manière générale, se dégradent plus rapidement lors de fortes précipitations, la faible couverture de ces terrains engendrant une érosion pluviale plus rapide. Le ruissellement, aidé par les fortes pentes, emportera à son tour les matériaux plus rapidement vers l'aval (Fig. 117).



Figure 117 : Évolution de la dégradation des terres de cultures non irriguées Desa Ngebrong, Java-Est
Ce terrain fraîchement défriché montre des terrasses encore bien formées (A). Après un certain temps, les précipitations « lissent » le terrain, faisant disparaître les contre-pentes constituées (B).

- Les glissements de terrain

Java présente un cadre naturel propice aux glissements de terrain. Entre 1981 et 2007, plus de 1 300 mouvements de versant ont été recensés à Java. La récurrence et les impacts des mouvements de versant à Java tendent à augmenter d'année en année en raison d'un cumul des facteurs morphostructuraux, hydroclimatiques et anthropiques (Hadmoko, 2009).



Figure 118 : Glissements de terrain au-dessus du Sabo dam de Tokol, Java-Est

Les glissements, selon leur ampleur, apportent une grande quantité de sols venant alimenter les cours d'eau en matières solides et ainsi accélérer le comblement des réservoirs.

- Le ravinement

La concentration des matériaux érodés sur les versants va alors augmenter la capacité érosive du ruissellement et ainsi former des ravines (Fig.119).



Figure 119 : Ravinement des canaux d'irrigation, Desa Wiyurejo, Java-Est

2. Des taux d'érosion sur les versants très élevés

Ayant très tôt compris l'enjeu économique de la conservation des sols, de nombreuses études ont tenté de quantifier la perte de terres sur les versants. A l'heure actuelle, la bibliographie notifie divers travaux concernant l'érosion des sols à Java, réalisés selon plusieurs méthodes dont voici un aperçu. Les deux principales sont particulièrement mises en évidence (Tab. 30).

Des données provenant de plusieurs stations expérimentales de mesure de l'érosion signalent des taux de 50 à 60 t/ha/an dans les plantations de tabac sur les pentes des volcans Sindoro et Sumbing. Les taux atteignent 400 t/ha/an dans les champs de pomme de terre sur le plateau de Dieng (Guyomarc'h, 2003). En 2002, les taux d'érosion calculés ont été compris entre 4,2 mm/an dans le bassin-versant amont du Serayu, et 13,7 mm/an dans le bassin-versant amont du Merawu, alors que ces taux n'avaient jamais excédé 2 mm/an durant les années 90 (*Balai Rehabilitasi Lahan Konservasi dan Tanah Opak-Oyo-Serayu*, comm. orale, 2002).

Avec les précautions nécessaires concernant les méthodologies utilisées (cf. chapitre 2), nous voyons que les taux d'érosion à Java sont extrêmement élevés et figurent parmi les plus forts taux au monde (Morgan, 1995) et viennent corroborer les forts taux de sédimentation observés dans le chapitre 4.

B.V	Méthodes	Erosion (t/ha/an)	Temps ou année d'observation	Source
Darmaga Java-Ouest	USLE	81 - 385	4 ans	Kurnia 1986
Citayam Java-Ouest		440 - 532	3 ans	
Tanjungharjo Yogyakarta		133 - 249	3 ans	
Jegu Java-Est		152 - 285	2 ans	
Citanduy Java-Ouest		168	1989	Hammer 1989
Citayam Java-Ouest		500	1981	Suwardjo 1981
Citayam Java-Ouest		157	1979	Sofijah 1979
Kokap Java-Centre		30 - 110	1991	Worosuprojo 1992
Kokap Java-Centre	Erosion plot	10 - 108	1991	Worosuprojo 1992
Slamet Java-Centre		5,3	1949	Van Dijk et Ehrencron 1949
Slamet Java-Centre		66	1949	Van Dijk et Ehrencron 1949
Kali Konto Java-Est		5 - 25	1991	Rijsdijk et Bruijnzeel 1990, 1991
Bojonegoro Java-Est		34	1995	Purwanto 1995
Gunung Kidul Yogyakarta	NBEP	28 - 87	1996	Bruijnzeel et Critchley 1996
Cikumutuk Java-Ouest		110 - 242	1998	Purwanto 1998
Cikumutuk Java-Ouest		96 - 174	1998	
Citarik Java-Ouest	AGNPS	95 - 103	1997	Kusumandari 1997

Tableau 30 : Taux d'érosion et méthodes utilisées à Java

3. Des éléments qui restent à quantifier

Les travaux sur l'érosion des sols suscitent encore des interrogations à l'heure actuelle. Pour exemple, les routes sont largement perçues comme étant une source importante de sédiments dans les montagnes tropicales (Henderson et Witthawatchutikul, 1984 ; Ziegler et Giambelluca, 1997), mais les mesures concernant leurs effets morphologiques sont rares en

Indonésie (Ruslan et Manan, 1980; Rijdsdijk, et al, 1990). D'une manière générale, à une ou deux exceptions près (kali Konto, Java-Est ; Rijdsdijk et Bruijnzeel, 1990, 1991), la vision quantitative sur les sources principales de sédiments dans les bassins-versants de montagne à Java n'est simplement pas connue. En l'occurrence, les observations complètes concernant l'érosion et la sédimentation sont rares pour Java et les secteurs environnants (Rijdsdijk et Bruijnzeel, 1990, 1991 ; Agus, et al. 1998).

Malgré l'abondance relative des travaux effectués dans le domaine, leur interprétation reste souvent délicate du fait de la persistance de plusieurs problèmes à Java. Une grande partie des recherches tentant de quantifier l'érosion des sols a été effectuée principalement par des chercheurs étrangers, alors que les efforts locaux se sont principalement concentrés sur les problèmes de conservation des sols, dans lesquels la nature des recherches expérimentales est généralement redondante (Carson, 1989).

Les principaux problèmes identifiés dans cette recherche (locale) sont dus :

- à la faiblesse des efforts de recherche,
- à la dispersion de la responsabilité des recherches à travers de nombreuses agences,
- à une approche conventionnelle et fragmentée sur les recherches de conservation des sols,
- au peu d'informations sur l'exécution et les résultats des expériences effectuées (échecs comme succès) communiquées aux décideurs et aux planificateurs,
- et enfin à la disponibilité limitée de chercheurs et de techniciens compétents (*World Bank*, 1993).

L'examen des projets de conservation des sols et des études de cas de bassins-versants, y compris des études commissionnées par le gouvernement indonésien, montre trois faiblesses (Harry Santoso, 1992) :

- l'utilisation d'une technologie peu adaptée et peu viable,
- un manque de planification coordonnée et de participation suffisante des fermiers locaux,
- et un manque de recherches sur les systèmes de cultures concernant la technologie de conservation des sols.

Aussi, l'évaluation des impacts des mesures de conservation des sols en Indonésie est tout à fait discutable. En effet, les données d'érosion des sols – antérieures à la mise en place des mesures de conservation – sont quasiment inexistantes. Sans l'apport majeur de ces données, il est alors difficile d'apporter une analyse quantitative sur les impacts des mesures de conservation. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit de comprendre les contributions relatives aux sédiments des différentes sources (anthropiques ou géologiques).

Un exemple pertinent concerne le phénomène *du ngaguguntur* (recul accéléré des versants) (Fig.120). Depuis des décennies, du fait de la pression démographique, l'extension des terres arables s'est faite des basses terres vers les hautes terres, demandant une adaptation des modes de mise en valeur des sols, notamment pour la riziculture. En effet, environ un million d'hectares de rizières se situent dans les hautes terres avec des pentes supérieures à 30%. Les agriculteurs indonésiens ont donc modifié la pente naturelle des versants afin d'y installer leurs cultures mais sans adopter de réelles mesures de stabilisation de ces versants. Les vallées ont été tronquées sur des dizaines de mètres de profondeur afin d'en élargir le fond pour y installer les cultures. Il en résulte alors une augmentation des risques de glissements de terrain. Une étude sur les hautes terres du Cimuntur (Java-Ouest) – où plusieurs élargissements du fond de vallée ont été réalisés – montre une érosion correspondant à une perte de sols de seulement 1,3 mm/ha/an alors que la charge sédimentaire du cours d'eau était estimée à 31 mm/ha/an. Bien que cette méthode soit pratiquée partout dans les secteurs montagneux de Java, les effets *du ngaguguntur* sur la charge sédimentaire n'ont jamais été mesurés (Diemont, et al. 1991).

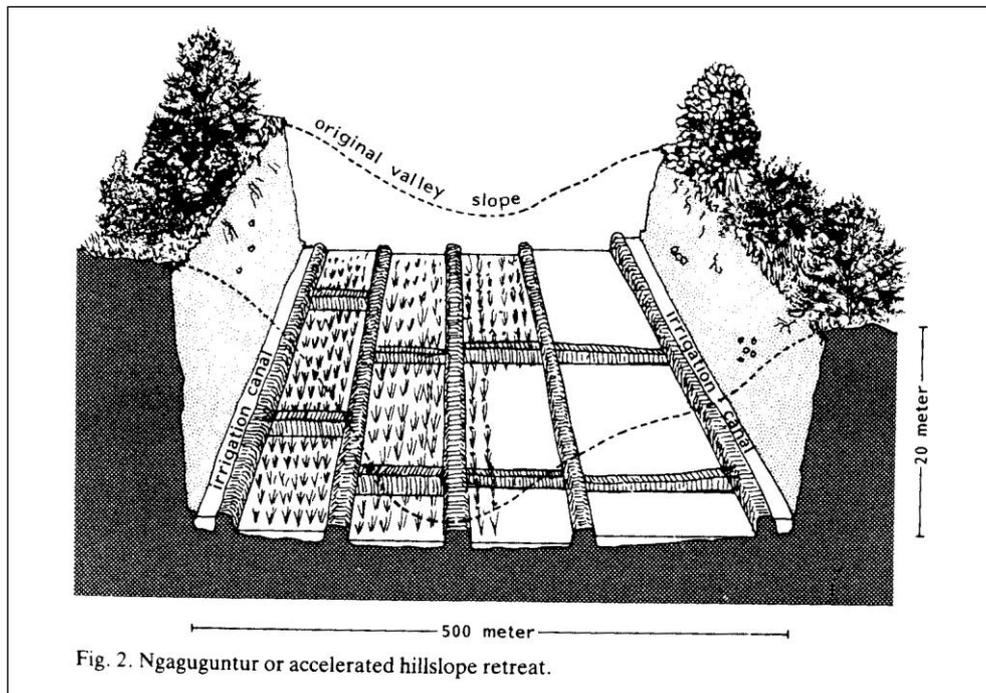


Figure 120 : Les « Ngaguguntur »

Une exploitation typiquement javanaise du sol en faveur de la riziculture qui accélère le recul des versants (Diemont, 1991).

La recherche sur l'érosion et la conservation des sols à Java a débuté dans les années 1920 par le service des forêts hollandais (*Dienst van het Boschwezen*). Ce service a alors entrepris, sur le long terme, des recherches concernant l'influence des forêts sur le système hydrologique, la conservation et l'érosion des sols. L'influence protectrice des forêts, en ce qui concerne le transport de l'eau et du sol, a été comparée à celles d'autres couvertures de végétation pour des lithologies et types de sol différents, et ce sous diverses conditions climatologiques. Les résultats de ces études ont été majoritairement publiés dans *Tectona* (Van der Linden, 1978).

Plusieurs études classiques de l'époque coloniale (Rutten, 1917; Japing, 1931 ; Coster, 1938 ; Gonggrijp, 1941 ; Van Dijk et Vogelzang, 1948 ; Van Dijk et Ehrencron, 1949 ; Bakker, 1956) sont longtemps restées la source principale d'information sur l'érosion à Java. Pour preuve, certains des travaux de Coster datant de 1938 ont été repris dans une étude un peu plus détaillée, réalisée par Wiersum en 1985, présentant sensiblement les mêmes résultats.

La compréhension des processus d'érosion et de sédimentation n'a vraiment débuté que dans les années 1970 par la mise en place de programmes de conservation dans certains grands bassins-versants à risque. Ces nombreuses études avaient pour but de tenter de

quantifier l'érosion des sols afin de mieux cerner l'ampleur du phénomène (Abidin, 1976; Faber, 1975 ; McComb, 1971 ; SMEC, 1974 ; Soemarwoto, 1974).

Depuis ces 20 dernières années, un éventail d'organismes gouvernementaux ainsi que des universités locales et étrangères se sont engagés dans la recherche sur l'érosion des sols, la production de sédiments des bassins-versants et la conservation des sols à Java mais les travaux doivent être encore affinés (Tab. 31).

Bogor :	Centre de recherche des sols et d'agroclimatologie Agence pour la recherche et le développement agricoles (CIRAD) Département pour la recherche et le développement sylvicole (CIFOR) Département des sols de l'institut agricole (IPB)
Bandung :	Agence pour la recherche et le développement sur l'eau (<i>Puslitbang sumber daya air</i>) Université d'agriculture et l'institut d'écologie de l'université de Padjadjaran (UNPAD)
Yogyakarta :	Faculté de géographie et de la technologie agricole de l'Université Gadjah Mada (UGM)

Tableau 31 : Organismes indonésiens engagés dans la recherche sur l'érosion des sols (Purwanto, 1998)

Ces travaux sur l'érosion des sols démontrent très bien que les taux sont très élevés, même si ceux-ci restent encore à préciser. Ces fortes valeurs étaient déjà présentes bien avant la construction des premiers barrages. Il est donc naturel d'observer aujourd'hui de forts taux de sédimentation dans les réservoirs.

C. Le transport des sédiments fluviatiles

Après avoir observé les très forts taux d'érosion à Java, il est désormais nécessaire d'observer la manière dont s'opère le transport dans le bassin-versant. L'étude des cours d'eau s'avère ainsi nécessaire, ceux-ci étant les principaux agents de transport des matériaux solides entre l'amont et l'aval. Une approche sur le long terme va permettre de voir comment les débits des cours d'eau ont évolué ces dernières décennies. Puis nous nous intéresserons de plus près aux crues, fréquentes en saison des pluies. Ces événements extrêmes sont importants à appréhender car une plus grande quantité de charge solide est transportée à ces occasions. Les cours d'eau plus fortement chargés vont alors augmenter leur pouvoir érosif et ainsi modifier le lit dans lequel ils s'inscrivent.

1. Analyse pluri-décennale

En étudiant la variation des précipitations et des débits sur plusieurs décennies, il est possible de noter si des changements ont eu lieu dans les débits observés par rapport aux fluctuations de la pluviométrie et d'ainsi dégager des tendances sur l'état des versants. En effet, des débits qui augmenteraient à pluviométrie constante seraient le signe d'une accélération du transfert liquide dans le bassin, certainement causés par des versants moins bien protégés.

Les figures 121, 122 et 124 mettent en rapport la fluctuation mensuelle des débits et les précipitations annuelles pour les bassins du Brantas, de Wonogiri et du Citarum. Afin d'en faciliter la lecture, chacune des figures est en corrélation avec la moyenne des années connaissant des valeurs supérieures ou inférieures à celle-ci. Les axes ont été construits de manière à ce que la moyenne des débits soit au même niveau que celle des précipitations. Il est alors possible d'observer pour une année très pluvieuse la réaction des débits sur la même période. Ayant montré l'importance des cycles El Niño et La Niña sur la pluviométrie, ces derniers sont signalés par des flèches plus ou moins épaisses selon l'importance de l'évènement.

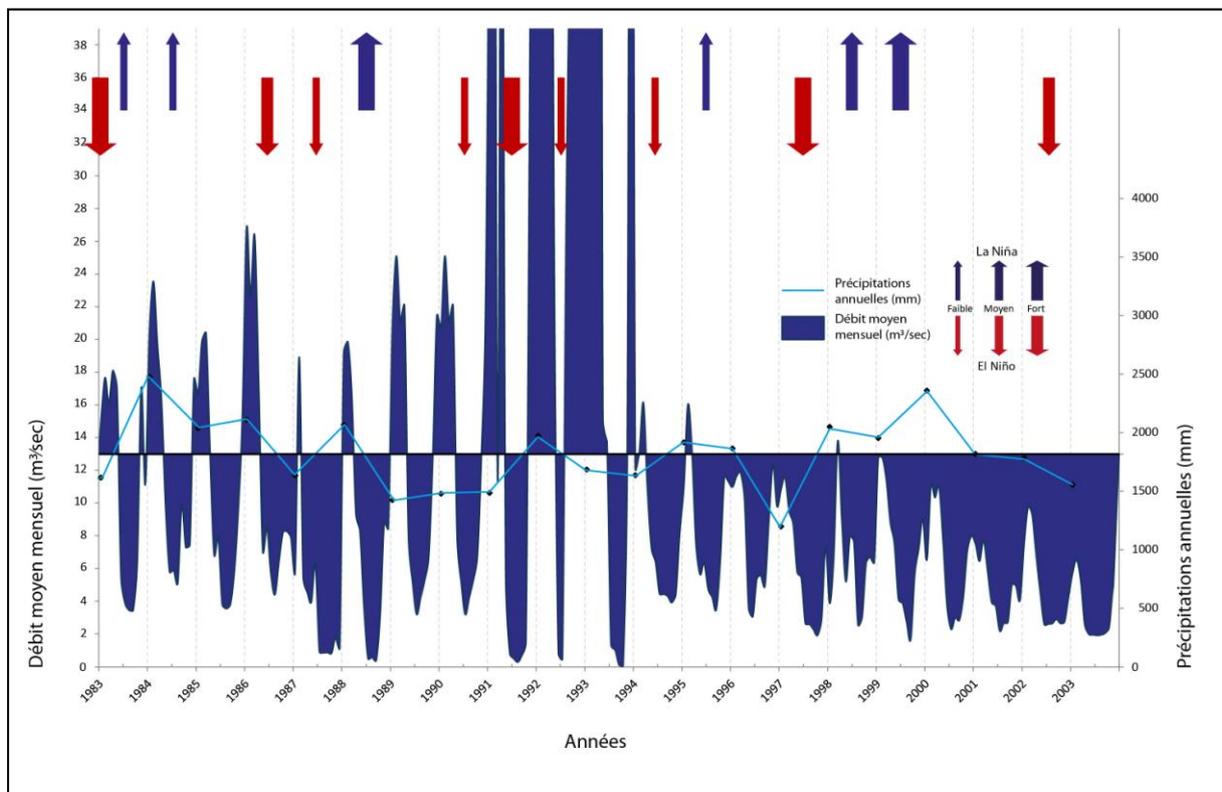


Figure 121: Relation débit (Q) / précipitations (P) dans le bassin de Wonogiri (Java-Centre)

Concernant le bassin de Wonogiri, les données représentent pour la période 1983-2003 les débits enregistrés à la station de Ngadipiro sur le fleuve Keduang, l'un des principaux cours d'eau alimentant le réservoir de Wonogiri (Fig.121). Les données de précipitations proviennent de la station se trouvant à proximité du barrage de Wonogiri (*Nippon Koei*, 2005). Nous constatons immédiatement deux périodes, la première de 1983 à 1994 avec des débits mensuels très forts atteignant $120 \text{ m}^3/\text{sec}$ (avril 1993) puis une seconde avec une baisse générale des débits sous la moyenne de la période étudiée. Les précipitations quant à elles sont bien influencées par les alternances entre les périodes où El Niño et La Niña font leur apparition. La rupture nette des débits après 1994 est le fruit des mesures du plan directeur de 1974 qui prévoyait de lutter contre les inondations et d'améliorer les structures d'irrigation. Les travaux de réhabilitation de ces dernières se sont achevés en 1994 par le projet d'amélioration du bassin amont du Solo avec le soutien technique et financier du gouvernement japonais.

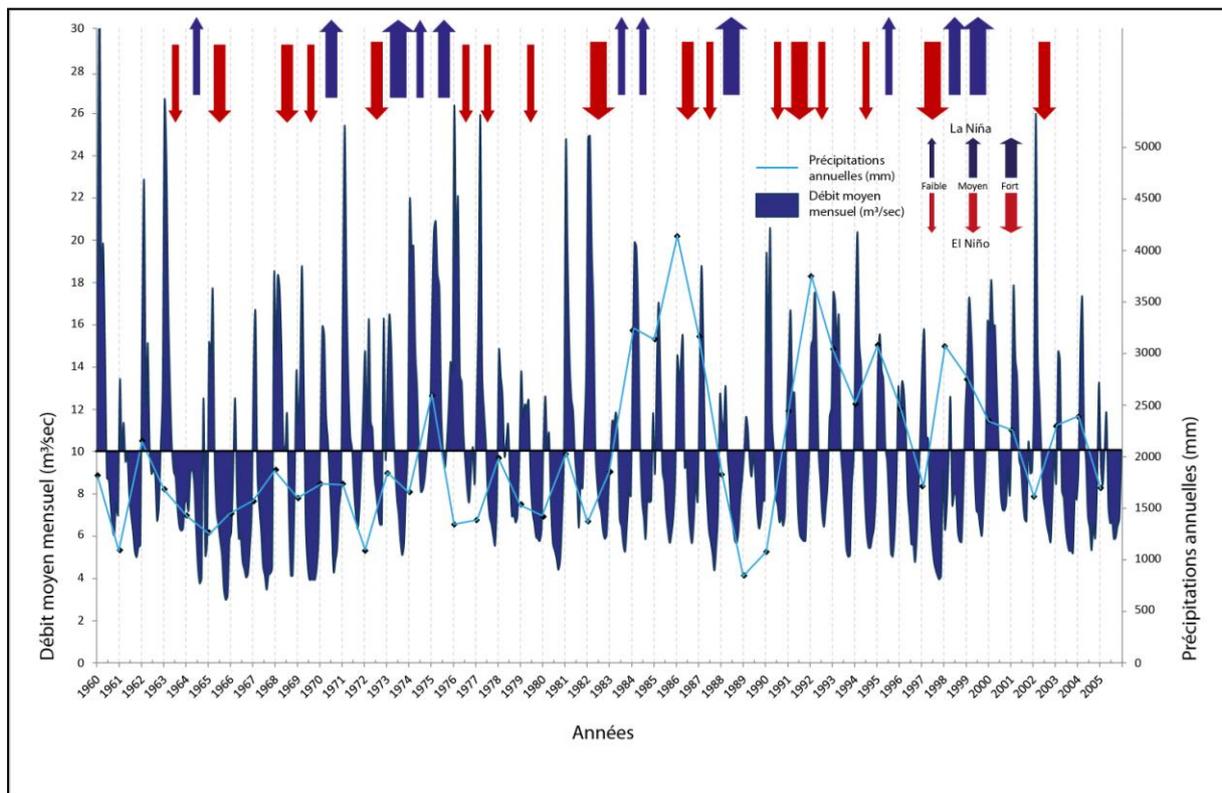


Figure 122 : Relation débit (Q) / précipitations (P) dans le bassin du Brantas (Java-Est)

La figure 122 représente pour la période 1960-2005 les débits et les précipitations enregistrés à la station de Selorejo sur la rivière Konto, l'un des principaux affluents du Brantas (*Jasa Tirta 1*).

La tendance récente ne reflète pas l'évolution hydrologique de la Konto pendant la dernière moitié de siècle. En dépit des grandes variations de débit, trois périodes principales peuvent être distinguées :

- Entre 1960 et 1982, les débits en saison des pluies étaient très élevés alors que la pluviométrie annuelle a été relativement modérée. Ce phénomène est lié directement à la période de déboisement massif suite à l'échec du « *regreening project* » insufflé par le gouvernement.
- De 1982 à 1998, les débits extrêmes ont été plus faibles, même lorsque les précipitations annuelles étaient élevées. Ceci s'explique par une politique de reboisement qui a été mise en place dans le bassin dans le cadre du kali Konto Project de 1979 à 1988.
- Depuis 1998, on constate de nouveau une augmentation des débits malgré des totaux pluviométriques plus faibles, marquant la déforestation massive qui a eu lieu depuis la *Reformasi*.

On peut alors tenter d'étudier l'évolution récente des débits depuis la *Reformasi*. En effet, le pic de débit de 2002 est peut-être alors le signe d'un retour à un cycle anté-reboisement du fait que les précipitations soient relativement faibles depuis 1999. Depuis 1998 les totaux pluviométriques annuels baissent, comme la figure l'indique, tandis que les débits sur la même période ont tendance à augmenter. Cette augmentation des débits malgré la baisse des précipitations met donc en évidence l'impact de la déforestation récente sur l'évolution des débits (Fig.123). Ceci apparaît de manière flagrante pour l'année 2002 où le total pluviométrique annuel est alors très faible (1613,32 mm) pour un débit très élevé (27 m³/sec au mois de février).

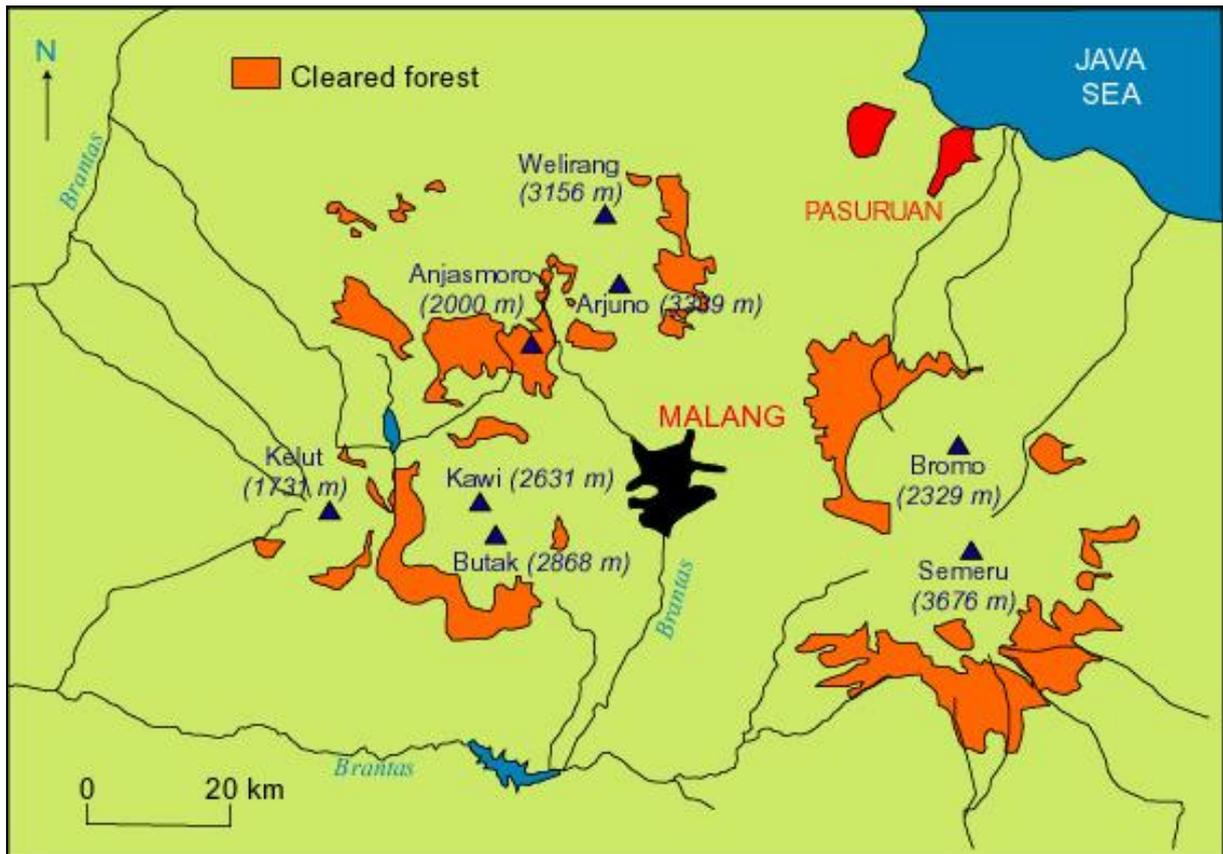


Figure 123 : Extension des zones déboisées entre 1990 et 2000 dans le bassin amont du Brantas (Traitement d'images Landsat TM)

Ainsi, cette corrélation entre l'état de végétalisation des versants et les débits de la kali Konto semble évidente. Cette relation de cause à effet surpasse la relation entre précipitations et débits, puisque ceux-ci sont davantage influencés par l'état de surface des sols (qui conditionne le ruissellement) que par l'intensité des précipitations. L'étude des débits est fondamentale dans notre recherche, du fait qu'ils déterminent la compétence du flux. Ce flux se caractérise comme étant un agent de transport des matériaux en suspension et en transit : plus les débits sont élevés, plus la compétence des cours d'eau le sera aussi. La période précédant le projet kali Konto a été marquée par de forts débits et il semble que depuis la *Reformasi* (du fait de la reprise de la déforestation massive des versants), les débits semblent augmenter de nouveau, laissant présager un transit plus important des matériaux solides en suspension dans les cours d'eau.

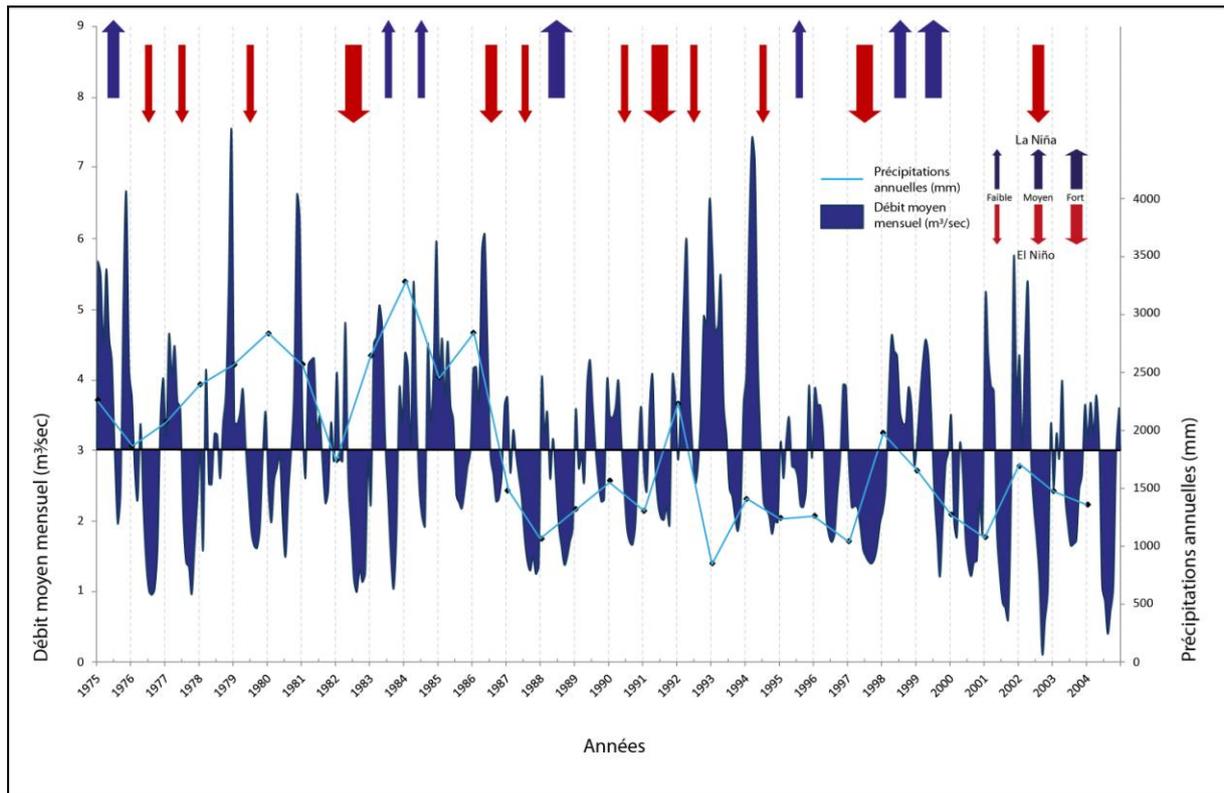


Figure 124 : Relation débit (Q) / précipitations (P) dans le bassin du Citarum (Java-Ouest)

Les données de la figure 124 représentent, pour la période 1975-2004, les débits enregistrés à la station de Citarum-Gandok pour les précipitations de la station de Bandung (*Jasa Tirta 2*, 2005). Entre 1975 et 1987, cette période connaît des totaux pluviométriques élevés se traduisant par des débits importants en saison des pluies. Après cette période, les totaux pluviométriques diminuent alors que l'on peut distinguer deux phases où les débits sont à nouveau forts. La première période est celle de 1993 à 1995, où l'on note le plus important débit moyen mensuel en mars 1994 ($7,88 \text{ m}^3/\text{sec}$), alors que la pluviométrie est quant à elle très faible ces trois années-là. On peut donc envisager qu'une première forte vague de déboisement ait pu toucher la partie amont du bassin à cette époque. La seconde période – entre 1998 et 2003 – peut être attribuée à la *Reformasi*, de la même manière qu'il l'a été remarqué dans le bassin de la Konto, mais avec des valeurs extrêmes plus modestes, comparé à la période 1993-1995.

2. Analyse à l'échelle de la crue, le cas de la Konto

Les trois figures précédentes ont permis de distinguer les périodes de déboisement massif se traduisant par une accélération des flux liquides et donc propices aux phénomènes de crues et d'inondations.

À l'échelle de l'évènement, les figures 125 et 126 montrent bien que le temps de réponse s'est accéléré entre les fortes précipitations et le déclenchement des crues durant ces périodes où l'environnement a connu de fortes perturbations. Ces deux évènements mesurés à la station de Kedungrejo se sont produits à des périodes différentes dans la saison des pluies, les caractérisant bien distinctement l'une de l'autre.

Tout d'abord, le débit de base de décembre 1999 ($0,5 \text{ m}^3/\text{s}$) est bien plus faible que celui de février 2003. En effet, l'apport total des précipitations n'est pas encore assez fort pour faire augmenter le débit de base de manière sensible. En février, ce cumul plus élevé engendre un débit de base bien plus fort ($2 \text{ m}^3/\text{sec}$).

La crue de 1999 a eu lieu en décembre (soit davantage en début de saison des pluies) tandis que celle de 2003 s'est tenue au mois de février lorsque la saison des pluies est à son paroxysme. Ceci influe sur le niveau de saturation des sols (plus élevé) et le temps de réponse entre les précipitations et le déclenchement de la crue (plus court). En effet, pour la crue de décembre 1999, le sol n'étant pas encore saturé, une infiltration des précipitations a alors encore lieu. Ceci explique ainsi le décalage entre les pluies et la crue qui ont été restituées dans le talweg avec un temps de retard. Pour l'évènement de février 2003, plus avancé dans la saison des pluies, le sol saturé en eau ne permet plus aux précipitations de s'infiltrer. L'eau ruisselle directement, expliquant la quasi synchronisation entre le pic pluviométrique et le déclenchement de la crue. Toutefois on peut également considérer qu'une mutation de l'occupation des sols contribue à cette évolution. C'est le cas lors de la mise à nu des versants qui ne retiennent plus l'eau facilitant alors le transfert des flux liquides vers l'aval.

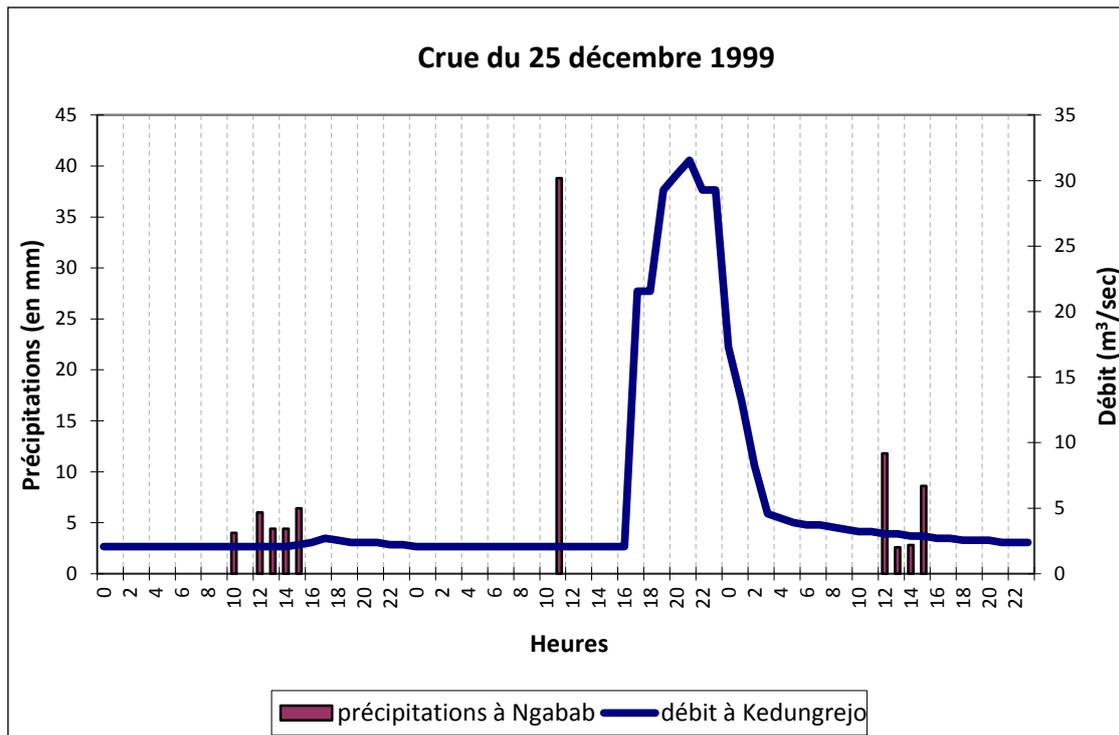


Figure 125 : Évolution horaire des précipitations et des débits du 25 décembre 1999 (BRLKT, 1999)

Pour cet évènement il n'y a qu'un pic pluviométrique unique mais intense (40 mm/h) qui provoque une montée brutale du débit (crue éclair), qui atteint un maximum de 31,5 m³/sec. Le temps de réponse de la kali Konto a été de 5 heures environ après le pic pluviométrique et la crue a duré 12 heures. Le pic de crue a atteint 3,20 m (relevé à la station de Kedungrejo).

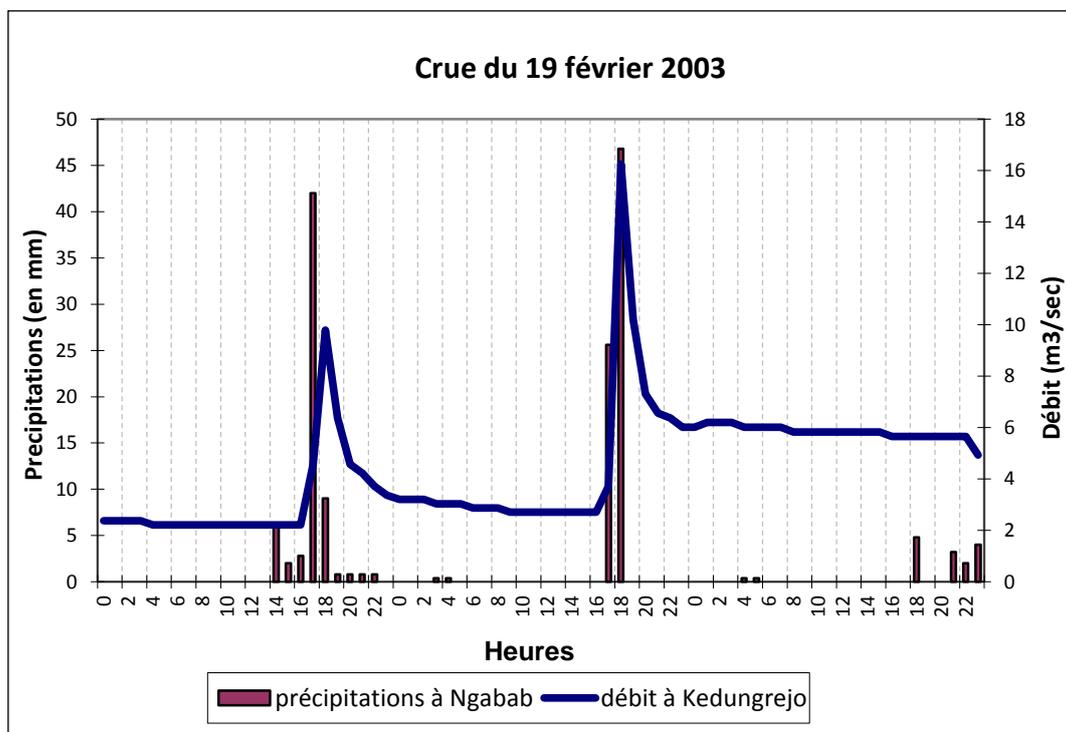


Figure 126 : Évolution horaire des précipitations et des débits du 19 février 2003

Pour cette crue, on note deux évènements : un le 18 février et le plus important le 19 février, répondant chacun à un pic pluviométrique (42mm pour le premier et 46,8 pour le second). Ces crues sont de types « crues éclair » du fait de la montée des eaux et de la décrue très rapides (durée d'environ 4 heures). Le pic de crue a atteint 1,80 m, correspondant à un débit de 16,25 m³/sec.

L'étude de l'évolution du régime nous a ainsi permis de mieux comprendre les fluctuations des flux liquides, ce qui nous amène à étudier maintenant le transit des matériaux à travers le réseau hydrographique.

3. Une accélération des flux liquides, facteur d'une augmentation de la concentration solide

Les données traitées ci-dessous (Fig.127) sont le résultat d'échantillons prélevés sur le terrain par le BRLKT (Bureau de réhabilitation des terres et de conservation des sols), et synthétisées dans un rapport annuel qui récapitule pour la zone amont du bassin-versant de la kali Konto les données pluviométriques, la hauteur d'eau et le débit pour une année. La figure 127 représente la relation entre concentration sédimentaire en fonction du débit entre 1999 et 2002. Si la déforestation récente est bien à l'origine de l'érosion des sols en amont, on devrait constater une augmentation significative de la MES au cours de cette période malgré la faiblesse des précipitations. En effet, la déforestation provoque une dénudation des sols, rendus plus sensibles à l'érosion, notamment au ravinement par les eaux de pluies, qui, même modérées, acheminent par conséquent de plus grandes quantités de matériel dans les chenaux du réseau hydrographique. La comparaison entre les données de 1999 et 2002 met en évidence une augmentation de la charge de sédiments à débit constant en raison de la déforestation en amont depuis la *Reformasi*.

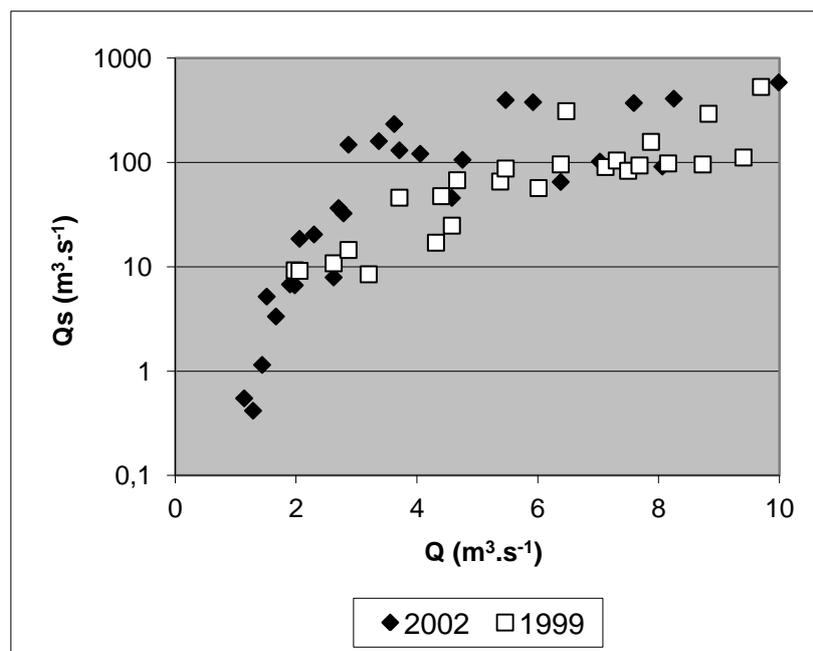


Figure 127 : Évolution de la MES entre 1999 et 2002 (BRLKT, lapan 1999)

L'augmentation de la charge solide en suspension (MES) témoigne de taux d'érosion élevés du bassin-versant de la Konto.

L'étude menée sur la kali Konto montre l'impact de la *Reformasi* sur les systèmes d'érosion et sur l'équilibre environnemental à Java : l'instabilité économique, temporaire, a produit des changements durables du milieu physique ayant pour conséquence l'envasement rapide des réservoirs d'aval.

4. Le rôle érosif des fleuves javanais

Après avoir vu que les versants volcaniques de Java étaient sujets à une forte érosion, les cours d'eau – qui connaissent une augmentation élevée de leur débit durant la saison des pluies – contribuent eux aussi à l'augmentation de la charge solide en transport. Leur pouvoir érosif se distingue assez aisément sur le terrain, comme l'atteste la figure 128, où l'on remarque des impacts nettement visibles sur le cours de la kali Konto. De nombreuses berges non consolidées expliquent qu'en épisode de crues (lorsque le niveau d'eau monte et la force du courant devient plus élevée), des matériaux des berges soient arrachés et mobilisés par le cours d'eau.



A

B

Figure 128 : Berge à la sortie du village de Ngeprih

A : La photo du 26/01/2003 montre déjà une érosion de la berge

B : La même berge prise le 08/04/2003 à la fin de la saison des pluies

En fond de vallée, les paysans javanais s'installent au plus près du fleuve, dans la plaine d'inondation, afin d'y cultiver le riz. Ces terres agricoles sont aussi les plus sujettes aux nombreux évènements hydrologiques de forte intensité qui viennent « grignoter » ces terrains et renforcer ainsi la charge solide en transport (Fig.129).



Figure 129 : La kali Konto à Panggung, en amont du Tokol dam

Les deux clichés ci-dessus montrent que la kali Konto modifie sans cesse son cours. Au fil des crues, tous les matériaux arrachés viennent alimenter la charge du cours d'eau. On assiste alors à un remaniement du chenal qui, à moyen terme, changera de tracé en empiétant sur les rizières (ici érosion en rive convexe).

A : Photo prise le 04/02/2003

B : Photo prise le 08/04/2003, deux mois plus tard

Les infrastructures viennent aussi à souffrir de cette forte charge sédimentaire en transport qui a pour effet d'éroder les piles de pont et provoque alors leur effondrement (Fig.130). Au-delà des perturbations engendrées pour la population, les débris issus de la destruction des installations par les crues représentent un apport de matériaux supplémentaire dans le cours d'eau.



A

B

Figure 130 : Impact des crues du mois de février 2003 dans le bassin de la Konto

Deux ponts ont cédé face à la brusque montée des eaux rendant l'accès à certains villages assez difficile (pic de crue 1,80 m)

A : Sur la kali Konto au niveau du village de Tretès

B : Sur la kali Ledok (l'un des principaux affluents en rive droite de la kali Konto) entre Ngabab et Manting

L'étude des facteurs naturels montre l'influence du climat sur la sédimentation des réservoirs en favorisant l'érosion des sols sur les versants et en accélérant le transport des matériaux solides vers l'aval. Les phénomènes El Niño et La Niña viennent accentuer ces processus dont les effets sont directement visibles dans les taux de sédimentation. Nous allons désormais nous intéresser aux Javanais et outre leur manière d'exploiter les sols, à savoir s'ils contribuent ou non à lutter contre la sédimentation des réservoirs de barrage.

II. Les facteurs anthropiques

Afin de s'expliquer les perturbations d'un milieu, il est important de comprendre comment celui-ci est exploité par l'homme. Au-delà des facteurs naturels, les Javanais – par leur densité ainsi que leur relation forte à la terre – vont ainsi vivement impacter leur environnement. En effet, la population javanaise, en grande partie agricole, exerce depuis plus d'un siècle une forte pression sur les sols. L'essor de grandes agglomérations urbaines a aussi contribué à la conquête de nouvelles terres, tout en étant à l'origine de nouvelles sources de pollution issues des activités industrielles. Il s'agit donc dans cette partie de distinguer les causes d'origine anthropiques susceptibles d'avoir un impact sur la sédimentation des réservoirs.

A. Un défrichement rapide et non maîtrisé des hautes terres

En 1979, Pickering a récapitulé la situation environnementale globale sur Java comme suit : « La fertilité du sol est réduite ; les équilibres hydrologiques sont perturbés ; les sources sont asséchées ou ont des débits plus faibles ; il y a moins d'eau disponible pour irriguer les plaines et les pieds de versants ; il y a une augmentation constante dans la fréquence et la taille des inondations ainsi que dans la sédimentation des cours d'eaux, des canaux d'irrigation et des réservoirs ».

Étant l'un des secteurs les plus peuplés de la planète avec des densités supérieures à 1 000 hab./km², l'environnement javanais éprouve un grand stress dû à une utilisation agricole de plus en plus intensive. Les sources des problèmes actuels sont à chercher dans la longue histoire de l'île. En effet, depuis le 18^{ème} siècle, Java a connu une succession d'évènements qu'il est important de retracer afin de mieux comprendre l'évolution de l'occupation des sols javanais, et par conséquent la situation actuelle.

1. L'état des surfaces boisées avant la *Reformasi*

a. L'époque coloniale

En 1619, quand les premiers colons hollandais établirent un comptoir à l'emplacement actuel de Jakarta (Batavia), la majeure partie de l'île de Java – et ses hautes terres en particulier – était occupée par une forêt primaire. Les Sundanais, qui habitaient en petit nombre dans les secteurs montagneux de la partie ouest de Java, subsistaient en pratiquant

une culture itinérante (*shifting cultivation*), alors que les Javanais, vivant majoritairement dans les plaines de l'est et du centre de l'île, pratiquaient la culture inondée du riz (Geertz, 1963).

Cette situation s'est doucement modifiée vers les années 1700, lorsque la Compagnie néerlandaise des Indes orientales (*Vereenigde Oost Indische Compagnie* - VOC) a estimé le potentiel et le profit à tirer de la culture du café sur les hautes terres. Elle a su alors exploiter les structures féodales existantes en introduisant le « Système Priangan » (nom de la région administrative et/ou Résidence du Priangan, principale région productrice, avec environ 21% de la surface totale de Java en 1958), suivi plus tard du « Système des cultures » (du hollandais : *Cultuurstelsel*) de 1830 à 1870. Ces systèmes induisaient la contrainte forcée de cultures de café sur une partie des hautes terres des fermiers, qui n'avaient d'autres choix que d'accepter. Ils ont alors commencé à planter des caféiers sur des terres abandonnées alors qu'ils déboisaient de nouvelles terres en faveur de la riziculture inondée (Hardjono, 1987). Pour fuir la pression instaurée par le Gouvernement, nombre de fermiers se sont alors séparés de leurs terres ou ont même dû fuir leurs propres fermes, afin de gagner d'autres parties moins contrôlées des montagnes que les zones forestières (Palmer, 1959).

Autour de 1885, l'arrivée de la rouille des feuilles de café (*Vastatrix de Hemileia*) a dévasté la quasi-totalité des plantations de café sur Java. De cause à effet, c'est le « Système des cultures » lui-même qui périclita. Les fermiers ont alors pu transformer plusieurs de ces plantations abandonnées en terre de culture annuelle. La population, quant à elle, s'est développée toujours davantage, en parallèle de l'instauration de nouveaux domaines privés dans les secteurs du thé, du caoutchouc et du cacao. Ainsi, au profit de ces nouveaux domaines d'activités, les dégagements de terrain sont devenus de plus en plus importants dans les massifs de Java-Ouest, alors que les terres en contrebas, les plaines boisées et les fonds de vallée étaient défrichés pour la culture irriguée du riz – initiée par Java-Centre et Java-Est (Whitten et al., 1996). Alarmé par l'érosion et l'épuisement des sols qui avaient été observés dans des plantations de café, le gouvernement colonial a exigé l'aménagement de terrasses sur toutes les pentes nouvellement dégagées (Nibbering, 1991). Les conséquences hydrologiques potentiellement défavorables du déboisement ont également inquiété l'administration. Les règlements sur le déboisement sont devenus de plus en plus stricts

jusqu'à être finalement interdits en 1938. En outre, le terrassement à grande échelle et les programmes de redistribution de terres visant de petits exploitants ont été lancés dans les années 30 (Schuitemakers, 1949 ; De Haan, 1952).

La conversion à grande échelle des forêts en terres de culture a commencé au milieu du 19^{ème} siècle pour répondre aux exigences alimentaires d'une population en rapide expansion. Quand ce processus s'est finalement ralenti au milieu du 20^{ème} siècle, environ 10 millions d'hectares de forêt, soit environ 80% de sa surface d'origine, avaient disparu (Smiet, 1990). Le déboisement anarchique des versants, suite à la forte croissance démographique associée à des pratiques agricoles mal adaptées, a provoqué une grave érosion dans les collines et les montagnes.

Les problèmes potentiels furent déjà identifiés en 1827 par le commissaire de l'administration coloniale hollandaise. Celui-ci avait déjà présagé que le surpeuplement javanais des plaines fertiles et irriguées serait à terme le même sur la totalité de l'île. En raison de ce surpeuplement, la répartition des terres s'est morcelée en quantité de petites parcelles. Des millions de Javanais continuent ainsi à vivre sur des fractions d'un hectare, cultivant uniquement le riz, avec des revenus de travailleur pauvre, couvrant très difficilement leurs besoins journaliers (Whitten, et al. 1996).

Aux Néerlandais succédèrent les Japonais en 1942. Ces derniers réduisirent la plupart des domaines destinés à l'exportation pour y planter du ricin (l'huile de ricin jouant un rôle de lubrifiant dans le secteur industriel) et des cultures servant à la fabrication de fibres textiles. Au-delà du fait que beaucoup de ces cultures aient échoué, la dégradation de sols liée à cette période est généralement considérée comme particulièrement grave aujourd'hui (Palte, 1989 ; Nibbering, 1991). Dès la fin du 19^{ème} siècle, la nécessité de contrôler l'érosion à Java a été prise en compte. Ainsi, dans les années 1830, des programmes à grande échelle pour l'aménagement de terrasses sur les champs des petits exploitants ont été entrepris dans les résidences de Priangan (*Preanger*) et de Cirebon (*Chirebon*) (Joosten, 1941 ; Schuitemakers, 1949 ; De Haan, 1952). Ces efforts ont cependant souffert de discontinuité lors de la Seconde Guerre mondiale et des premières années d'indépendance.

Nous voyons bien alors que les conditions à Java étaient déjà propices à une forte sédimentation avant la construction des premiers réservoirs.

b. De l'indépendance à la *Reformasi*

Après la révolution qui a mené à l'indépendance de l'Indonésie (le 17 août 1945), des guérilleros luttant pour un état communiste ont poussé les fermiers des zones montagneuses de Java-Ouest à se sauver et chercher refuge dans des villages et des villes plus sûrs (Hardjono, 1987). Au début des années 1960 beaucoup de ces fermiers sont retournés sur leurs terrains. Ils n'y trouvèrent cependant que des structures d'irrigation dégradées sur leurs terres désormais occupées par d'autres fermiers, ou encore redistribuées au personnel militaire après qu'ils en aient évincé les rebelles. En outre, le gouvernement de Suharto – qui prit le commandement vers la fin des années 60 – passa d'une politique de redistribution des terres à une politique d'encouragement aux entreprises privées. Les priorités furent attribuées à l'intensification de la riziculture en plaine et au développement industriel, plutôt qu'à la restitution des propriétés aux fermiers et aux petits exploitants des montagnes (Whitten et al., 1996).

Néanmoins, la grave dégradation des terres dans les secteurs montagneux et en particulier les problèmes liés à la sédimentation des fleuves, des canaux d'irrigation et des réservoirs, ont finalement incité le Gouvernement à l'intervention – du fait du rôle essentiel joué par ces ouvrages dans le développement économique en aval (Pickering, 1979).

Après que la ville de Solo (*Surakarta*) à Java-Centre eut été sérieusement inondée en 1966, des efforts ont ensuite été portés au développement des bancs de terrasses (De Graaff et Wiersum, 1991). La gestion des bassins-versants a ensuite été poursuivie en Indonésie par plusieurs agences. Pour exemple, la province de Java-Ouest a lancé au début des années 1970 une campagne de reboisement (*Rakgantang* ou *Gerakan Gandrung Tatangkalan*). Plusieurs années après, le gouvernement central a mis en place le programme d'instruction présidentiel pour le reboisement et la « révolution verte » (*Inpres Reboisasi dan Penghijauan : Inpres R & R*). Ce programme de reboisement a été conçu dans le but de reconstituer les forêts endommagées, protéger et augmenter leur productivité, tandis que les programmes en faveur de la « révolution verte » ont été principalement dédiés à

l'amélioration des pratiques en matière de conservation du sol pour les terres communales et les terres de fermiers privés (Pickering, 1979). Se sont ajoutés à ces séries de campagnes de conservation des sols, des programmes de développement des zones montagneuses. Les fermiers ont alors été encouragés, vers la fin des années 1970, à planter des arbres sur leurs terrasses et mettre en place d'autres techniques de conservation des sols (Purwanto, 1999). Sous le thème commun de la « révolution verte », de tels efforts sont encore effectués jusqu'à aujourd'hui, souvent soutenus par l'aide bilatérale ou multilatérale (Purwanto, 1999). La volonté d'assurer l'autosuffisance alimentaire du pays est – en grande partie – responsable de ce recul de la forêt depuis la fin des années 1970.

La riziculture irriguée (*Sawah*) en Indonésie est un mode de culture très ancien (présent depuis le 5^{ème} siècle) qui a pris son essor dans le bassin du Brantas à Java-Est pour ensuite s'étendre très progressivement à l'ensemble de l'île. Cette technique ne se développe dans le centre de l'île qu'au 18^{ème} siècle et atteint l'ouest à la fin du siècle. A l'heure actuelle, les rizières irriguées couvrent une surface d'environ 3,5 millions d'hectares sur Java, ce qui représente presque la moitié de la surface des rizières inondées à l'échelle nationale. Les rendements peuvent atteindre 5 t/ha. Presque toutes les rizières donnent deux, voire trois récoltes par an. La propriété foncière est aussi particulièrement morcelée sur Java. Sur les 10 400 000 d'exploitations agricoles en 1890, 75% d'entre elles ont une surface inférieure à 0,50 ha (BPS, 1981).

En dépit de tels efforts, les enquêtes de terrain de 1994 (trois ans après l'achèvement du premier programme de conservation) ont démontré que de nombreux arbres replantés avaient déjà été coupés (Fig.131) et que la majorité des versants, encore aménagés en terrasses, était déplorablement entretenue, aussi bien en termes de construction que de couverture végétale (Fig.132). Dans leur examen sur les efforts de recherches locales concernant l'érosion du sol en Indonésie, Agus, et al. (1998) concluent qu'« en dépit des efforts intensifs pour la conservation et la réhabilitation du sol, l'érosion reste un des problèmes environnementaux majeurs menaçant la pérennité de l'agriculture et la bonne qualité environnementale ». Leur conclusion est que « les impacts de tels efforts semblent limités ». De même, Diemont et al. (1991) attirent l'attention sur le manque apparent d'impacts dans les zones aval des mesures de conservation du sol des secteurs amont. Ceci est en grande partie imputable au fait que les sources sédimentaires n'avaient pas été prises en considération pendant les évaluations précédentes.



Figure 131 : Déforestation sur un versant dans le bassin amont du Brantas (2006)

La forêt secondaire replantée lors de la révolution verte dans les années 80 a de nouveau été abattue pour gagner des surfaces agricoles supplémentaires, même sur les pentes les plus fortes.

Dans quelle mesure les terrasses sont-elles alors considérées comme une mesure efficace de conservation des sols dans ces hautes terres ? Plusieurs indications prouvent que la qualité des terrasses pourrait être encore améliorée en raison de leur manque d'entretien (Carson, 1987 ; Harper, 1988). D'autre part, le coût et les besoins de main-d'œuvre élevés pour maintenir les terrasses sont souvent contraires à la réalité des petits agriculteurs (Sembiring, et al. 1989 ; Banque Mondiale, 1993).



Figure 132 : Érosion des sols sur les terrasses dans le bassin de la kali Konto (2003)

Un entretien irrégulier des terrasses contribue à l'accélération des processus érosifs sur les pentes les plus fortes. Les contre-pentes constituées par les terrasses s'affaissent, lissant ainsi le terrain.

En partie suite à ces projets, plus de 80% des secteurs montagneux de Java semblent maintenant avoir été aménagés en terrasses comme le montre la figure 133 (Purwanto, 1996). Malheureusement, ceci n'a pas eu l'effet escompté, à savoir un impact durable sur l'importance des charges sédimentaires en transport dans les fleuves javanais car elles continuent de figurer parmi les plus hauts au monde, en s'échelonnant entre 10 et 60 t/ha/an (Carson, 1989 ; *World Bank*, 1990 ; Whitten et al., 1996). Parallèlement, l'érosion demeure un problème significatif (Agus et al., 1998) avec environ 15% des bassins fluviaux de l'île déclarés dans un état « critique » (Whitten et al., 1996). Les programmes de conservation du sol n'ayant pas rencontré le succès attendu, l'impact est aussi devenu d'ordre social puisque la majorité des fermiers des montagnes continue à vivre dans le dénuement ou presque (Purwanto, 1999). On peut alors douter que les diverses mesures de conservation proposées (terrassements de banc, plantages d'arbres, barrages de contrôle de sédiment etc.) aient été réellement mises en application et maintenues au cours du temps.



Figure 133 : Versants défrichés en faveur de l'agriculture dans le bassin de la kali Konto (2003)

2. Reformasi

1998 marque l'année de la chute du gouvernement du Général Suharto. Ce changement politique appelé « *Reformasi* » résulte de la grande crise économique qui a frappé l'Asie à la fin des années 1990. Un des impacts environnementaux de cette crise en Indonésie a été la recrudescence de l'abattage illégal des surfaces boisées appartenant à l'état (Lavigne et Gunnell, 2007). L'île de Java a été parmi les principales victimes de ces pratiques visant à créer de nouvelles terres agricoles mais également à assurer l'exploitation du bois à l'échelle locale (d'usage domestique) et internationale sous la tutelle de grandes multinationales.

Jusqu'en 1950, l'Indonésie était encore densément boisée. Au cours du demi-siècle suivant, 40% de la forêt avait disparu, soit une baisse de 162 millions d'hectares à 98 millions d'hectares. Tout au long des années 1980, l'Indonésie a dégagé 1 million d'hectares par an, taux ayant atteint 1,7 millions d'hectares par an au début des années 1990. Au cours de la période primaire de la déforestation (1950 - 2000), un nombre étonnamment élevé de concessions a été accordé par le président Suharto au long de ses trois décennies de pouvoir (1967 - 1998) à des proches de sa famille. Ces concessions ont été à hauteur de plus de la moitié de la superficie forestière du pays. Les forêts ont évidemment été considérées par ces destinataires comme une source de revenus immédiats.

L'écart entre l'offre et la demande de produits du bois a mis en place un commerce florissant contribuant à une exploitation forestière tout à fait illicite. Les industries de transformation du bois ont elles-mêmes ouvertement reconnu leur dépendance à l'égard de ce bois illégal, qui représentait environ 65% de l'approvisionnement total en 2000. Par définition, l'exploitation forestière clandestine ne peut pas être mesurée avec précision. Cependant, un ancien haut fonctionnaire indonésien du Ministère des forêts a récemment émis l'hypothèse que l'exploitation forestière illégale aurait ruiné plus de 10 millions d'hectares de forêt. L'impact des petits agriculteurs est, lui aussi, difficile à calculer, mais des estimations plausibles à partir des années 1990, ont suggéré que les cultivateurs itinérants pourraient être responsables de la perte de 4 millions d'hectares entre 1985 et 1997, soit environ 20% de perte de forêt.

L'impact des plantations industrielles est quant à lui beaucoup plus important, d'autant que nombre d'entre elles se sont tournées vers le feu comme un moyen simple de défrichage. Durant les saisons sèches, pendant les périodes des El Niño de 1994 et 1997-98, les feux délibérément allumés ont dévasté environ 10 millions d'hectares de forêt.



Figure 134 : Défrichage en bandes témoin de la *Reformasi* (2003)

Au pied du versant, on reconnaît, au-dessus des terres de cultures non irriguées, une bande d'arbres plantés datant du projet kali Konto (années 1980). En milieu de versant on voit une large bande récemment défrichée offrant des nouvelles terres de culture. Coiffant le sommet, on reconnaît les restes de la forêt naturelle qui se distingue par son couvert dense et compact. D'après divers témoignages, ce versant était encore entièrement boisé à la fin des années 90.

Retracer l'histoire de la forêt javanaise permet de mieux comprendre les liens étroits qu'elle entretient avec l'érosion des sols et par conséquent avec celui du dépôt de sédiments dans les réservoirs. Les grandes phases de déforestation sont des périodes propices à une forte production sédimentaire. En effet, la disparition des forêts favorise l'accélération de la dégradation des sols, du fait que ceux-ci soient moins protégés face au pouvoir érosif des précipitations. La figure 135 témoigne parfaitement de cette relation puisque l'on remarque, lors de la phase du projet kali Konto (programme de reboisement), de faibles taux de sédimentation alors que la période de la *Reformasi* correspond à une augmentation brutale de la sédimentation dans le réservoir.

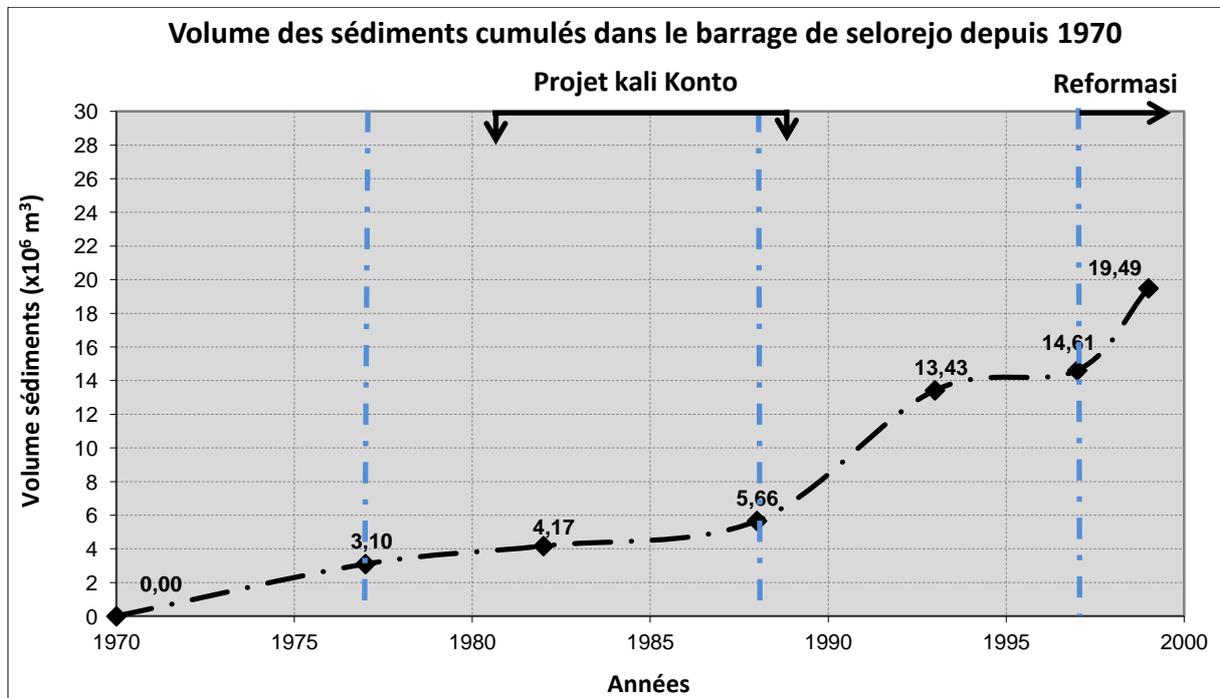


Figure 135 : La sédimentation dans le réservoir de Selorejo entre 1970 et 1999 (Java-Est)

Toutefois il semble que le Gouvernement – par le biais de grands organismes internationaux comme la Banque mondiale – décide enfin de s'attaquer à ce problème par le financement de projets de reboisement. De 2006 à 2011, l'Office national des forêts indonésien a reboisé 500 000 hectares, soit un coût de 20 millions d'euros par an. Les régions ont désormais l'obligation d'avoir au moins 30% de leur superficie boisée, bien que la vérification du respect de cette loi reste encore assez difficile dans les faits. Il semblerait que la région de Wonogiri ait toutefois atteint cet objectif avec le reboisement en 2012 de 5 500 arbres, pour atteindre 31,5% de sa superficie couverts par les forêts (SoloPos, 2012).

B. Les activités humaines impactant la sédimentation des réservoirs

Nous avons vu que les bassins concentrent une forte densité de population dépassant les 1 000 habitants au km² (chapitre 2). Une telle démographie ne peut être sans conséquences sur le milieu. Son impact, dans le cadre de notre étude, porte ainsi directement préjudice à la capacité des réservoirs, comme nous allons le voir ci-dessous.

1. La gestion des déchets et leur traitement

a. Les déchets plastiques, un fléau pour les rivières

Le système de gestion des déchets en Indonésie pose de sérieux problèmes environnementaux. Ceci est encore plus criant sur l'île de Java qui concentre 140 millions d'habitants. Pour beaucoup, le Citarum – où trois des barrages étudiés se trouvent sur son cours – est considéré comme la rivière la plus sale au monde (AFP, 2012). En effet le fleuve fait office de déchetterie où s'accumule une quantité alarmante de déchets flottants comme l'atteste la photo ci-dessous (Fig.136).



Figure 136 : Le Citarum une déchetterie flottante à ciel ouvert (Citarum.org)

Plus de 15 millions de personnes dépendent de ce fleuve dont en partie les habitants de Jakarta, la capitale indonésienne.

Lors des périodes de forts débits, cet amoncellement de déchets est alors transporté jusqu'au réservoir de Saguling – qui ne se situe qu'à quelques kilomètres en aval de la ville de Bandung – et vient accentuer le comblement des réservoirs. À la fin de l'année 2011, le Ministre des travaux publics a alloué plus de 3 milliards d'euros (dont près de 400 millions apportés par la Banque asiatique de développement) à la réhabilitation du fleuve. L'objectif est de prélever 10 millions de m³ de déchets sur trois ans et ainsi d'éviter qu'ils ne viennent participer au comblement des réservoirs (*Pikiran Rakyat*, 10/11/2011).

Sur le cours du Brantas, la gestion des déchets est aussi un problème majeur. Le réservoir de Sengguruh reçoit environ 5×10^6 m³ d'ordures par an qui viennent s'accumuler devant les portes de l'ouvrage. Pour lutter contre « ces détritiques sédimentaires » une seule machine travaillant en continu est installée pour collecter ces ordures avec une capacité de 300 000 m³ par an. Les problèmes liés à cet amoncellement de détritiques se répercutent aussi sur la production électrique, qui est alors passée de 28 à 18 mégawatts d'électricité par jour. Si aucune mesure n'est prise, le réservoir viendra à être totalement comblé dans les cinq prochaines années (*Jakarta Post*, 05/02/2011).

b. L'eutrophisation causée par la pollution

Les grands fleuves javanais que sont le Solo, le Brantas et le Citarum ont vu une forte densité d'industries s'installer sur leurs berges afin de pouvoir bénéficier directement de cette ressource en eau. Les eaux usées rejetées dans les fleuves (Fig.137), au-delà des questions de santé publique, participent à l'eutrophisation du milieu du fait de leur forte concentration en polluants et métaux lourds.

L'eutrophisation est un processus de dégradation d'un milieu (Fig.138). Les nutriments, tels que le nitrate ou le phosphate, déversés en grande quantité, engendrent la multiplication d'algues et de cyanobactéries, néfastes de par leur difficulté à être éliminées par les organismes présents dans l'écosystème. Elles se minéralisent alors pour tomber au fond du lit du fleuve et participent ainsi à l'augmentation de la sédimentation.

Selon le Gouvernement, les 1 500 usines textiles dans le bassin du Citarum déversent chaque jour 280 tonnes de déchets toxiques dans le fleuve.



Figure 137 : Rejet de polluants industriels dans la rivière Cihaur, tributaire du Citarum à Java-Ouest (Greenpeace, 2012)

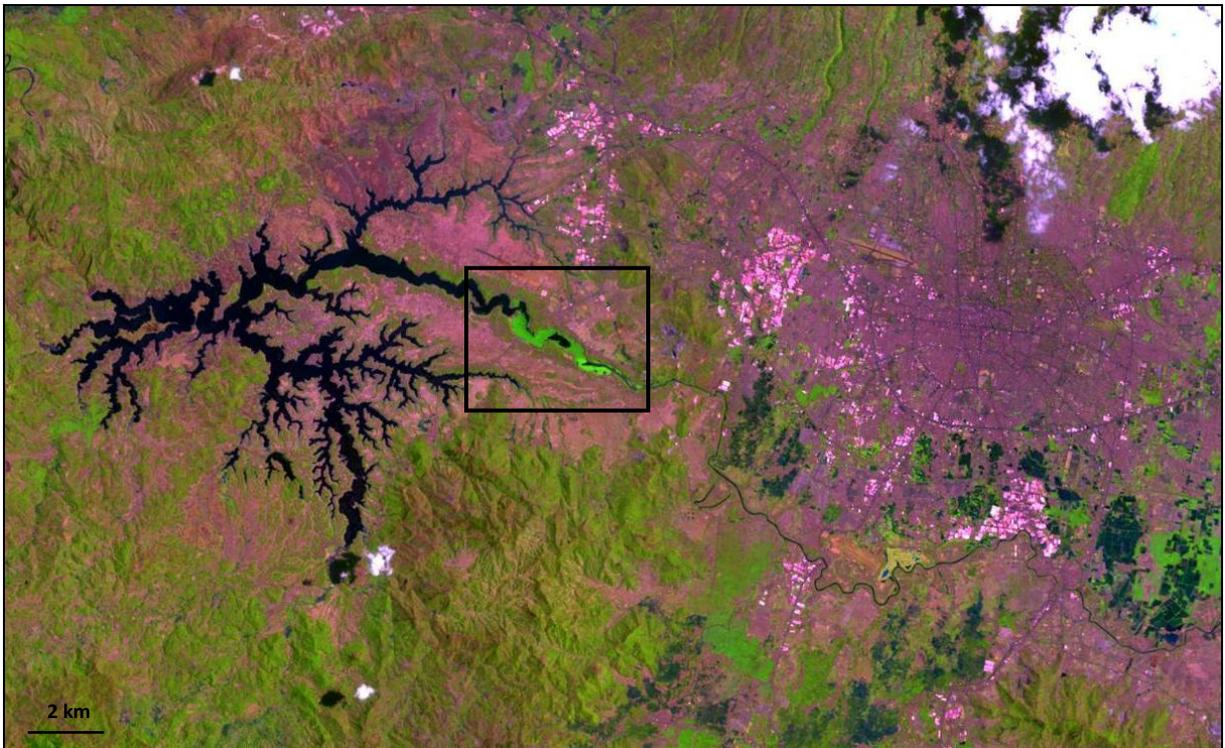


Figure 138 : La pollution accélérant l'eutrophisation du réservoir de Saguling (2002)

2. Les lacs surexploités

La pisciculture s'est développée au fil de la construction des barrages et est encouragée par le Gouvernement afin d'offrir une source de revenus aux populations déplacées par la construction des réservoirs (Fig.139). Le nombre de cages a fortement augmenté depuis la fin des années 1990. On dénombre par exemple pour les réservoirs du Citarum près de 12 000 cages installées dont 7 000 sur le réservoir de Saguling, soit plus de 20 000 tonnes de poissons y étant élevés (Abery et al, 2005). L'accroissement rapide du secteur piscicole sur ces réservoirs n'est pas sans conséquences non plus. En effet, dans les secteurs où se trouvent ces exploitations, on note une augmentation des substances nutritives servant à nourrir les poissons, qui viennent alors s'accumuler dans les sédiments au fond de la retenue. Par ailleurs, sont aussi révélées des dérives de ces exploitations dues à l'intensification des méthodes et à la concentration de poissons au dessus des normes autorisées. Ces pratiques illégales ne font elles aussi qu'accroître l'impact de cette activité sur la sédimentation des réservoirs.

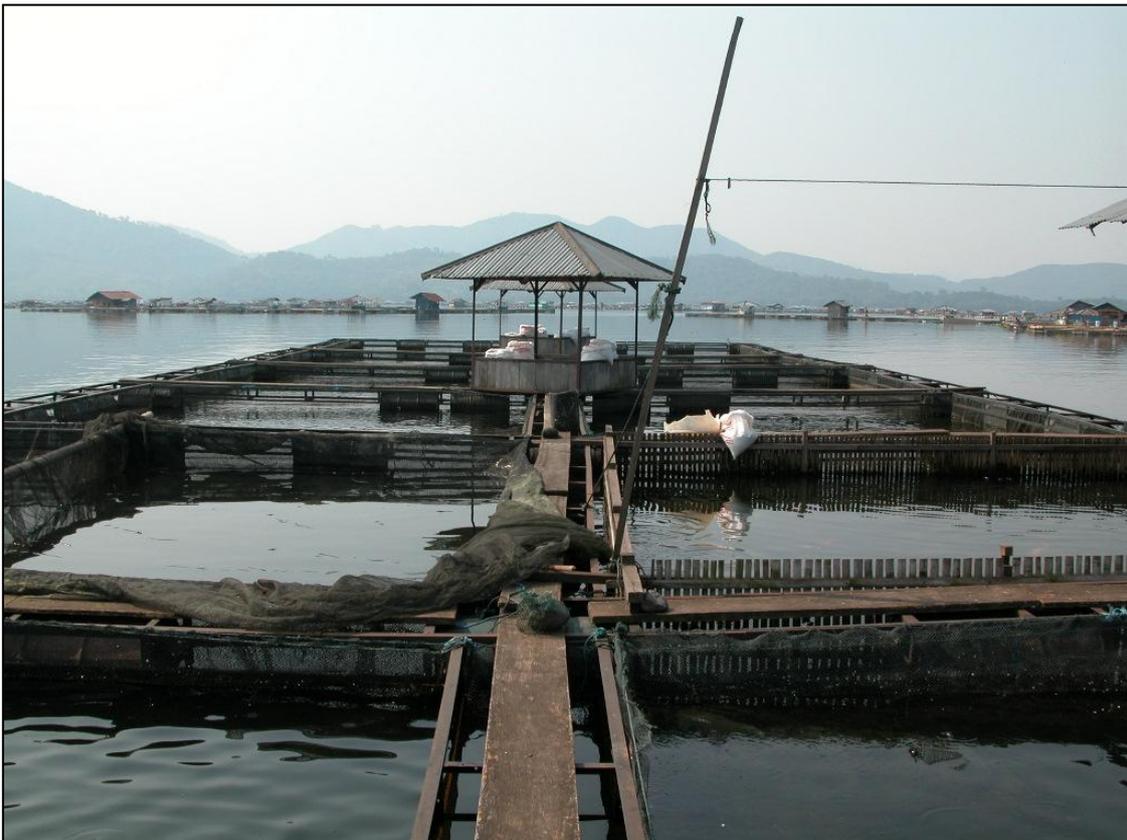


Figure 139 : Ferme piscicole sur le réservoir de Cirata (2006)

Ces cages d'une dimension de 143 m³ peuvent accueillir jusqu'à 2 000 kg de poissons chacune (Abery et al., 2005). La conséquence de la surconcentration dans les zones d'élevage est un dépôt important de sédiments. Ceux-ci sont autant dus aux déchets des poissons qu'aux restes de leurs repas en suspension dans l'eau. On dénombre actuellement 52 000 cages alors que les licences accordées ne sont que de 12 000 (antarajawabarat.com, 26/9/2012).

Si l'alimentation des poissons élevés contribue à la sédimentation, il en va de même avec les carcasses-mêmes de poissons morts. En effet, du fait de la pollution mentionnée dans la partie précédente, la qualité des eaux s'est fortement dégradée. Un accroissement de la mortalité des poissons en est l'une des conséquences directes (Fig.140). Les valeurs ainsi peuvent atteindre jusqu'à 1 500 tonnes par an (en 1993 pour Saguling et 1996 pour Jatiluhur). Les carcasses alors abandonnées sur place participent aussi à leur tour à la sédimentation des réservoirs.



Figure 140 : La mortalité des poissons dans les réservoirs de Java-Ouest (Citarum.org)

La détérioration de la qualité de l'eau a entraîné une augmentation de la mortalité des poissons avec des valeurs annuelles pouvant atteindre plus de 1 000 tonnes.

Nous voyons bien à travers ces deux exemples que si les Javanais, qui peuplent ces bassins, ont à souffrir d'une sédimentation trop rapide des réservoirs du fait du manque d'eau ou d'un contrôle plus difficile des événements climatiques extrêmes, ils y contribuent également par leurs activités.

Ayant retracé dans cette partie les grands bouleversements qui ont touché Java ces dernières décennies, nous allons désormais mettre en évidence les liens existants entre ces perturbations et la sédimentation des réservoirs.

Ayant expliqué les facteurs qui concourent à la forte sédimentation des réservoirs javanais, la synthèse ci-dessous – réalisée à l'aide des données récoltées – démontre que les grandes phases de sédimentation sont à la fois le résultat de l'impact de facteurs naturels mais aussi anthropiques, détaillés dans ce chapitre. En nous basant sur le taux de sédimentation moyen annuel rapporté à la surface de chacun des bassins, il est possible de distinguer sur les figures 141 et 142* les grandes phases de la sédimentation des réservoirs à Java. Plusieurs périodes montrent les impacts de la déforestation lors de *Reformasi* ainsi que ceux des oscillations El Niño et La Niña.

*la figure 142 est une reprise de la figure 141 mais débute à partir de 1990 date à laquelle tous les réservoirs étaient en service.

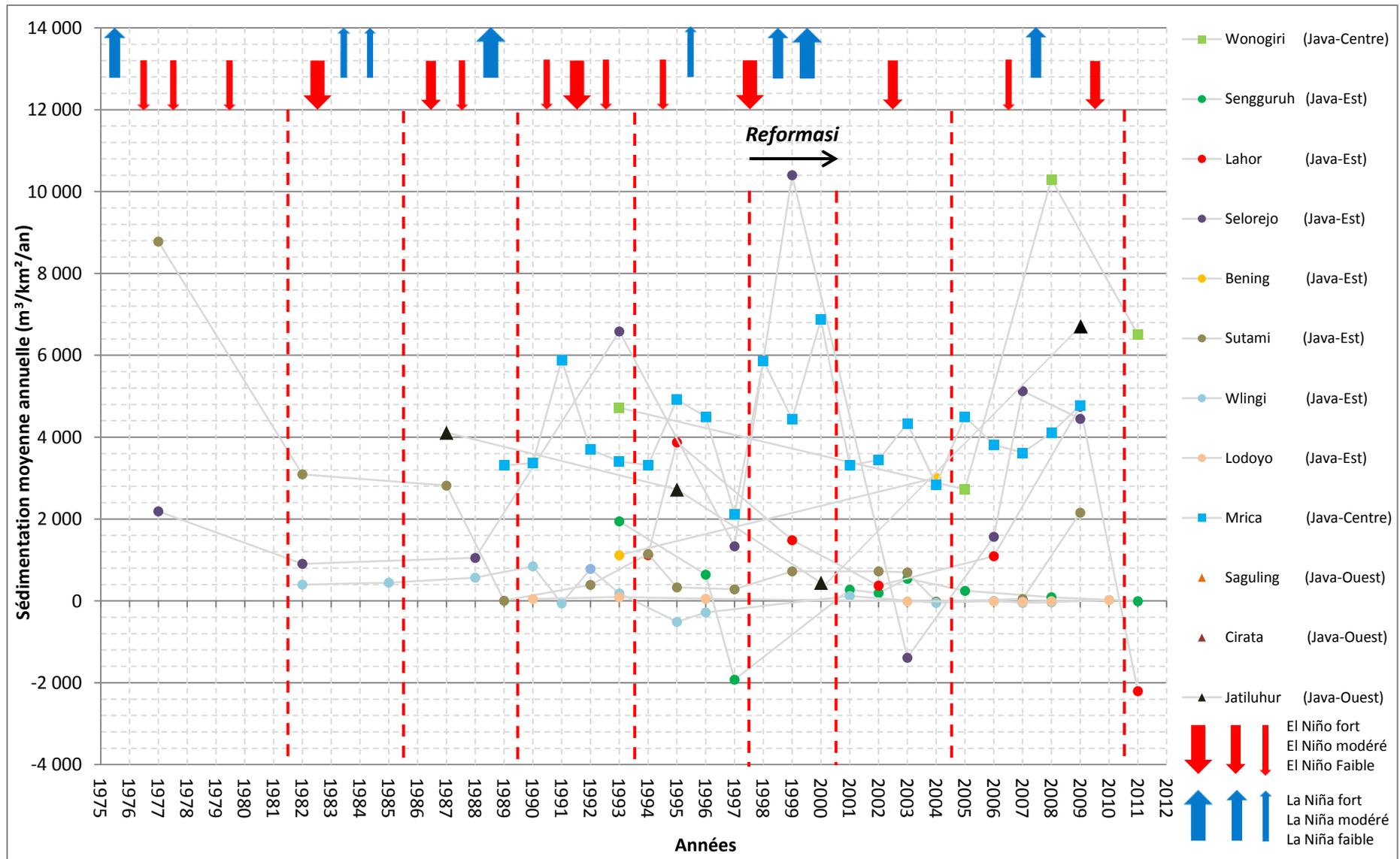


Figure 141 : Sédimentation annuelle dans les réservoirs javanais depuis la mise en service des barrages

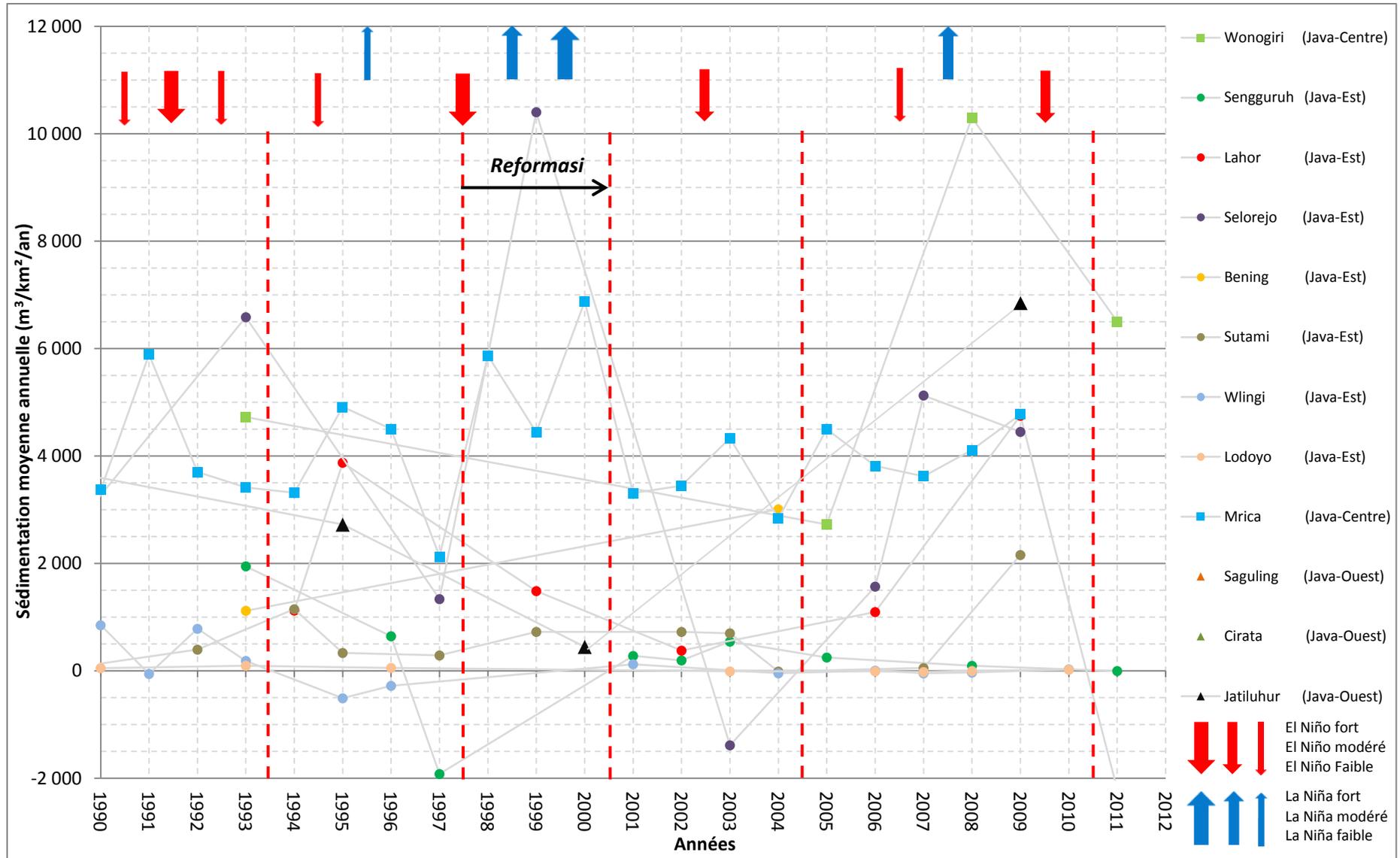


Figure 142 : Sédimentation annuelle dans les réservoirs javanais depuis 1990

Cette analyse va principalement s'appuyer sur la courbe du réservoir de Mrica, seul barrage à fournir annuellement des données. Cette régularité permet ainsi de rendre fidèlement compte de l'état de la sédimentation. Toutefois les autres réservoirs permettent d'observer des tendances sur une période variant entre 1 et 10 ans selon la régularité des sondages effectués.

Les périodes de forte sédimentation sont dictées par les cycles El Niño et La Niña où plusieurs configurations existent :

- La première est lorsque qu'un phénomène El Niño de forte intensité surgit, comme l'attestent les données disponibles de Mrica en 1991-1992. La sécheresse due à un épisode de Niño occasionne une moins bonne protection des terres qui vont être ensuite lessivées lors de la saison des pluies suivante et ainsi augmenter la dégradation. Ceci se traduit alors par une augmentation des taux de sédimentation.
- Le deuxième cas de figure est le renforcement de ce phénomène lorsqu'un événement La Niña succède à un Niño. Les précipitations, alors renforcées, vont amplifier l'érosion des sols par un lessivage plus important et, par conséquent, aboutir à une plus forte sédimentation dans les réservoirs. Ceci est le cas pour la période 1994-1996 pour les réservoirs de Mrica et Lahor notamment. La période 1997-2000 confirme cette tendance avec les réservoirs de Sengguruh, Sutami, Selorejo et Mrica. La période la plus récente ayant connue cette configuration est 2007-2008 où la majorité des réservoirs ont connu une augmentation notable de leurs taux de sédimentation.

La tendance générale sur toute la période montre une hausse des taux de sédimentation malgré la baisse des précipitations annuelles depuis le milieu des années 80 (Fig. 121, 122 et 124). Si cette période de forte sédimentation n'est pas caractérisée par une importance pluviométrique, la responsabilité en incombe alors aux interventions humaines ces dernières décennies. La *Reformasi* illustre bien le rôle de la déforestation qui, associée aux anomalies climatiques, a provoqué les taux de sédimentation les plus forts dans le réservoir de Mrica. Toutefois cette période montre pour le réservoir de Jatilhur une baisse des taux de sédimentation qui peut être expliquée par la protection que représentent les barrages de

Cirata et Saguling situés en amont. Même si ces derniers n'ont respectivement qu'une seule donnée, leurs taux de sédimentation font partie des plus élevés.

A partir de 2004, on peut observer qu'un grand nombre de réservoirs connaissent alors une augmentation brutale de leur taux de sédimentation pour atteindre leur valeur maximale entre 2006 et 2008. Cette période correspond à un enchaînement des phénomènes El Niño et La Niña. Toutefois, il s'agit d'une oscillation plus faible que celle ayant eu lieu entre 1997 et 2000. Ceci semble alors témoigner d'une recrudescence du phénomène de déboisement, surpassant alors les impacts climatiques.

En conclusion, ce chapitre montre que les réservoirs javanais connaissent de forts taux de sédimentation dus à une forte érosion des sols et à une dégradation des ressources, elles-mêmes accélérées par une forte croissance démographique. Ces taux trouvent leur paroxysme lors d'évènements extrêmes que représentent les oscillations El Niño et La Niña. Les vitesses de sédimentation peuvent être encore plus importantes lorsque des perturbations brutales viennent modifier sensiblement le milieu naturel javanais comme cela a été le cas lors de la *Reformasi*, grande crise économique et politique que l'Indonésie a connue à la fin des années 1990. Tous ces barrages sont sous l'autorité de trois organismes différents, les deux compagnies d'état *Jasa Tirta* et PLN d'une part et le Ministère des travaux publics d'autre part. La partie qui suit détaillera le rôle de ces acteurs afin de comprendre les modes de gestion de ces bassins et d'en déterminer leurs éventuels impacts sur les tendances récentes. S'il est nécessaire de s'interroger sur les mesures prises en faveur de la conservation des sols et de la protection des ressources en eau – dont les barrages sont un maillon clé –, il l'est plus encore de questionner leur efficacité.

CHAPITRE 6 : LA GESTION DES GRANDS BASSINS HYDROLOGIQUES JAVANAIS EN QUESTION

Depuis les années 1960, l'Indonésie – et plus particulièrement Java – a misé sur les barrages pour accompagner son développement. Ceux-ci remplissent de nombreuses fonctions, en particulier l'approvisionnement d'électricité et d'eau pour les grandes agglomérations de l'île. Ces ouvrages tiennent aussi un rôle prépondérant dans la gestion des flux liquides dus au balancement entre saison sèche et saison des pluies. Leur conservation – afin qu'ils puissent assurer le plus longtemps possible toutes ces fonctions – est un sujet auquel le gouvernement indonésien s'intéresse depuis plusieurs années. Ainsi, une attention particulière sera portée à la déforestation dont l'impact est important sur les rythmes de sédimentation, traduisant alors des problèmes dans la conservation des sols à Java. Ce chapitre dresse un portrait de la politique menée à ce jour, définissant la gestion des grands bassins javanais. Un regard critique sur ces mesures sera alors apporté.

I. De nombreux acteurs impliqués

Il s'agit ici de présenter tous les acteurs qui participent à la gestion de la ressource en eau et à la conservation des sols de l'île de Java. Cette présentation rendra compte d'une part du grand nombre de participants à la question de la gestion des ressources en eau mais aussi, et surtout, de la complexité d'un tel réseau.

A. Les organismes internationaux

Les organismes internationaux sont les principales institutions qui permettent d'engager de grands projets sur le long terme par leurs financements et leur appui technique en envoyant des experts superviser ces projets. Ces organismes sont les suivants :

1. Banque asiatique de développement - *Asian Development Bank (ADB)*



La Banque asiatique de développement est une banque de développement régionale créée en 1966 pour soutenir le développement économique et social

dans les pays d'Asie et du Pacifique en attribuant dons (*Grants*), prêts à taux avantageux (*Soft Loans*), ou encore une assistance technique (*Technical Assistance*). L'Indonésie fait partie de cette institution depuis sa création. Le bilan de l'ensemble des prêts approuvés à la fin 2008 montre que l'Indonésie est le principal client de la Banque asiatique de développement et se situe au second rang en termes d'assistance technique. De nombreux projets subventionnés par cette institution ont ciblé l'Indonésie, notamment pour la protection et de la réhabilitation des grands bassins-versants javanais (Tab.32).

Nom du projet	Objectifs	Année	Financement	Budget en US \$	Statut
<i>Integrated Citarum Water Resources Management</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2004	Assistance technique	1 000 000	Approuvé
<i>Integrated Citarum Water Resources Management</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2006	Assistance technique	275 000	Approuvé
<i>Integrated Citarum Water Resources Management</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2007	Assistance technique	460 000	Approuvé
			Don d'assistance technique	250 000	
<i>Integrated Citarum Water Resources Management Project</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2008	Global Environment Facility	200 000	Approuvé
<i>Institutional Strengthening for Integrated Water Resources Management in the 6 Cis River Basin Territory</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2008	Assistance technique	2 000 000	Approuvé
				1 000 000	
				5 000 000	
<i>Multitranches Financing Facility - Integrated Citarum Water Resources Management Investment Program</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2008	Ordinary Capital Resources	470 000 000	Approuvé
			Fonds de développement asiatique	30 000 000	
<i>Integrated Citarum Water Resources Management Investment Program - Project 1</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2008	Prêt	20 000 000	Approuvé
				30 000 000	
<i>Integrated Citarum Water Resources Management Investment Program PFR2</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2010	Assistance technique	1 000 000	Proposé
<i>Integrated Citarum Water Resources Management Investment Program - PFR2</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2011	Prêt	130 000 000	Proposé
<i>Support to Integrated Citarum Water Resources Management Investment Program - PFR2</i>	Gestion intégrée de bassin-versant	2012	Assistance technique	1 000 000	Proposé
<i>Flood Management in Selected River Basins</i>	Gestion des inondations	2003	Assistance technique	250 000	Clôturé
			Fonds hollandais	1 000 000	
<i>Flood Management in Selected River Basins Project (Phase II)</i>	Gestion des inondations	2009	Fonds spéciaux japonais	1 000 000	Approuvé
<i>Multitranches Financing Facility - Flood Management in Selected River Basins</i>	Gestion des inondations	2010	Ordinary Capital Resources	500 000	Proposé
<i>Flood Management in Selected River Basins - Project 1</i>	Gestion des inondations	2010	Ordinary Capital Resources	150 000	Proposé
<i>Flood Management in Selected River Basins - PFR2</i>	Gestion des inondations	2011	Fonds spéciaux assistance technique	1 000 000	Proposé
<i>Flood Management in Selected River Basins - PFR2</i>	Gestion des inondations	2012	Ordinary Capital Resources	600 000	Proposé

Tableau 32 : État des projets financés par la Banque asiatique de développement dans les bassins d'étude

2. Agence japonaise de coopération internationale - *Japanese International Cooperation Agency (JICA)*



L'Agence japonaise de coopération internationale est une institution japonaise indépendante (regroupant depuis 2008 la JICA sous son ancienne forme et la *Japan Bank for International Cooperation (JBIC)*) qui contribue à la promotion de coopérations internationales entre le Japon et ses partenaires des pays en développement. En Indonésie, son action se manifeste principalement sous la forme d'*Official Development Assistance (ODA) Loans*, c'est-à-dire des prêts à long terme et à faible taux d'intérêt. Son action en Indonésie dans la gestion des ressources en eau remonte à 1961 avec un investissement massif dans le bassin du Brantas avant de poursuivre dans le bassin du Solo et du Citarum. Ses champs d'action recouvrent essentiellement trois secteurs : le contrôle des inondations, l'irrigation et la production électrique. Pour les secteurs étudiés l'investissement total de la JICA s'élève à plus 1,3 milliard de yens soit environ 1 milliard d'euros répartis de la manière suivante (Fig.143) et dont les détails se trouvent en annexe 7.

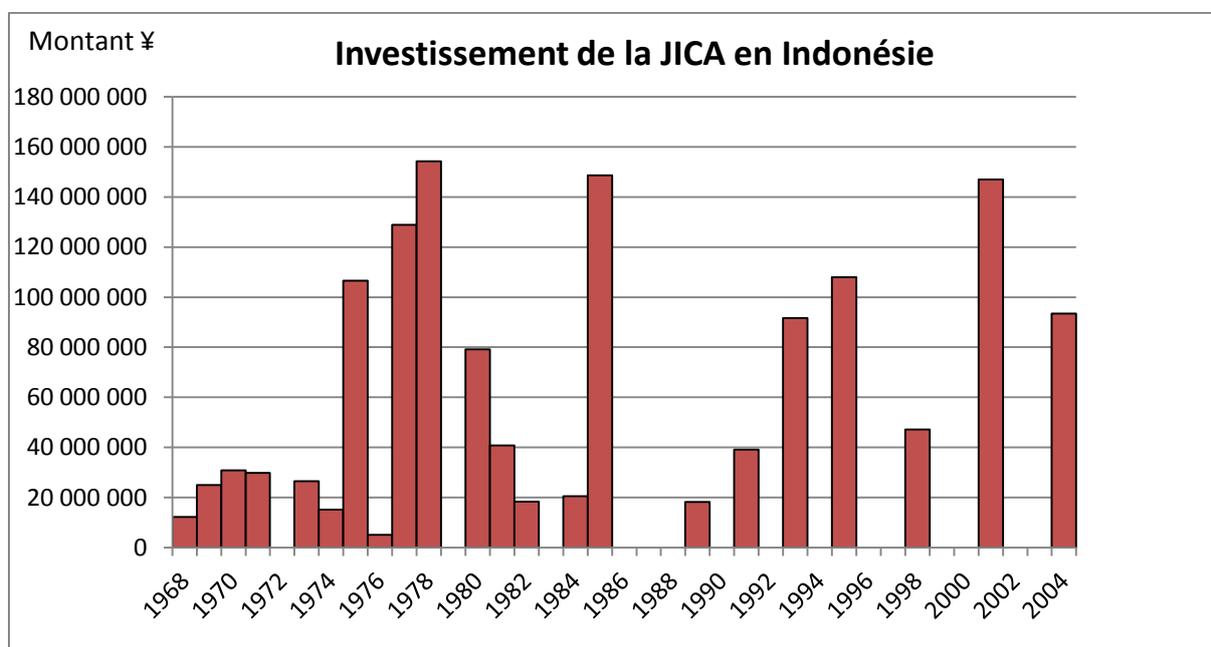


Figure 143 : Investissements de l'Agence japonaise de coopération internationale en Indonésie

3. Banque mondiale - *World Bank*



La Banque mondiale est une organisation internationale dont le rôle est l'appui financier et technique à l'ensemble des pays en développement. Elle regroupe deux organismes de développement distincts, la Banque internationale pour la reconstruction et le développement (BIRD) et l'Association internationale de développement (AID). L'institution est sous le contrôle de ses 186 pays membres. Ensemble, ils accordent aux pays en développement des prêts et des crédits à faible intérêt, ou bien encore des dons. Ces financements peuvent être attribués à des secteurs très différents les uns des autres, aussi bien à l'éducation et à la santé, qu'à l'administration publique et aux infrastructures, qu'au développement des secteurs financiers et privés, à l'agriculture ou encore à la gestion de l'environnement et des ressources naturelles. Leur seul objectif commun est d'apporter une aide à la réalisation de ces projets.

Nom du projet	Objectifs	Année	Financement	Budget en US \$
<i>Cirata Hydroelectric Phase (02) Project</i>	Hydroélectricité	1993	Loan IBRD	313 000 000
<i>Jatiluhur Water Resources Management Project</i>	Irrigation et drainage	1997	Loan IBRD	100 000 000
<i>Upper Cisokan Pumped Storage Power Project</i>	Hydroélectricité	2008	Loan IBRD	661 000 000
<i>Dam Operational Improvement and Safety</i>	Gestion des barrages	2009	Loan IBRD	70 000 000
<i>Dam Safety Project</i>	Gestion des barrages	1994	Loan IBRD	63 000 000
<i>West Tarum Canal Project</i>	Irrigation et drainage	1985	Loan IBRD	43 400 000

Tableau 33 : Projets supportés par la Banque mondiale dans les bassins d'étude

Nous voyons à travers la présentation de ces trois organismes le rôle prépondérant joué par l'aide internationale dans la gestion des ressources en eau en Indonésie. Le budget de ces projets est colossal et l'effort financier consenti est alors déployé sur des décennies.

En tant que programme développé par le gouvernement indonésien, les bailleurs multilatéraux et bilatéraux ont affecté des millions de dollars à la construction, à la réhabilitation et à l'entretien des *check dams* et des bancs de terrasses. Les efforts les plus visibles, les plus coûteux et les plus ambitieux ont été des projets financés par ces fonds étrangers au début des années 1970 sur des bassins fluviaux spécifiques. Le premier projet porta sur le Solo amont (*Upper Solo Project*) à Java-Centre avec des fonds provenant de

l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (*World Bank, 1993*). Avec quelques variations, des projets semblables ont concerné Java-Ouest, notamment les phases I et II du projet du bassin Citanduy (*Citanduy I and II River Basin Projects*) sur des fonds de l'Agence des États-Unis pour le développement international (*United States Agency for International Development – USAID*) de 1976 à 1988 (McCauley, 1988), et le projet de développement de l'agriculture en montagne (*Upland Farming Development Project*) dans le bassin de Cimanuk, financé par la Banque asiatique de développement entre 1986 et 1990.

La Banque mondiale a poursuivi ces efforts de 1994 à 2000 à travers un projet concernant le bassin amont du Cimanuk pour un montant de 31 millions de dollars (*Upper Cimanuk Watershed Project*) (Purwanto, 1996). Dans tous les cas, l'approche suivie a été celle initialement adoptée pour le projet *Upper Solo Project* : fourniture aux fermiers d'un « *package* » agro-technologique composé de graines et d'engrais, construction de *check dams* et de prises de caniveau, mais aussi d'une assistance portée aux fermiers pour l'aménagement de bancs de terrasses (FAO, 1976). Ainsi, en raison de plus de 20 ans de campagne intensive pour la conservation des sols, plus de 85% des versants de Java-Ouest sont aménagés en terrasses (Purwanto, 1996).

B. Les organismes gouvernementaux

Chaque projet financé par les différents organismes internationaux, est, en fonction de sa nature, confié à un ministère chargé de son exécution sur le territoire. Ces différents organismes d'état ont donc été une source d'information indispensable dans notre recherche et utile à la compréhension de leurs rôles respectifs dans la gestion des grands bassins javanais.

1. Ministère des travaux publics - *Departemen Perkejaan Umum (PU)*



De ce ministère, dépendent plusieurs départements en charge de la gestion des grands ouvrages de génie civil (autoroutes, ponts etc.). Le Département des ressources en eau (*Direktorat Sumber Daya Air*) régente au niveau national toutes les questions relevant de structures liées à l'eau comme les canaux d'irrigation et les barrages. Ce dernier est chargé, en théorie, de collecter les informations nécessaires à une

gestion intégrée des ressources en eau sur tout l'archipel indonésien. Sous tutelle de ce département des ressources en eau se situent au niveau régional les « *Balai Besar Wilayah Sungai* (BBWS) », chargés de mettre en œuvre la stratégie décidée au niveau du ministère et de collecter les données sur le terrain.

Rattaché à ce même ministère, le *Puslitbang SDA* (*Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air*) est une agence de recherche sur l'eau située à Bandung qui participe au projet initiés par le PU.

2. Ministère du plan - Agence nationale de planification et de développement - *Badan Perencanaan dan Pembangunan Nasional - (BAPPENAS)*



La fonction de ce ministère est de gérer tous les projets qui vont être implantés sur le territoire national. Cet organisme gouvernemental est chargé de déterminer les grands enjeux prioritaires pour le développement national et participe donc de manière plus ou moins visible aux grands projets issus des dons (*grants*) ou prêts à taux réduits accordés par d'autres états et organisations internationales en faveur du gouvernement indonésien (*loans*).

3. Ministère des forêts - *Departemen Kehutanan*



Créé en 1983, le Ministère des forêts est en charge de l'attribution des concessions forestières et des aires boisées classées sous le statut de parc naturel et donc d'une relative protection. En revanche, il n'est pas en charge des forêts non classées, qui sont alors sous la responsabilité des régions et des districts. Ce ministère joue un rôle clé dans la compréhension de l'évolution des surfaces boisées sur l'île de Java notamment grâce au *Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi* (*Balitklimat*) de Bogor, qui est l'agence de recherche gouvernementale en agronomie.

4. Ministère de l'agriculture - *Departemen Pertanian*



L'Indonésie est aussi l'un des principaux producteurs et exportateurs au monde de produits agricoles et de produits issus des cultures arbustives (caoutchouc, huile de palme, café etc.). Le ministère de l'agriculture est responsable de la politique agricole indonésienne et du rapport entre surfaces dédiées à l'agriculture, surfaces boisées et zones urbanisées.

C. Les entreprises publiques

Certaines entreprises publiques sont en relation étroite avec notre thématique de recherche. Les deux secteurs d'activité qui se trouvent sous la gestion d'entreprises publiques sont d'une part la gestion des grands bassins hydrologiques (SWS) et d'autre part l'exploitation hydroélectrique des barrages. Trois entreprises jouent un rôle majeur dans ces secteurs. Agissant comme opérateur sur le terrain, leur vision permet de mieux rendre compte de la gestion au quotidien des ouvrages.

1. *Perum Jasa Tirta - (PJT)*



Cette entreprise publique a été créée par le décret gouvernemental de 1990. Elle est responsable de l'utilisation du potentiel hydraulique de trois bassins stratégiques au niveau national. *Jasa Tirta* est chargée de la gestion des bassins et de la maintenance des barrages se situant dans son aire de compétence. Actuellement, les trois bassins sous l'autorité de cette entreprise sont étudiés dans notre recherche : PJT 1 assurant l'exploitation des bassins du Brantas et du Solo alors que PJT 2 créée en 1999 est spécialement dédiée au bassin du Citarum.

2. *Perusahaan Listrik Negara - (PLN)*



La compagnie d'état d'électricité est entièrement détenue par le gouvernement, représenté par le Ministère des entreprises publiques. PLN possède et commande toutes les infrastructures publiques de l'électricité en Indonésie, y compris la construction des centrales, la production d'électricité, la transmission, la distribution et la vente. PLN est le plus grand producteur d'électricité du pays. Au 31 mars 2007, sa production électrique était de 24,867 MW pour approximativement 36 millions de clients. L'exploitation hydro-électrique des barrages revient donc à cette entreprise.

3. *Indonesia Power*



Anciennement connue sous le nom de *PT Pembangkitan Jawa Bali I (PT PJB I)*, il s'agit de l'entité commerciale de PLN. Indépendante depuis 1995, elle a en charge la commercialisation d'électricité. Avec ses 127 implantations électriques d'une capacité totale de 8.888 MW, *Indonesia Power* est la compagnie la plus importante dans le secteur de la production d'énergie en Indonésie.

D. Les centres de recherche

Plusieurs grandes universités et centres de recherche associés participent également à la gestion des bassins-versants en Indonésie par les études menées dans ces secteurs et dans les campagnes de mesures.

1. *Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) - Jakarta*



Centre de recherche en climatologie et géophysique, cet organisme est en charge de l'acquisition de données climatiques à l'échelle nationale, et du suivi des cyclones tropicaux au sein de l'Organisation météorologique internationale.

2. *Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional (BAKOSURTANAL) - Cibinong*



L'origine de l'agence nationale de cartographie remonte à 1951 mais ce n'est qu'en 1969 que le *Bakosurtanal* prendra réellement la forme qu'on lui connaît aujourd'hui après la fusion du *Dewan Survey dan Pemetaan Nasional (DESURTANAL - National Board of Survey and Mapping)* et du *Komando Survey dan Pemetaan Nasional (KOSURTANAL - National Command of survey and Mapping)*. Toutes les cartes topographiques du territoire indonésien proviennent de cette agence.

3. *Volcanological Survey of Indonesia (VSI) - Bandung*

Rattaché au Ministère de l'énergie et des ressources minérales, le VSI est une agence de recherche gouvernementale sur les risques volcaniques et géologiques du territoire indonésien. Nous avons pu y obtenir de nombreuses informations concernant la géologie de nos secteurs d'études.

Généralement financés par une aide internationale (à plus de 50% selon le *Bappenas*), ce sont ensuite de nombreux intervenants sur le plan national qui œuvrent à la gestion de ces bassins. L'un des éléments essentiels à la bonne gouvernance de ces ouvrages se tient dans la réunion et la coopération de différents ministères responsables des activités impactant l'eau. Ce travail commun implique ainsi les ministères chargés des travaux publics, des forêts, de l'agriculture et de l'énergie, ainsi que ceux ayant une responsabilité sur le plan social ou environnemental comme pour les ministères de la santé et de l'environnement. Si cette gestion nécessite autant d'intervenants, chaque bassin sera aussi inévitablement

confronté à des demandes conflictuelles en termes de consommation d'eau domestique, d'irrigation, de protection de l'environnement, d'hydroélectricité et de loisirs, ainsi qu'à certains problèmes tels que la pollution ou la modification des débits.

II. L'organisation nationale du territoire, source de nombreuses problématiques

A. La gestion de la ressource en eau en Indonésie

1. Un découpage stratégique

La gestion des ressources en eau, en Indonésie, s'effectue par bassin hydrologique (*Satuan Wilayah Sungai – SWS*) c'est-à-dire que celui-ci englobe à la fois le bassin-versant (*Daerah aliran Sungai – DAS*) mais aussi tout le territoire irrigué par le cours d'eau le plus important. Selon l'enjeu que représente chacun de ces bassins, ils seront placés sous la tutelle de différents organismes se situant à différentes échelles d'autorité (Fig. 144). Avant 1965, tous les barrages en Indonésie ont été conçus, construits et exploités par le Ministère des travaux publics (PU). Désormais, seuls les bassins hydrologiques situés à cheval sur deux provinces sont encore dirigés directement par le Ministère des travaux publics tandis que ceux possédant de grands barrages d'importance nationale sont pilotés par une entreprise d'état, la *Jasa Tirta* ou la compagnie d'électricité d'état (PLN). Les autres bassins hydrologiques sont directement gérés par les provinces. Ce découpage permet, en théorie, de définir clairement les rôles de gouvernance, les limites hydrologiques ne correspondant pas toujours aux frontières administratives. Les bassins étudiés disposant de grands barrages ont donc été délégués à des entreprises d'état chargées à la fois de prendre les mesures nécessaires en faveur de la conservation des bassins mais aussi d'exploiter leur potentiel pour la fourniture en eau et électricité.

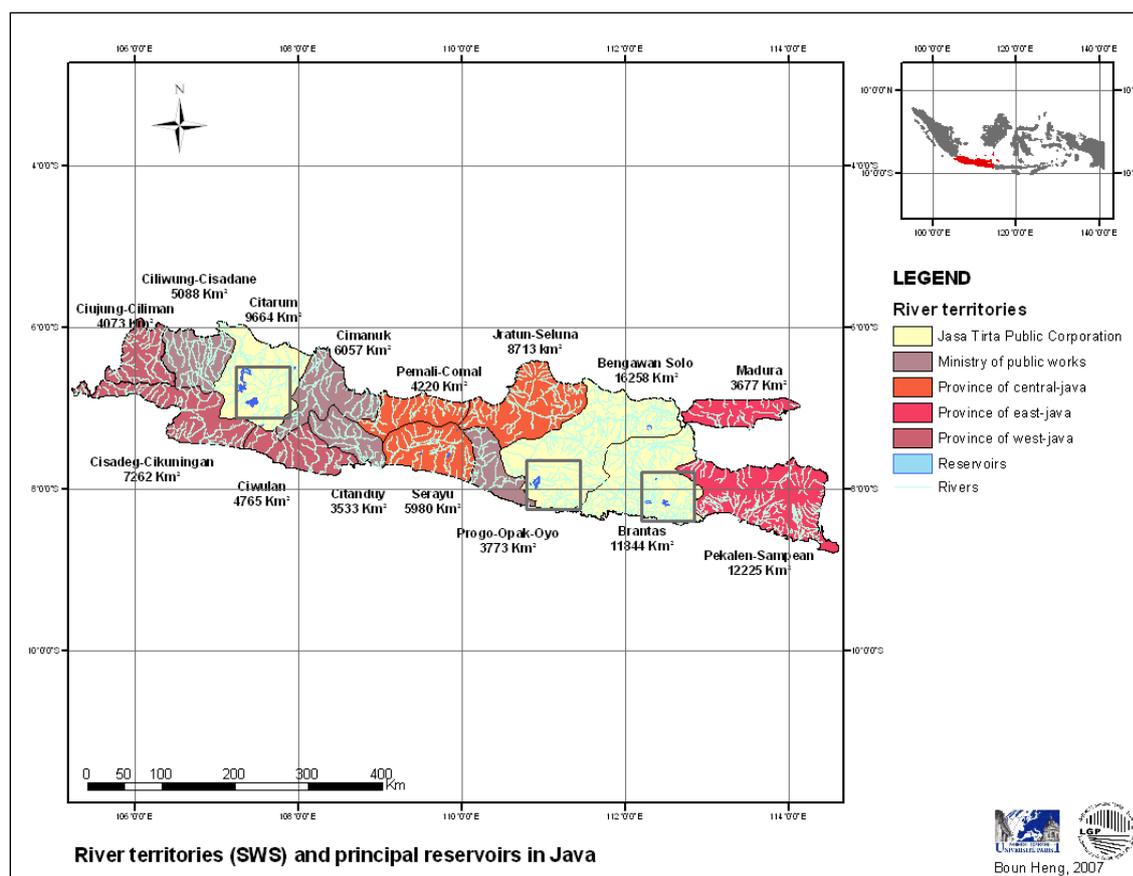


Figure 144 : Gouvernance des bassins hydrologiques à Java

Le cadre institutionnel pour la gestion des ressources en eau en Indonésie est divisé en trois niveaux administratifs.

- Au niveau national, le Ministère des travaux publics a l'autorité et la responsabilité de la coordination de l'ensemble des règlements d'urbanisme. La Direction générale des ressources en eau (DGWR) est responsable, quant à elle, de la mise en œuvre de la planification du développement, de la gestion et de la conservation. Enfin, le Ministère du plan (BAPPENAS) est en charge de la préparation des plans quinquennaux (*Repelita*) visant au développement des ressources en eau ainsi que de l'organisation des mesures de financement.
- Au niveau provincial, le gouvernement central a délégué le pouvoir de la gestion des cours d'eau à chaque province. Afin d'aider le Gouverneur dans la gestion des ressources en eau, un comité provincial (*Panitia Tata Pengairan - PTPA*) regroupe toutes les agences de l'eau des provinces. Ces dernières se réunissent périodiquement pour discuter de la gestion et des problèmes de répartition de la ressource en eau. Le *Dinas Pekerjaan Umum Sumberdaya Air (Dinas PSDA)* est

responsable quant à lui, au niveau provincial, de la planification annuelle du bassin. Il a aussi la possibilité de faire des propositions au comité provincial afin que ce dernier les soumette au Gouverneur pour examen et décision.

- Au niveau du bassin fluvial (SWS), le *Dinas PSDA* possède également une unité de gestion des eaux (*Balai Pengelola Sumberdaya Air - PSDA*). Les responsabilités qui lui incombent se situent dans la gestion de base de données, l'allocation de l'eau du bassin, la gestion de la qualité de l'eau des rivières et fleuves ainsi que la gestion des inondations. Le *Balai* est l'entité fonctionnelle de l'exploitation des services d'eau et de la mise en œuvre des politiques de conservation de l'eau.

Ces différents échelons expliquent ainsi que de très nombreux acteurs sont impliqués dans la gestion des ressources en eau, impliquant par conséquent de nombreux problèmes organisationnels présentés ci-dessous.

2. La multiplicité des acteurs dans la gestion des ressources en eau

S'intéresser à la gestion des bassins en Indonésie, c'est se confronter à une organisation complexe d'acteurs. Le décryptage du rôle de chacun et des relations qu'ils entretiennent s'avère souvent long et compliqué. Ainsi, pour en faciliter la compréhension les figures ci-dessous recensent les différents acteurs et leurs champs d'intervention dans la gestion des ressources en eau pour les bassins sous l'autorité des provinces (Tab.34) ou du gouvernement central (Tab.35). Tous ces organismes ont des rôles bien précis. On note cependant qu'il y a en réalité peu d'échanges entre les différents partenaires, tant au niveau horizontal que vertical. Les données restent ainsi cloisonnées au sein de chaque organisme, alors qu'elles pourraient être gérées de manière communautaire et profitable à tous. L'acquisition et les traitements de données apparaissent ainsi régulièrement redondants et/ou partielles, notamment au niveau des bassins qui ne sont pas gérés par le Gouvernement. Ce constat est le résultat de la politique de décentralisation, amorcée en 1999, qui a transféré une grande partie des pouvoirs du Gouvernement aux provinces, régions, départements et villes, sans leur en avoir systématiquement donner les moyens de remplir leurs fonctions. Les ressources en eau et les barrages ne sont donc plus gérés par le Gouvernement mais par des organismes qui manquent cruellement de moyens techniques mais également de personnels qualifiés pour mener ses missions à bien. La partie suivante va en détailler les principales répercussions et effets néfastes de cette décentralisation.

N°	Responsabilités et fonctions	Bassin sous l'autorité provinciale				Bassin sous l'autorité des régions ou départements		
		Balai PSDA (Provinsi)	Dinas Provinsi	Balai PDAS (Dep.Hut)	Dinas District/Municipality	Dinas District/municipality	Dinas Province	Balai PDAS (Dep.Hut)
1	Inventaire des ressources en eau							
a	Gestion des données hydrologiques	X				x		
b	Gestion des données hydrométéorologiques	X				X		
c	Gestion des données hydrogéologiques				x	X		
d	Gestion des données sur la qualité de l'eau	X	x		X	X		
e	Analyse de la disponibilité de l'eau	X				X		
f	Analyse du bilan hydrique	X						
2	Planification							
a	Modèle de gestion des ressources en eau	x				X		
b	Planification de la gestion des ressources en eau	X		x		x		
3	Conservation							
a	Protection et durabilité de l'eau							
	1). Aménagement des sols			x				
	2). Gestion de la végétation			X				
	3). Gestion des droits	X				X		
b	1). Stockage de l'eau	X				X		
	2). Rendement de l'eau	X				X		
	3). Gestion des eaux souterraines							
c	Gestion de la qualité de l'eau	X			X	X	X	
d	Contrôle de la pollution	X			X	X		x
4	Utilisation							
a	Gestion des sources	x				X		
b	Attribution des licences	X				X		
c	L'utilisation des ressources en eau	X			x	X		x
d	Développement des ressources en eau	X			X	x		X
e	Effort sur l'eau							
5	Mitigation des catastrophes							
a	Prévention	X			X	x		
b	Protection	X			x	X		X
c	Rétablissement	X				X		
6	Construction, exploitation et entretien des ressources en eau							
a	Permis de construire	X				X		
b	Exploitation et entretien	X				X		
7	Système d'information sur les ressources en eau							
		X				X		
8	Intervenants pour la responsabilisation							
a	Éducation et formation	X				X		
b	Recherche et développement	x				X		
c	Partenariat							

Tableau 34 : Organisation de la gestion de la ressource en eau pour les bassins sous l'autorité des provinces

N°	Responsabilités et fonctions	Gouvernement							Province					Département Ville		Balai PDAS (UPT. Dep. Forestry)		
		Ministère des travaux publics	Balai Besar	Balai River Bassin	Perum Jasa Tirta	Ministère de l'environnement	BMKG	Ministère des forêts	Ministère de l'agriculture	Ministère de l'énergie	Cleaning and Gardening	Balai PSDA (Province)	Dinas PSDA (Province)	Agence forêts (Province)	Agence énergie (Province)		Bapedalda	Agences municipales / départementales
1	Inventaire des ressources en eau																	
a	Gestion des données hydrologiques	X		x	x	X					x	X				x		
b	Gest° des données hydrométéorologiques	X		X	x	x					X	X				X		
c	Gestion des données hydrogéologiques																	
d	Gestion des données sur la qualité de l'eau	X		x	X					X	x			X		X		
e	Analyse de la disponibilité de l'eau	X		X	X					x	X					X		
f	Analyse du bilan hydrique	x		x	X					x	x					X		
2	Planification																	
a	Modèle de gestion des ressources en eau																	
b	Plan. de la gestion des ressources en eau		x		x	x												X
3	Conservation																	
	Protection et durabilité de l'eau																	
a	1). Aménagement des sols		X	X	x													
	2). Gestion de la végétation	X		x	X			x	x				x			x	x	x
	3). Gestion des droits		X		X					x	x							
b	1). Stockage de l'eau		X		X													
	2). Rendement de l'eau		X		X					x	X							
	3). Gestion des eaux souterraines															X		
c	Gestion de la qualité de l'eau			X	x	x				X	x			X				
d	Contrôle de la pollution					X								X		x		
4	Utilisation																	
a	Gestion des sources		X		x	x										X		
b	Attribution des licences		X		X					x	X					X		
c	L'utilisation des ressources en eau									X	X							
d	Développement des ressources en eau		X													x		
e	Effort sur l'eau		x		x													
5	Mitigation des catastrophes																	
a	Prévention		x	x	x	X	x				X	x	X	x	X	x		
b	Protection		X	x	x	X					X	X	X	X	X	X		
c	Rétablissement		x	x	x	X					x	X	x	X	x	X		
6	Construction, exploitation et entretien de la ressource en eau																	
a	Permis de construire	X														X		
	Dans les zones d'irrigation		X													X		
	In water resources		X		X					x	x							
b	Exploitation et entretien		X		x													
7	Système d'information sur les ressources en eau																	
			x	x	x	x					x	x	x	x	x	X		
8	Intervenants pour la responsabilisation																	
a	Éducation et formation		x	X	x	X					x	X	x	X	x	X		
b	Recherche et développement		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X		
c	Partenariat		X	x	X	x					X	x	X	x	X	x		

Tableau 35 : Organisation de la gestion de la ressource en eau pour les bassins sous l'autorité du gouvernement central

B. La gestion des bassins javanais face à la décentralisation

A la suite de la *Reformasi*, qui a marqué plus de 30 ans de dictature du Général Suharto, le Gouvernement a été poussé à l'octroi d'un pouvoir élargi au niveau des provinces et des régions. Connue sous le nom d'*Otda (Otonomi Daerah)*, la loi de décentralisation de 1999, entrée en vigueur en 2001, a permis aux différentes régions de l'archipel indonésien de devenir les principaux gestionnaires de leur territoire et des ressources s'y trouvant. De sérieuses conséquences résultent à l'heure actuelle de ce choix politique, ayant un impact direct sur la sédimentation des réservoirs.

1. Les problèmes de la décentralisation sur la gestion du territoire

La décentralisation est le fruit d'un mouvement d'autonomie né à la chute du gouvernement Suharto. Face aux risques de morcellement du pays, la législation indonésienne a profondément été transformée par le transfert de pouvoirs aux échelons provinciaux et régionaux. Après plus de trois décennies d'une gestion hyper centralisée où les ressources du pays ont été pillées en faveur de la classe dirigeante et des proches du pouvoir, la volonté a été de redonner leur place aux populations locales en les intégrant aux processus de décision. Des problèmes sont toutefois apparus pour plusieurs raisons. Les lois assez floues de cette décentralisation n'ont pas permis d'encadrer avec précision les attributions de chacun. Ce sont en fait trois niveaux de décision qui ont été créés, au niveau de la province (*propinsi*), de la région (*kabupaten*) puis du district (*kecamatan*).

Le Bappenas (Ministère du plan) a constaté en 2010 que le gouvernement indonésien était désormais confronté à un environnement réglementaire caractérisé par le chevauchement de règlements provinciaux et locaux, contradictoires dans bien des cas. Dans le cadre du changement de politique de décentralisation du Gouvernement, certains districts ont su saisir cette opportunité pour améliorer leurs services publics et créer des économies locales plus favorables aux entreprises. Dans de nombreux districts, cependant, la décentralisation a conduit à une abondance de nouveaux règlements contribuant à une réglementation de plus en plus complexe. Le Bappenas relève également que cet environnement est caractérisé par des règlements qui peuvent : (a) être développés en l'absence d'études rigoureuses nécessaires ; (b) se chevaucher et / ou être source de conflit; (c) ne pas protéger l'intérêt public ; (d) ne pas voir de force exécutoire ; (e) permettre une taxation discriminatoire et globale ; (f) contribuer à l'absence d'un environnement réglementaire transparent.

Cette délégation de pouvoir au niveau provincial n'a donc pas été accompagnée des moyens suffisants pour accomplir les nouvelles attributions dont les provinces ont la charge. Ceci explique en grande partie la dégradation rapide des sols et de la ressource en eau. En effet, au niveau local, force est de constater que les acteurs n'ont que très peu de moyens financiers et de ressources humaines pour lutter contre le déboisement et la pollution des cours d'eau par exemple. Ces faiblesses institutionnelles limitent alors l'ampleur de la décentralisation de la gestion. Après avoir connu sous Suharto une centralisation basée sur la corruption et le déboisement illégal de millions d'hectares, la décentralisation qui a suivi – et de son manque de moyens alloués aux nouvelles entités créées – n'a alors que renforcé les problèmes de gestion du territoire et continué à aggraver le défrichement des versants javanais.

2. L'impact de l'*Otda* sur les surfaces boisées

Les ressources forestières durant cette période ont été une des principales victimes de cette transformation du paysage politique indonésien. La gestion des forêts, auparavant entièrement administrée par le Ministère des forêts, a fait l'objet d'un partage de ses attributions avec la reconnaissance du droit coutumier en 2000 (*adat*), permettant aux populations de disposer de leurs terres. Les contours imprécis de cette loi ont alors favorisé de nombreuses dérives. La première d'entre elles a été le mouvement populaire qui a commencé lors de la *Reformasi* où les populations locales, trop longtemps spoliées, ont repris possession de leurs terres en défrichant massivement les versants afin d'y installer des cultures. La seconde a été l'autorisation accordée aux élus locaux par le Gouvernement de pouvoir attribuer des concessions de 100 ha de forêts à la population locale ou encore aux investisseurs. La décentralisation a ainsi permis aux élus locaux d'asseoir leur pouvoir avec des pratiques plus ou moins corrompues, que le manque de clarté législatif a favorisé. La concession des surfaces agricoles est apparue comme un moyen pour les élus locaux de garder acquis le soutien de leurs concitoyens et d'investisseurs importants. Ces accords se sont révélés d'autant plus nécessaires pour les élus locaux lorsque ceux-ci sont devenus tributaires de leurs concitoyens par la mise en place d'élections législatives au suffrage direct depuis 2004 (date de modification de la Constitution recadrant la loi sur la décentralisation de 1999). Cette mesure a alors engendré, dans un contexte de corruption bien établi, un défrichement continu. On peut alors comprendre que le déboisement n'ait pas cessé depuis

l'Ordre nouveau, mais qui sous une forme différente, aurait des conséquences encore plus rapides dans certains secteurs.

Le problème de la déforestation à Java, et d'une manière générale en Indonésie, ne prendra pas fin tant que le Gouvernement n'optera pas pour une réelle politique engagée dans le développement durable. En effet, les superpositions de lois relatives à la constitution et à celles des régions déresponsabilisent l'État comme les provinces dans leurs rôles de reboisement. Alors que chacun de ces corpus de lois imposent à chaque entité cette responsabilité de préserver les forêts, tous s'en dédouanent en condamnant l'autre autorité de ce manquement, obligation pourtant inscrite dans la Constitution indonésienne.

La loi de décentralisation a par ailleurs défini une nouvelle fiscalité pour les régions. Celles-ci se voient désormais en charge de leur propre budget, de la génération de leurs revenus et de la gestion de leurs ressources (hormis pour le gaz et le pétrole). Cette nouvelle définition budgétaire a alors accéléré le processus de déforestation, perçue comme une ressource financière immédiate. L'État lui-même, en y indexant une forte taxation y trouve aussi son propre avantage. Raison pour laquelle le Gouvernement n'a peut-être pas intérêt à reformuler son corpus juridique, ni à définir clairement les rôles du Ministère des forêts, des provinces, des régions, des villes, des communautés de droit coutumier et des communautés de forêts, c'est-à-dire de tous les nombreux acteurs nés de cette décentralisation, dont beaucoup sont sous la coupe des exploitations forestières, voire des exploitants illégaux. La politique d'autonomie des régions a finalement exacerbé les sentiments de profits individualistes en laissant l'intérêt général au second plan. Et tout comme lors de la *Reformasi*, il est malheureusement à déplorer que les forêts soient encore considérées comme une source de revenus immédiats et non comme une ressource à gérer sur le long terme.

Les barrages se trouvent au carrefour des deux problématiques évoquées ci-dessus puisqu'ils ont pour fonction d'assurer une gestion plus harmonieuse des ressources en eau tout en dépendant fortement des conditions des secteurs en amont. Le chapitre 5 a montré la relation existante entre la déforestation et les taux de sédimentation observés dans les réservoirs javanais. Cette déforestation encore en cours sur les hautes terres de Java semble être une conséquence directe de l'*Otda* et la cause des forts taux observés sur les figures

141 et 142 pour la période 2006-2007. Cette période, malgré des oscillations plus faibles des phénomènes El Niño (faible) / La Niña (modéré) enregistre des taux de sédimentation en hausse pour la grande majorité des réservoirs javanais et des taux encore jamais atteints pour d'autres (Wonogiri, Bening et Jatiluhur).

La complexité de la gestion des barrages réside *de facto* dans le choix de mesures devant être prises en amont, pour des résultats ne se faisant principalement ressentir qu'en aval des ouvrages. Sans résolution coordonnée de ces problèmes, il est à craindre que les taux de sédimentation restent toujours aussi élevés dans le futur.

III. La mise en eau des réservoirs à la source d'une perturbation des zones amonts

Si les vertus des barrages ont été développées dans cette thèse il n'en est pas moins que leurs constructions ont un impact environnemental et social fort et entraînent alors une déstabilisation du milieu pouvant aboutir à une forte sédimentation des réservoirs. Les habitants se trouvant sur le site du barrage en projet et dans la zone qui va être ennoyée par le réservoir vont être déplacés le plus souvent contre leur gré. Ces politiques de déplacements peuvent être source de nombreux problèmes si un accompagnement adapté n'est pas mis en place. Ces problèmes sont exacerbés à Java du fait de la forte densité de population qui rend d'autant plus périlleux ces déplacements du fait du grand nombre de personnes concernées. L'impact financier de ces déplacements et de la relocalisation induite par ces dernières varient entre 28% et 40% du coût total du projet, démontrant ainsi l'importance de trouver des solutions adaptées.

A. L'étude du déplacement forcé des populations

Les réservoirs occupent à Java une superficie de plus de 400 km² (Indodanau, 1997). Ces surfaces en fond de vallée et maintenant en eau étaient densément peuplées de par l'activité rizicole. Les projets successifs de barrage à Java ont donc forcé le Gouvernement à la mise en place de solutions pour organiser le déplacement des zones allant être ennoyées par la mise en eau des réservoirs. Les banques multilatérales, principales source de financement des barrages en Indonésie, ont étudiés la question de ces déplacements forcés.

Les travaux de Thayer Scudder ont analysé les procédures de déplacement des populations suite à l'aménagement de projets de barrage financés par la Banque mondiale. En effet, la prise en compte du déplacement des populations est un critère important dans ces programmes financés par les organismes internationaux. Il s'agit d'offrir aux populations déplacées des compensations en leur allouant de nouvelles terres ou un dédommagement financier.

1. Des zones densément peuplées par des habitants attachés à leurs terres

En Indonésie, ces déplacements ont coïncidés avec la politique de transmigration que le Gouvernement a mis en place pour favoriser le déplacement des zones densément peuplées de Java vers les îles qui l'étaient moins, comme Kalimantan ou Sumatra. Toutefois, on s'aperçoit d'un attachement fort à la terre de ces populations. Une étude menée sur les réservoirs de Cirata et de Saguling a montré que seulement 4% des 10 626 familles déplacées ont choisi l'offre de transmigration et tandis que l'immense majorité a préféré rester au plus près du secteur ayant fait l'objet de l'expropriation (Roquet et Durocher, 2006). Ce faible pourcentage met en lumière l'analyse erronée du Gouvernement qui, par l'intermédiaire de PLN, avait estimé que 79% des familles se tourneraient vers l'offre de transmigration (Nakayama, 2005). Cette volonté de ne pas quitter les terres sur lesquelles ces familles sont installées, parfois depuis plusieurs générations, trouve sa source dans le rôle structurant de la communauté. En effet, la grande crainte est de se retrouver coupé de ses liens sociaux suite à une expropriation sans être certain d'être pleinement intégré dans le nouveau tissu social. Tout ceci étant exacerbé par le contexte de Java où la densité rurale est extrêmement forte, ce qui rend alors les conditions de réinstallation complexes pour les populations déplacées.

2. Un appauvrissement des populations déplacées

La migration faisant suite à la mise en eau d'un barrage entraîne très souvent une paupérisation des populations déplacées, causée par des contreparties non adaptées et souvent insuffisantes notamment lorsque les indemnisations se font en espèces (Cernea, 1998). En Indonésie, les populations déplacées dus à des opérations de développement, comme c'est le cas lors de la construction de barrages, n'ayant pas accepté au programme de transmigration du Gouvernement reçoivent une compensation financière selon un

barème évaluant le coût de leur terrain. Elles essayent alors de se reloger par elles-mêmes dans le secteur. Les familles de la région de Saguling qui ont reçu une indemnisation en espèces en 1983 se sont retrouvées quelques années plus tard avec une perte de terres de 47% et des revenus ayant chuté de 50% (Université Padjaran, 1989). L'accès aux ressources n'est pas pris en compte dans cette indemnisation puisque les projets de déplacement gouvernementaux ne compensent pas les pertes de biens communautaires, tels que les zones boisées par exemple. Alors que l'on sait que la population en majorité agricole tire aussi leurs revenus de l'exploitation de ces ressources. Tous ces facteurs contribuent à ce que ce soit ces populations qui subissent les méfaits de la construction des barrages. Les bienfaits profiteront avant tout à la population en aval des ouvrages. Un réel souci d'équité dans le profit de ces projets de développement apparaît alors. La grande majorité des études sur le sujet s'accorde ainsi à dire que la compensation « terre pour terre » est devenue une exigence primordiale au succès d'un programme de remplacement des populations déplacées.

3. Des mesures positives aux évolutions problématiques

Face au manque d'engouement suscité par le programme de transmigration, le Gouvernement a décidé de promouvoir l'aquaculture sur les réservoirs de Saguling et de Cirata lors dès leur mise en eau. Le succès de cette activité s'est immédiatement fait ressentir pour les 3 000 familles (sur 10 726 familles concernées par le déplacement) ayant intégré ce projet puisqu'elles ont vu leur situation s'améliorer de façon notable par rapport à leur activité précédente. La Banque asiatique de développement avance même des chiffres atteignant 240% d'augmentation de leurs revenus (2000). En 1996, les revenus dégagés par l'aquaculture (24 millions de dollars) ont été cinq fois plus importantes que les pertes estimées de la filière rizicole disparue par la mise en eau des réservoirs (Costa-Pierce, 1998). Ce succès a alors provoqué le retour de nombreux habitants, qui avaient quitté le secteur, attirés par l'amélioration des conditions économiques, mais également l'arrivée de nombreuses personnes hors des communautés locales concernées par le déplacement initial. En 1996, 52% des cages à poissons étaient devenues la propriété de personnes n'ayant pas été touchées par un déplacement, mais qui avaient simplement racheté les permis d'exploitation. Sachant qu'un permis correspond à une cage, on peut comprendre la forte augmentation de population par l'arrivée de nouveaux migrants. Les familles ayant revendu leur droit d'exploitation sont malgré tout restées dans le secteur en conservant une

activité agricole qui a donc nécessité le défrichement de nouvelles terres pour y installer leurs cultures. Le développement de l'aquaculture n'a alors fait que renforcer la pression démographique autour des réservoirs favorisant ainsi la perturbation de ces derniers comme il l'a été démontré dans le chapitre 5. Si l'exemple des barrages de Saguling et de Cirata ont montré que des solutions existent pour limiter l'impact économique et social du déplacement des populations, on s'aperçoit également que si celles-ci ne sont pas rigoureusement appliquées et suivies sur le terrain, elles peuvent alors devenir elles-mêmes la source de problème et impacter la sédimentation des réservoirs.

B. L'impact du déplacement des populations sur les taux de sédimentation

Tous les réservoirs n'ont pas eu de plan aussi élaboré pour minimiser l'impact du déplacement des populations même si nous avons montré les dérives de ce système et son impact sur la sédimentation des réservoirs. Cependant, dans la grande majorité des cas de déplacement de population en lien avec la construction des réservoirs, les personnes concernées ont choisi d'être indemnisées financièrement et tenter par elles-mêmes de se reloger aux abords du réservoir. Une autre problématique apparaît alors dans la réinsertion des 500 000 personnes concernées par le déplacement dans des secteurs avoisinant déjà les 1 200 hab./km².

1. La réinsertion des populations déplacées dans des zones fortement peuplées

Très peu de personnes ont accepté le programme de transmigration du Gouvernement en préférant rester dans leur région d'origine. Pour cette population majoritairement agricole il leur a alors fallu trouver de nouvelles terres afin de reprendre leur activité. Dans un contexte de zones rurales très peuplées, ceci s'est alors traduit par une colonisation des versants aux abords immédiats du réservoir et par conséquent d'un défrichement important et d'une accélération de la dégradation des sols. Ces acquisitions de terres ont fait remonter la limite terres agricoles / surfaces boisées jusqu'à faire disparaître tout couvert forestier dans certains secteurs. Les processus érosifs ont alors été favorisés sur ces versants et ont contribué au remplissage rapide de ces derniers. L'installation d'un barrage dans des zones densément peuplées pose alors de sérieux problèmes si des alternatives viables ne sont pas trouvées dès la phase de projet. Les barrages de Java se trouvent alors confrontés à ce paradoxe d'accompagner la croissance économique de l'île au profit de la population, tout

en en fragilisant une part de ses habitants. De la même manière, l'installation d'un barrage, provoquent un déplacement de population, en général sur les hauts versants en amont. La densification de ces zones se répercutera ultérieurement par une sédimentation accrue dans les réservoirs construits, qui pour leur part bénéficieront principalement aux populations en aval.

Même si les causes de la forte sédimentation des réservoirs javanais sont bien connues (défrichement des versants et oscillations climatiques), les facteurs sociaux multiples montrent bien la complexité de la gestion de ces grands bassins. Le contexte politique de l'archipel permet aussi de comprendre l'évolution de la gestion des surfaces boisées et de la protection de la ressource en eau lors des dernières décennies. La *Reformasi* et la loi de décentralisation se traduisent par des mutations profondes du paysage politique entraînant une perturbation du milieu, dont les rythmes de sédimentation des réservoirs peuvent témoigner. Aujourd'hui, on constate que les mesures de protection et de conservation prises jusqu'à ce jour n'ont jamais permis de freiner la déforestation. Les conséquences de celles-ci, au-delà des questions environnementales, se révèlent comme la cause majeure de l'accélération de la sédimentation dans les réservoirs.

CONCLUSION

Les réservoirs permettent de témoigner des processus sédimentaires qui ont lieu en amont du fait du piégeage des sédiments qu'occasionnent les barrages. Ils constituent alors des marqueurs de ces perturbations environnementales et ceci grâce à l'analyse des rythmes de sédimentation. Pour retracer l'histoire de la sédimentation de chacun de ces retenues, il s'agit d'analyser les facteurs à l'origine de l'érosion dans le bassin ainsi que leur transport dans les cours d'eau à destination des réservoirs où les sédiments s'accumuleront alors.

L'environnement javanais se prête parfaitement à ce type d'étude puisqu'il présente un cadre naturel favorable à une forte érosion des sols sur ses hauts versants d'origine volcanique. Le climat tropical de mousson ainsi que les anomalies climatiques que représentent El Niño et La Niña entraînent une érosion accélérée des sols sur les versants. Les précipitations de forte intensité en saison des pluies provoquent régulièrement quant à elles, des crues de grande ampleur qui participeront à un transfert rapide des produits de l'érosion vers l'aval. Le temps de réponse entre la dégradation des sols et le dépôt dans les réservoirs s'avère alors très court, permettant d'observer les liens de causes à effets.

Cette recherche est d'autant plus importante du fait que ces grands réservoirs aient été installés dans des secteurs densément peuplés. L'importance stratégique de ces barrages est tout à fait capitale. En effet, ils permettent de garantir une gestion plus efficace de la ressource en eau en assurant la distribution de celle-ci de manière raisonnée pour des secteurs tels que l'irrigation des terres agricoles, tout comme la production d'énergie ou l'approvisionnement en eau des plus grandes métropoles indonésiennes. Les grands barrages javanais conditionnent ainsi directement la vie de plusieurs millions d'Indonésiens. Les enjeux humains et économiques de sa bonne exploitation sont, par conséquent, indéniables. L'analyse s'est particulièrement attachée à l'étude de quatre des plus grands bassins fluviaux de Java afin d'en observer les forts taux de sédimentation et de s'interroger sur leurs origines : sont-ils le fait de perturbations à l'échelle de l'île ou plutôt de facteurs propres à chacun des bassins ?

L'objectif a également été d'étudier les périodes ayant connu des vitesses plus élevées et d'en déterminer les causes. Afin que ces barrages puissent aujourd'hui assurer leurs fonctions le plus longtemps possible, il est désormais fondamental de comprendre les processus concourant au comblement des réservoirs.

Dans le but d'étudier le transfert des matériaux à travers l'hydrosystème, des zones d'arrachement aux zones de dépôts, et d'en comprendre les processus et les rythmes qui commandent ces transferts, de nombreuses données ont été acquises et analysées à l'aide d'outils spécifiquement créés et dédiés à leur analyse.

Cette recherche s'est appuyée sur la collecte de données secondaires quant aux volumes déposés dans les réservoirs afin de pouvoir en analyser les taux et les rythmes de dépôts. Dans le cadre de la compréhension de ces processus de comblement, l'analyse des données hydroclimatiques depuis les années 1960 a apporté, pour sa part, un éclairage sur les vitesses de transfert dans les bassins. Ces données ont également permis d'observer l'évolution des tendances sur ces cinquante dernières années. Toutes les données collectées ont ensuite été intégrées dans une base de données créée à cet effet permettant un archivage et une étude plus efficace. En effet, la création d'outils dédiés s'est avérée nécessaire. Car bien que différentes agences internationales aient tenté de mettre en place des outils afin de remédier à ce problème de sédimentation accélérée, ces tentatives de création ne concernaient que les programmes sur lesquels ils étaient engagés, sans visée globale et sans suivi de ces outils dans le temps. Les différentes données de ces programmes restaient, quant à elles, cloisonnées dans différentes institutions. Face à ce constat et dans l'objectif de mener cette recherche à bien, une base de données a alors été conçue afin de pouvoir traiter ces données de manière efficace. Utilisant un logiciel simple, facile d'accès et peu coûteux, il semble désormais possible de pouvoir étendre son utilisation à de multiples acteurs afin d'y intégrer de nouvelles données. L'architecture de cette base de données s'est voulue dès le départ la plus large possible afin de mettre en place un outil communautaire utilisable par tous.

Ainsi, si l'analyse diachronique d'images satellitaires a permis à son tour de mettre en évidence les profonds changements de l'utilisation des sols à Java en s'intéressant notamment à l'évolution des surfaces boisées sur les versants javanais, la création d'un SIG a

permis l'intégration de toutes les données digitales collectées au sein d'un seul et même outil afin d'en extraire les cartes présentées dans cette étude. Cet outil évolutif, couplé à des mesures effectuées régulièrement sur le terrain, a permis de disposer d'éléments complémentaires dans la compréhension des processus d'érosion dans les bassins étudiés.

Toutefois certaines précautions ont dû être prises dans l'interprétation des résultats. En effet, les taux de sédimentation observés étaient fortement tributaires de la qualité de l'acquisition des données et de la régularité de ces dernières. Aussi, pour certains barrages du fait d'un manque de suivi, les données n'ont pu démontrer qu'une tendance lissant la hausse ou la baisse des taux de sédimentation dans les périodes situées entre deux échosondages. Ces données ne pouvaient alors représenter de fluctuations interannuelles. Les données, souvent partielles voire totalement erronées, ont été une contrainte à prendre en compte dans la compréhension des processus. Il a donc été essentiel d'apporter une attention particulière à la qualité des données et de les analyser par la suite avec le recul nécessaire.

Le fruit de ce travail, de par le nombre conséquent de données collectées et leur traitement par la création d'un outil créé à cet effet, a permis d'arriver aux conclusions suivantes se divisant entre origines naturelles et origines anthropiques :

- L'analyse des données récoltées montre de manière quantitative la relation des précipitations et de leurs débits avec la sédimentation (1998-2000 et 2006-2008).
- Les phénomènes El Niño et La Niña contribuent à l'accélération de la sédimentation, en particulier lorsque qu'un évènement La Niña succède à un Niño.
- L'étude s'appuyant sur les images satellitaires a permis de constater l'ampleur des défrichements sur les versants javanais. Ainsi, la période de la *Reformasi* (1998-2000), a nettement impacté l'augmentation de la sédimentation durant ces deux années en laissant libre court à une déforestation sauvage. D'une manière générale, on peut désormais affirmer que les défrichements massifs que connaît Java depuis la fin des années 1990 ont aujourd'hui des conséquences plus graves que les phénomènes climatiques dans la production récente des taux de sédimentation.

- La forte contribution d'une sédimentation à nouveau anthropique – mais cette fois-ci d'origine « urbaine » – jouent à son tour un rôle dans le processus de comblement des réservoirs. Bien que restants à quantifier avec précision, la mauvaise gestion des déchets, la pollution industrielle et la surexploitation des lacs de barrages contribuent aussi, dans des proportions non négligeables, à la sédimentation des réservoirs.
- Les taux enregistrés depuis 2004 font état d'une hausse généralisée des taux de sédimentation pour la plupart des réservoirs. Les problèmes de gouvernance liée à la décentralisation, qui s'inscrit dans un manque de clarté juridique quant aux responsabilités des différents acteurs, vient à expliquer cette hausse.

L'étude des réservoirs apparaît ainsi comme un bon indicateur des perturbations à l'échelle locale comme nationale, aussi bien en termes physiques qu'anthropiques. Toutes les données acquises et leur analyse pourront désormais contribuer à améliorer la conservation des sols dans les grands bassins-versants stratégiques de l'archipel indonésien. Cette approche globale a permis de déterminer les facteurs majeurs concourant à l'accélération de la sédimentation à Java et de dresser pour la première fois un bilan complet en étudiant l'évolution de tous les grands barrages. Ainsi, le résultat chiffré de cette recherche s'apparente à près de $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ de sédiments retenus par les barrages depuis leur mise en service, qui réduisent alors la quantité de sédiments atteignant les côtes d'environ $70 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$.

Il s'agit maintenant de partager les résultats de ces travaux avec les différents partenaires locaux et de consolider les outils créés afin de continuer à l'alimenter et de le faire évoluer pour qu'il se rapproche au plus près des attentes des utilisateurs quotidiens.

Cette recherche montre que la gestion intégrée doit devenir une règle de principe pour gérer les grands bassins dotés de barrages. Sans une bonne concertation entre les différents acteurs, la gestion ne pourra être efficace et entrainera par conséquent une recrudescence des phénomènes menant au comblement des réservoirs. Il s'agit de trouver des réponses globales qui permettront de gérer de façon harmonieuse les réservoirs dans les décennies à venir en tenant compte à la fois de la protection des sols, des ressources en eau mais surtout des populations qui occupent ces territoires. Les résultats de cette recherche pourront également être utiles comme base de travail pour les futurs barrages en construction en

Conclusion

Indonésie, mais aussi pour les futurs projets dans d'autres zones d'Asie du Sud-Est où de nombreuses constructions d'ouvrages hydro-électriques sont actuellement en cours (et qui pour certains figurent parmi les plus gros chantiers de ce début de siècle). Pour tout ces pays en voie de développement, la multiplication de ces ouvrages colossaux est un pas obligatoire vers la croissance économique. Mais encore faut-il que ces futurs grands barrages puissent rester assez longtemps en état de fonctionnement pour être rentabilisés. Il faudra pour cela se baser sur les liens existant entre les populations et leur milieu afin d'apporter les réponses les plus adaptées et pérennes dans le temps.

Voici le défi qui attend ces régions qui voient dans les barrages un moyen d'accompagner leur croissance !

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABERY, N.W., SUKADI, F., BUDHIMAN, A.A., KARTAMAHARDJA, E.S., KOESHENDRAJANA, S., BUDDHIMAN, DE SILVA, S.S., 2005, **“Fischeries and cage culture of three reservoirs in west Java, Indonesia; a case study of ambitious development and resulting interactions.”**, Fisheries Management and Ecology, n°12, pp. 315-330

ABIDIN H. ARSIK DAN PUDJIHARTA, 1976, **“Pengaruh penggunaan tanah tegalan dengan berbagai macam tanaman setahun terhadap erosi dan runoff di waspada, Garut”**, (relations entre l’occupation des sols sur champs secs, l’érosion et l’écoulement à Garut). Lembaga Penelitian Hutan, Laporan n°239, Bogor, 28 p.

AGUS, F., GINTINGS, A. N., KURNIA, U., ABDURACHMAN, A, VAN DER POEL, P., 1998, **“Soil erosion research in Indonesia: past experience and future direction”**, In: Penning de Vries, F. W. T., Agus, F., Kerr, J. (Eds.), Soil erosion at multiple scales. CABI Publishing, Wallingford / IBSRAM, Bangkok, pp. 255-268.

AMBAR S., WIERSUM K.F., 1980, **“Comparison of different erodibility indices under various soil and land use conditions in West Java”**, The Indonesian Journal of Geography 10, pp. 1-15

AMBAR S., 1986, **“Conversion of forest land to annual crops: an Indonesian perspective. In: Land use, watersheds, and planning in the Asia-Pacific region”**, FAO/RAPA Report 1986/3: 95-11.

AMPHLETT M.B., 1988, **“A nested catchment approach to sediment yield monitoring in the Magat catchment, Central Luzon, the Philippines”**, Paper presented at the 5th International Conservation Conference, Bangkok, January 18-29

AOS FIRDAUS, 2000, **“Perhitungan volume sedimen yang mengendap setelah T-tahun waduk beroperasi”**, (Calcul du volume de sédiments déposés dans les barrages après x années d’existence). In **“Waduk”**, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II74-II83.

ARIEF ILYAS, 2000, **“Consequences of landuse change to flood, erosion, and sedimentation for study case north Bandung”**, ITB, Bandung, 4 p.

ARSYAD S., 1989, **“Soil and Water Conservation”**, IPB Press, Bogor

ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2000, **“Resettlement Policy and Practice in Southeast Asia and the Pacific”**, Conference papers en Proceedings

BAKKER A.J., 1956, **“Notes on the hydrological characteristics of rivers in Java”**, Balai Penyelidikan Teknik, Biro Bendungan dan Hydrometri, Bandung

BANQUE AFRICAINE DE DÉVELOPPEMENT, 2000, **« Politique de gestion intégrée des ressources en eau »**, 48p.

- BENNI UTAMA, 2000, **“Perhitungan laju erosi dan pengaruhnya terhadap umur waduk”**, In **“Waduk”**, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II56-II73
- BERLAGE H.P., 1949, **“Rainfall in Indonesia. Mean rainfall figures for 4399 rainfall stations in Indonesia, 1879 – 1941”**, Verhandelingen van het Koninklijk Nederlandsch-Indisch Magnetischen
- BIRO PUSAT STATISTIK, 1981, **“Penduduk Jawa menurut propinsi dan kabupaten / kotamadya, hasil pencacahan lengkap sensus penduduk 1980”**, Jakarta, p. 18-19.
- BIRO PUSAT STATISTIK, 1988, **“Statistik Indonesia 1987”**, Jakarta, pp. 48-49, 53 et 228
- BIRO PUSAT STATISTIK, 2007, **“Indikator Kunci Indonesia Edisi khusus 2007”**, Jakarta, 40 p.
- BOLS P.C., 1978, **“Contribution to the Study of Surface Runoff and Water Erosion on Java”**, PhD thesis, University of Ghent, Belgium
- BONS C.A., 1990, **“Accelerated erosion due to clear cutting of plantation forest and subsequent *Taungya* cultivation in upland West Java, Indonesia”**, International Association of Hydrological Sciences Publication, 192, pp. 279-288
- BOUN HENG, M., 2003, **« Erosion, transport et sédimentation dans le bassin-versant amont de la kali Konto, Java-Est, Indonésie »**, Maîtrise non publié, Univ. Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, 121 p.
- BOUN HENG, M., 2004, **« Erosion, transport et sédimentation dans le bassin-versant amont du Citarum »**, Mémoire de DEA non publié, Univ. Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, 66 p.
- BRABEN T.E., 1981, **“Bed level changes, river Brantas, East Java, Indonesia”**, Hydraulics Research Station, Wallingford, England, May 1981, 19 p.
- BRAVARD J.P, PETIT F., 1997, **« Les cours d’eau, Dynamique du système fluvial »**, Ed. Armand COLIN, Paris, 222 p.
- BRISMAR A., 2004, **“Attention to impact pathways in EISs of large dam projects”**, Environmental Impact Assessment Review, Volume 24, Issue 1, Pages 59–87
- BRUIJNZEEL L.A., 1983, **“Hydrological and Biogeochemical Aspects of Man-made Forests in South-Central Java, Indonesia”**, Ph D thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam
- BRUIJNZEEL L.A., CRITCHLEY W.R.S., 1996, **“A new approach towards the quantification of runoff and eroded sediment from bench terraces in humid tropical steepplands and its application in South-Central Java, Indonesia”**, In: M.G. Anderson and S.M. Brooks (eds.), **Advances in Hillslope Processes**, pp. 921-937, J.Wiley, New York
- BRUIJNZEEL L.A. and PURWANTO E., 1997, **“The Cimuntuk catchment, Malangbong, West Java, Indonesia: A new “hotspot” for upland hydrological and erosion research in south-East Asia”**, Contour IX, pp. 15-18
- CALOZ R., COLLET C., 2001, **« Traitements numériques d’images de télédétection »**, Précis de Télédétection, vol. 3, Presses de l’Université du Québec/AUF, 386 p.

- CARSON B., 1989, **"Soil conservation strategies for upland areas of Indonesia"**, Occasional Papers of the East-West Environment and Policy Institute n°9, EAPI, Honolulu, Hawaii, 120 p.
- CERNEA M.M., 1998, « La sociologie des déplacements forcés : un modèle théorique », *Autrepart* (5), pp.11-28
- CHANSON H., 1998, **"Extreme reservoir sedimentation in Australia: A review"**, *Water Resources Journal*, pp. 96-102
- COSANDEY C., ROBINSON M., 2000, « **Hydrologie continentale** », Armand Colin, Paris, 360 p.
- COSTA-PIERCE B., 1998, **"From farmers to fishers, developing reservoir aquaculture for people displaced by dams"**, World Bank Technical paper n°369, Fisheries Series.
- COSTER C., 1938, **"Surficial runoff and erosion on Java"**, *Tectona* 31, pp. 613-728
- CRITCHLEY W.R.S., BRUIJNZEEL L.A., 2000, **"Terrace riser erosion: quantifying a "hidden" source of sediment in bench terraced landscapes"**, *Land Husbandry* 2
- DAHAR, 2000, **"Distribusi sedimen di dalam waduk"**, (répartition des sédiments dans un barrage). In *"Waduk"*, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II35-II46.
- DAM, M.A.C., 1994, **"The late Quaternary evolution of the Bandung basin, West Java, Indonesia"**, Thesis Vrije Universiteit, Amsterdam, 252 p.
- DAM, M.A.C et al. 1996, **"A chronology for geomorphological developments in the greater Bandung area, west Java, Indonesia"**, *Journal Southeast Asian Earth Sciences*, vol. 14, n°1-2, pp. 101-105
- DE BOER H.J., 1950, **"On the relation between rainfall and altitude in Java, Indonesia"**, *Chronica Naturae* 106 (8-9) pp. 424 - 427
- DE GRAAFF J., WIERSUM K.F., 1992, **"Re-thinking erosion on Java: a reaction"**, *Netherlands Journal of Agricultural Science*, n°40, pp. 373-379
- DE HAAN R.J.H., 1952, **"Silt transportation of rivers in Java. Proceedings of the Regional Technical Conference on Flood Control in Asia & the Far East"**. *Flood Control Series*, 3, UNCAFE, Bangkok, pp. 179-184.
- DE HAAN, J. H., 1952, **"The economic and social aspects of erosion control"**, *O. S. R. News* 3, pp. 69-72.
- DEPARTEMEN KEHUTANAN, 1998, **"Laporan Kajian Penerapan RUSLE dan WEPP untuk Pendugaan erosi dan sedimentasi di DAS Solo"**, Surakarta
- DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM (Direktorat Jenderal Pengairan), 1995, **"Bendungan besar di Indonesia"**, Jakarta, 374 p.
- DEPARTEMENT VAN LANDBOUW, 1936, **Nijverheid en Handel**, vol.VIII, tab.7, p.3

- DICKINSON A., AMPHLETT M.B., BOLTON P., 1990, **“Sediment discharge measurements, Magat catchment”**, Summary report: 1986-1988, Report n° OD/122, Overseas Development Unit, Hydraulics Research Ltd., Wallingford
- DIEMONT W.H., SMIET A.C., NURDIN, 1991, **“Re-thinking erosion on Java”**, Netherlands Journal of Agricultural Science, n°39, pp. 213-224
- DIJK (Van) J.W., VOGELZANG W.L.M., 1948, **“The influence of improved soil management on erosion velocity in the Tjilutung basin (Residency of Cheribon, West Java)”**, Communications of the Agricultural Experiment Station Bogor 71, pp. 3-10
- DIJK (Van), J. W., EHRENCRON, V. K. R., 1949, **“The different rates of erosion within two adjacent basins in Java.”**, Contributions General Agricultural Experimental Station, Bogor, Indonesia 84, pp. 2-10 (in Dutch)
- DOUGLAS I., 1989, **“Land degradation, soil conservation and the sediment load of the Yellow River, China: Review and assessment”**, Land Degradation and Rehabilitation, pp.141-151
- EAKIN H.M., 1939, **“Silting of Reservoirs”**, US Department of Agriculture, Technical Bulletin 524, 168 p.
- EL-SWAIFY S.A., DANGLER E.W. and ARMSTRONG C.L., 1982, **“Soil erosion by water in the tropics”**, Research and Extension Series n°24, University of Hawaii, Honolulu
- EMMETT W.W., 1981, **“Measurement of bed load in rivers”**, Erosion and Sediment Transport Measurement, Proceedings of the Florence Symposium, June 1981, IAHS Publ N°133, pp. 4-15
- ERMIAS A., SOLOMON A., ALEMU E., 2006, **“Small-scale reservoir sedimentation rate analysis for a reliable estimation of irrigation schemes economic lifetime” (A case study of Adigudom area, Tigray, northern Ethiopia)**, Paper presented at “International Sediment Initiative Conference(ISIC)”, Khartoum, Sudan, 12-15/11/2006, 10 p.
- EXPEDITION INDODANAU TECHNICAL REPORT, 1997, **“National Inventory of the major lakes and reservoirs in Indonesia (revised edition)”**, Bandung and Helsinki, 71 p.
- FABER TH. J. and KARMONO, 1975, **“Final report of the Serayu valley Project.”** Nuffic Project ITC/GUA/VU/1, vol. 1, General Report
- FAO, 1976. **“Termination report Upper Solo Watershed Management and Upland Development Project, Indonesia”**, UNDP/FAO Report AG:DP/INS/72/006, FAO, Rome.
- FATIMAH S., YENNI SULISTYAWATI V., 2001, **“Peningkatan partisipasi rakyat pada pengendalian sedimen waduk dengan sistem agroforestry”**, Proc. Pengelolaan Sumberdaya Air di Era Otonomi Daerah, sub tema A, nomor 4, kongres VII, pit 18, HATHI, Malang, 9 p.
- FIANDINO M., 2003 **« Apport de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France) »**, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 326 p.
- FISH I.L., 1983, **“Reservoir sedimentation study, Selorejo, East Java, Indonesia, Reservoir survey, June 1982”**, Hydraulics Research Station Report n° OD 51, Wallingford

GEERTZ, C., 1963, **“Agricultural Involution: the Process of Ecological Change in Indonesia”**, University of California Press, Berkeley.

GIRARD M C., GIRARD C M., 1999, **« La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales »**, Dunod, Ed. Paris, 529 pages plus CD Rom.

GOEL M. K. ; JAIN Sharad K.; AGARWAL P. K., 2002, **“Assessment of sediment deposition rate in Bargi Reservoir using digital image processing”**, Towards integrated water resources management for sustainable development vol. 47, NS, pp. S81-S92, Hydrological sciences journal, IAHS Press, Wallingford

GONGGRIJP L., 1941, **“Experiments into erosion”**, Tectona 34, pp. 200-220

GONGGRIJP L., 1941, **“The evaporation of mountain forest at 1750-2000 m altitude”**, Tectona 34, pp. 437-447

GLOBAL WATER PARTNERSHIP, 2009, **« Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau par Bassin »**, 112 p.

GUYOMARC'H E., 2003, **« L'érosion des hautes terres agricoles à Java : la crise monétaire de 1998 renforce la pression agricole sur les volcans »** Mémoire de maîtrise (non publié), Université de Paris 7, Paris.

HARDJONO, J. M., 1987, **“Land, labour and livelihood in a West Java village”**, PhD Thesis, University of New England, Armidale, Australia.

HARPER D.E., 1988, **“The effectiveness of soil conservation components of the Citanduy II project”**, Report, Resources Management International, Jakarta, Indonesia

HART B.T., DOCK W., DJUANGSIH N., 2002, **“Nutrient budget for Saguling Reservoir, West Java, Indonesia”**, Water research, 36, Elsevier, 9 p.

HENDERSON G.S. and WITTHAWATCHUTIKUL P., 1984, **“The effect of road construction on sedimentation in a forested catchment at Rayong, Thailand”**, In: C.L. O'Loughlin and A.J. Pearce (eds), Proceedings Symposium on Effects of Forests Land Use on Erosion and Slope Stability, IUFRO, Vienna, and East-West Centre, Honolulu, Hawaii, pp. 247-253

HEUSCH B., 1993, **“Soil erosion in Catchments and Experimental Plots on Java (Indonesia) and Luzon (The Philippines)”**, Soil technology, vol. 6, n°2, pp. 191-202.

HEWLETT J.D., FORTSON J.C., 1983, **“The paired catchment experiment”**, In: J.D. Hewlett (ed.), Forest Water Quality, School of Forest Resources, University of Georgia, Athens, pp. 11-14

HICKS, GOMEZ, 2003, **“Tools in fluvial geomorphology”**, Hoboken, NJ : J. Wiley, chap. 15, 2003

HUDSON N.W., 1995, **“Soil Conservation”**, B.T. Batsford: London; p. 391

HIDAYAT F., 2009, **“Floods and climate change – observations from Java”**, CRBOM Small Publications Series N°10, 7p.

I.T.B (Institute of Technology Bandung), 2000, **“Indonesian Urban Disaster Mitigation Project”**, AUDMP Project report #4, Asian Disaster Preparedness Center 73 p.

JASA TIRTA, 1996, **“Sedimentasi waduk di dps Kali Brantas”**, Malang, 8 p.

JAPING H.W., 1931, **“Research on soil permeability”**, Tectona 24, pp. 793-824

JICA, 1993, **“The Feasibility Study on Upland Plantation and Land Development Project at Citarik Sub Watershed, the Upper Citarum Watershed, West Java.”**, Japan International Cooperation Agency (JICA), Bandung, Indonesia, 185 p.

JOOSTEN, J.H.L., 1941, **“Development and problems resulting from the work done by the agricultural sector”**.

JURACEK, K.E., 2006, **“Sedimentation in Kansas reservoirs”**, in Program of 23rd Annual Water and the Future of Kansas Conference, March 16, 2006, Topeka, Kansas: Manhattan, Kansas, Kansas State Research and Extension, unnumbered page.

KAMIR BRATA, 1995, **“The effectiveness of vertical mulching as a soil and water conservation measure in upland agriculture on the latosol of Darmaga”**, Indonesian Journal of Agricultural Science 5, p. 13-19

KARMONO, 1980, **“Discharge and sediment yield from the Serayu River”**, (non publié), Gadjah Mada University, Faculty of Geography, Yogyakarta.

KARTINI, 1995, **“Pengkajian sedimentasi waduk. Studi kasus waduk Wonogiri”**, (Etude de la sédimentation dans les barrages. Etude de cas dans le barrage de Wonogiri). Thesis S2, Jurusan Teknik Sipil, Institute Technology Bandung, 49 p.

KASSOUL M., ABDELGADER A., BELORGEY M., 1997, **« Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie »**, Revue de sciences de l'eau 3 (1997), pp. 339-358

KIKKERI V., RAMU P.E., 2004, **“Brantas river basin case study Indonesia”**, Integrated river basin management and the principle of managing water resources at the lowest appropriate level - When and why does it (not) work in practice?, Agriculture and rural development department, World Bank

KOI T., HOTTA N., SUZUKI M., 2006, **“Sediment Delivery In Terms Of Long-Term Reservoir Sedimentation And Landslide History Caused By Heavy Rainfall Events - A Case Study Of The Dogawa River Basin, Miyazaki, Japan”**, American Geophysical Union, Fall Meeting 2006

KONDOLF M., PIEGAY H., 2003, **“Tools in fluvial geomorphology”**, John Wiley & Sons, 696 p.

KUNIA U., SUWARDJO, 1983, **“Erodability of selected soils in Java as measured USLE method.”**, Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk, n°3, Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor, pp. 17-20

KURNIA U., ABDURACHMAN A., SUKMANA S., 1986, **“Comparison of two methods in assessing the soil erodibility factor of selected soil in Indonesia.”**, Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk, n°5, Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor, pp. 33-36

KUSUMANDARI A., MITCHELL B., 1997, **“Soil erosion and sediment yield in forest and agroforestry areas in West Java, Indonesia”**, Journal of Soil and Water Conservation, vol. 52 no. 5, pp. 376-380

LAL R., (ed.), 1988, **“Soil Erosion Research Methods”**, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA

LAHLOU A., 1991, **« L’envasement des barrages dans les pays du Maghreb. Erosion et transport solide en Tunisie. Impact sur l’infrastructure »**, Actes du Colloque sur l’érosion des sols et l’envasement des barrages en Algérie. Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH, Alger), en collaboration avec la GTZ et l’Institut Goethe d’Alger.

LANGBEIN, W.B., SCHUMM, S.A., 1958, **“Yield of sediment in relation to mean annual precipitation.”**, Trans. Am. Geophys. Union 39, pp. 1076–1084.

LAVIGNE F., 1998, **« Les lahars du volcan Merapi, Java central, Indonésie : déclenchement, budget sédimentaire, dynamique et risques associés. »**, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 539 p.

LAVIGNE F., HADISANTONO R., SURMAYADI M., SURONO., FLOHIC F., GEYER., 2005, **“The November 2002 eruption of the Papandayan volcano (Indonesia): direct and included hazards, with emphasis on lahars”**, Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Band, 140 pp.151-165

LAVIGNE F., GUNNELL Y., 2006, **“Recent land cover change and abrupt environmental impacts on Javan volcanoes, Indonesia”**, Regional Environmental Change, 6, 1-2, pp. 86-100

LE BISSONNAIS Y., 1998, **« Cartographie de l’aléa érosion des sols en France »**, IFEN Etudes et travaux n°18, 61 p.

LEMARCHAND F., 2005, **« Les effets secondaires des barrages »**, La Recherche, juin 2005, p.12.

LINDEN (Van Der) P., 1977, **“Contemporary Soil Erosion in the Sangreman River Basin Related to the Quaternary Landscape Development (Middle-Java, Indonesia.)”**, Serayu valley project, vol. 3, 110 p.

LINDEN (Van Der) P., 1978, **“Contemporary Soil Erosion in the Sangreman River Basin Related to the Quaternary Landscape Development. A Pedogeomorphic and Hydrogeomorphological Case Study in Middle-Java, Indonesia”**, PhD thesis, University of Amsterdam

LINDEN (Van Der) P., 1979, **“Earth sciences in integrated rural development of upland areas in the Merawu and Urang river basins, Central Java, Indonesia.”**, Report, Netherlands Indonesia Inter-university Program of Tropical Earth Sciences Project (NUFFIC), Yogyakarta

LINDEN (Van Der) P., 1980, **“The application of a parametric grey box type approach to investigate surface runoff and erosion during rainstorms: An erosion plot case study in central Java, Indonesia.”**, Indonesian Journal of Geography 10(40), pp. 23-42

- LINDEN (Van Der) P., 1983, **“Soil erosion in Central Java (Indonesia) – A comparative study of erosion rates obtained by erosion plots and catchments discharges”**, in De Ploey J. (Ed.): Rainfall Simulation, Runoff and Soil Erosion, Catena Suppl. 4, Braunschweig, pp. 141-160
- LONG Y., LIANG G., ZHANG Y., 2004, **“Impacts of management of water and sediment in the reservoirs on sedimentation in lower yellow river”**, In: Proceedings of the ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18-21, 2004, Yichang, China, pp.145-153
- LUKE L. A., 2008, **“Deforestation in Decentralised Indonesia: What’ Law Got to Do with It?”**, 4/2 Law, Environment and Development Journal, pp.75-101
- MC CAULEY D., 1988, **“Citanduy Project completion report”**, Annex V: Policy analysis (English executive summary). U.S. Agency for International Development, Jakarta.
- MC COMB A., HIDAJAT ZAKARIA, 1971, **“Soil erosion in upper Solo river basin, Central Java.”**, Directorate of Reforestation and Rehabilitation, Djakarta, pp. 20 -27.
- MC CULLY P., 2001, **“Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams”**, Zed Books, London, 359 p.
- MAJOR D. J., BARET F., GUYOT G., 1990, **“A ratio vegetation index adjusted for soil brightness”**, International Journal of Remote Sensing, vol. n° 5, p. 727-740.
- MAKARY A.Z., EL-MOATASSEM M., FAHMY A., 2004, **“Evaluation of Lake Nasser environmental sedimentation (1964-2000)”**, In: Proceedings of the ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18-21, 2004, Yichang, China, pp. 917-923
- MAGRATH W. and ARENS P., 1989, **“The cost of soil erosion on Java: a natural resource accounting approach”**, Environmental Department, Work Paper 18, The World Bank Policy Planning and Research Staff, 68 p.
- MOCHAMAD TAUFIEQ, 1991, **“Kjian penanggulangan masuknya material letusan gunung kelud ke waduk wlingi denganpengalihan aliran kali Ganggangan dan kali Loding”**, (Etude de la réduction des matériaux volcaniques du Kelud dans le réservoir Wlingi par le détournement vers les rivières Ganggangan et Loding). Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik, Malang, pp. 60-74.
- MORGAN R.P.C, 1995, **“Soil Erosion and Conservation”**, Longman Scientific and technical
- MORRIS GREGORY L., FAN JIAHUA, 1997, **“Reservoir sedimentation”**, Mc Graw-Hill, 687p.
- MUH AFGAN WARNAWAN, 2000, **“Perhitungan umur waduk, berdasarkan volume sedimen”**, (Estimation de la durée de vie d’un barrage à partir du volume des sédiments). In “Waduk”, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II27-II34.
- NAKAYAMA, 2005, **“Public participation in the resettlement process of dam-construction projects: A post-project survey of the Saguling ans Cirata Dams in Indonesia”**, In Bruch et al. Public participation in the governance of international freshwater resources. United Nation University Press: Tokyo

NIBBERING, J. W. S. M., 1991, **“Hoeing in the Hills: Stress and Resilience in an Upland Farming System in Java”**, PhD Thesis, Australian National University, Canberra.

NILSSON C. et al., 2005, **“Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems”**, Science, n°308, p.405

NOORDWIJK (VAN) M., ROODE (VAN) M., Mc CALLIE E.L., LUSIANA B., 1998, **“Erosion and sedimentation as multi-scale, fractal processes: Implications for models, experiments and the real world”**, In: F. Kleinpenning de Vries and F. Agus (eds), *Assessing the Causes and Impacts of Soil Erosion at Multiple Scales*, CAB International

NOOR HIDAYATI, 2000, **“Kepadatan sedimen pada waduk”** (Densité des sédiments dans les barrages). In *“Waduk”*, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II47-II55

NOSSIN, J.J., VOSKUIL, R.P.G.A. AND DAM, R.M.C., 1996, **“Geomorphologic development of the Sunda volcanic complex, west Java, Indonesia”**, ITC Journal 2, pp.157-165

PADJADJARAN UNIVERSITY, 1989, **“Environmental impact analysis of the Cirata Dam”**, Institute of Ecology

PADOVANI F., 2004, **« Migrations forcées et grands travaux hydrauliques en Chine : le cas du barrage des Trois Gorges »**, Géocarrefour, Vol. 79/1

PALMER, A. W., 1959, **“The Sundanese village”**, In: Skinner, E. G. (Ed.), *Local, Ethnic, and National Loyalties in Village Indonesia: a Symposium*. Institute of Pacific Relations, New York.

PALTE, J. G. L., 1989, **“Upland farming on Java, Indonesia. A socio-economic study of upland agriculture and subsistence under population pressure”**, *Nederlandse Geografische Studies* 97, Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, Amsterdam/Utrecht.

PANE R. H., 2000, **“Penggunaan Model ANSWERS dalam analisa Prediksi Kehilangan Tanah Rata-Rata, Sedimentasi dan Limpasan di Sub DAS Alang, Jawa Tengah.”**, Di bawah bimbingan Dr. Ir. Asep Sapei, MS. Dan Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS.

PAIVA M.P., 1988, **“Deforestation of large reservoir basins”**, *Regulated Rivers: Research & Management*, Vol.2, Issue 1, Wiley & Sons, pp.57-60

PAWITAN H., 2002, **“Present situation of water resources and water related disasters and the role of agro-environmental education in Indonesia”**, Bogor agricultural university, 9 p.

PHILLIPS, M., DE SILVA, S., 2008, **« La pisciculture en cage de poissons à nageoires en Asie : aperçu général, enseignements et perspectives d’avenir »**, *FAO Comptes rendus des pêches*, n°6, Rome, FAO, pp.59-86

PICKERING A.K., 1979, **“Soil conservation and rural institutions in Java”**, *IDS Bulletin* 10, p. 60-65

- PUI UTOMO, 2000, **“Analisis laju sedimentasi atau berkurangnya volume tampungan waduk”**, (Analyse de la vitesse de sédimentation ou diminution de la capacité des barrages). In **“Waduk”**, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II96-II111
- PURBO-HADIWIJOYO M.M. AND SURYO I., 1980. **“Distribution pattern of the Merapi volcanic debris, South Central Java.”**, In: Volcanological Survey of Indonesia (ed.), Volcanology Merapi, Bandung, pp. 276-290
- PURNAVEL G., PETROVICI G., 2004, **“Reservoir sedimentation in Bârlad watershed”**, In: Proceedings of the ninth International Symposium on River Sedimentation, October 18-21, 2004, Yichang, China, pp. 951-960
- PURWANTO IGN, SOERJONO R., 1995, **“The effects of various soil conservation practices on soil erosion rates and surface run-off under teak plantation in Bojonegoro”**, Bul. Pen. Hutan (For. Res. Bull.) 575: 19-30, pp. 19-29
- PURWANTO, E., 1996, **“Developing an appropriate soil conservation technology on rainfed bench terraces in the Upper Cimanuk Watershed. A biophysical and socio-economic approach”**, Paper presented at the Third Congress of the Soil Conservation Society of Indonesia, 2- 20 December 1996, Malang, Indonesia (in Indonesian).
- PURWANTO, E., 1999, **“Erosion, Sediment Delivery and Soil Conservation in an upland agricultural catchment in West Java, Indonesia. A hydrological approach in a socio-economic context”**, PhD thesis, Free University, Amsterdam, 214 p.
- RAYMOND VALIANT RURITAN, 2001, **“Kajian terhadap sedimentasi pada empat waduk bersusun di DPS kali Brantas”** (Etude de la sédimentation dans quatre reservoirs du bassin versant du Brantas). Proc. Pengelolaan Sumberdaya Air di Era Otonomi Daerah, sub tema B, nomor 2, kongres VII, pit 18, HATHI, Malang, 6 p.
- REMIMI W., REMIMI B., 2003, **« La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord »**, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 02, Juin 2003, pp. 45-54
- REMIMI B., LEDUC C., HALOUCCHE W., 2009, **« Évolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens »**, Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 20, Numéro 1, pp. 96-103
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MC COOL and YODER, 1995, **“Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE)”**, Agricultural Handbook n° 703, US Department Agricultural, Washington D.C.
- RIJN L. C. van, 2007, **“Manual sediment transport measurements in Rivers, Estuaries and Costal Seas”**, Aquapublications, The Netherlands, 500 p.
- RIJSDIJK A., BRUIJNZEEL L.A., 1990, **“Erosion, sediment yield and land-use patterns in the Upper Konto watershed, East Java, Indonesia”**, Konto River Project Communication 18, 2 volumes, DHV Consultants, The Netherlands

- RIJSDIJK A., BRUIJNZEEL L.A., 1991, **“Erosion, sediment yield and land-use patterns in the Upper Konto watershed, East Java, Indonesia”**, Part III, results of the 1989-1990 measuring campaign, Konto River Project Communication 18, DHV Consultants, The Netherlands
- ROQUET V., DUROCHER C, 2006, **“Compensation Policy Issue – Final report”**, Compendium on Relevant Practices – 2nd stage, United Nations Environment Programme Dams and Development Project.
- ROKHMADI, 2000, **“Aplikasi teori stream power dan unit stream power dalam perencanaan dan pengoperasian waduk”**, (Application de la théorie Stream Power et Unit Stream Power pour la planification des barrages). In **“Waduk”**, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II84-II96
- RONI YULIANTO, 1998, **“Studi perenganaan sistem penguras sedimen waduk dengan pipa terapung (floting movable pipe) pada bendungan Selorejo”**, Departement Pendidikan dan Kebudayaan, Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik, Malang, 180 p.
- ROSE C.W., 1993, **“Erosion and sedimentation”**, In Hydrology and Water Management in the Humid Tropics, Bonnell M, Hufschmidt MM, Gladwell JS (eds), Cambridge University Press: Cambridge; pp. 301-343
- RUSLAN M., MANAN S., 1980, **“Influence of skidding roads on erosion and runoff in the concession of Pulau Laut, South Kalimantan”**, In: Proceedings of the Seminar on Watershed Management and Hydrology, Surakarta
- RUTTEN L.M.R, 1917, **“On the rate of denudation on Java”**, Verslagen van de Koninklijke Nederlandsche Academie van Wetenschappen, 26, pp. 921-930
- SADRI MIRO SIKUMBANG, 1995, **“Monitoring sedimentasi waduk dengan pengembangan metode cubic spline”**, (Suivi de la sédimentation dans les barrages par la méthode « cubic spline »). Thesis S2, Jurusan Teknik Sipil, Institute Technology Bandung, 76 p.
- SANTOSO H., 1992, **“Assistance with the implementation of INPRES on Regreening and Reforestation: Pelita II-V (Progress), and Pelita VI (Prospects)”**, Ministry of Forestry, Jakarta
- SARCS-LUCC, 1998, **“Dynamic Model for Monitoring Land Use and Land Cover Changes, Indonesia study case”**, 58 p.
- SEMBIRING H., SYAM A., HARDIANTO R., KARTONO G., SUKMANA S., 1989, **“Evaluation and adoption of conservation farming technologies in the uplands of Brantas Watershed: a case study at Srimulyo Village”**, Malang, Report, Soil research Institute, Bogor
- SEVIN O., 1993, **« L’Indonésie »**, Coll. Que sais-je ?, Presses universitaires de France, 127 p.
- SEVIN O., 2001, **« Migrations, colonisation agricole et terres neuves en Indonésie. »**, CRET et DYMSET, Coll. Îles et Archipels, Bordeaux, 28, 2 tomes
- SCHOMAKER M. MSc., 1988, **“Erosion measurements and observations as part of a hydrological monitoring programme, upper konto watershed, East Java”**,
- SCHUITEMAKERS, B. 1949, **“Measures for the conservation of the soil in the Indonesian agriculture on Java”**, Landbouw 21, pp. 153-176.

SHIKLOMANOV I.A., 1990, **“Water consumption, water availability and large scale water projects in the world”**, in *The Impact of Large Water Projects on the Environment*, UNESCO, IHP, pp. 317-329.

SINUKABAN N., PAWITAN H., ARSYAD S., ARMSTRONG J., NETHERY M., 1994, **“Effects of soil conservation practices and slope lengths on runoff, soil loss and yield of vegetables in West Java”**, *Australian Journal of Soil and Water Conservation* 7, pp. 25-29

SINUKABAN N., BANUWA, 1995, **“Effect of soil and water conservation practices on runoff, erosion, and nutrient loss from vegetable growing areas”**, *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* 5, pp. 76-81

SMEC (SNOWY MOUNTAINS ENG. CORP), 1974, **“Serayu River Basin study, vol. 3B, Hydrology.”**, Directorate Gen. Of Water Res. Div. Jakarta.

SMIET, A.C., 1990, **“Forest ecology on Java: conversion and usage in a historical perspective”**, *Journal of Tropical Forest Science*, 2-4, pp. 286-302.

SOEMARWOTO O., 1974, **“The soil erosion problem in Java.”** First Int. Cong. of Ecology, The Hague, sept. 1974.

SOEMARWOTO, 1989, **“Making Dams Work for Displaced Populations: Aquaculture at Saguling Dam, Indonesia”**, World Bank conference, Jakarta, chap.12, 5 p.

SOENARNO, 2002, **“Remarks of Opening Seminar on Flood Management for People’s Welfare”**, Indonesia National Committee for UNESCO, Jakarta

SOFIJAH A., S. SUKMANA, UNDANG KURNIA, 1980, **“Pengaruh pola tanam dan strip rumput permanent terhadap erosi pada tanah Latosol Darmaga.”** Hal. 284 –296. Dalam Kumpulan Makalah Pertemuan Teknis. Buku I Jilid 3, Laporan Proyek, Proyek

PUSAT PENELITIAN TANAH, Penelitian Tanah , Bogor.

SOLER-LÓPEZ, L.R., 2001, **“Sedimentation survey results of the principal water supply reservoirs of Puerto Rico”**, in W.F. Sylva (ed.), *Proceedings of the Sixth Caribbean Islands Water Resources Congress*, Mayagüez, Puerto Rico, February 22 and 23, 2001, unpaginated CD

SOUTHEAST ASIA ASSOCIATION OF SEISMOLOGY AND EARTHQUAKE ENGINEERING, 1985, **“Series on seismology”**, vol.5: Indonesia”, 200 p.

SOYER J., 1987, **« Erosion par le splash en région tropicale humide (Lubumbashi, Shaba, Zaire) »**, *Processus et Mesure de l’Erosion*, éd. CNRS, Paris, p. 477-482.

S.T.A.R.T, 1999, **“Annual report 1998-1999”**, 30 p.

S.T.A.R.T, 2001, **“Annual report 2001-2002”**, 41 p.

SUDARTA, 2001, **“Penambangan pasir masyarakat untuk pengendalian sedimentasi waduk”**, (Le dragage du sable par les populations pour réduire la sédimentation dans les barrages-réservoirs). *Proc. Pengelolaan Sumberdaya Air di Era Otonomi Daerah*, sub tema A, nomor 23, kongres VII, pit 18, HATHI, Malang, 9 p.

SUKRESNO, 1993, **“The influence of soil conservation on sediment reduction”**, Proceedings of the Seminar on Research Results, Balai Teknologi Pengelolaan DAS, Surakarta, 19-20 March 1993, pp. 67-69

SUKRESNO, SUDRADJAT R., AND WINANTUNINGSIH, 1995, **“Kejadian penilaian laju erosi tebing sungai dan erosi tebing jalan di DTA waduk Wonogiri”**, (Study on streambank erosion and roadside erosion rate assessment at Wonogiri dam catchment area). Buletin Teknologi Pengelolaan DAS, II, 2, 1-8

SUMITRO, 1990, **“Pengamatan sedimentasi waduk sengguruh”**, (Suivi de la sédimentation dan sle barrage réservoir de Sengguruh). Departement Pendidikan dan Kebudayaan, Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik, Malang, 67 p.

SUNARSIH, 2000, **“Perhitungan kepadatan sedimen di waduk”**, (Calcul de la densité des sédiments dans les barrages). In. “Waduk”, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II1-II12

SUWARDJO, SOFIJAH A., 1985, **“Crop residue mulch for conserving soil in the uplands of Indonesia”**, In: S.A. El-Swaify, W.C. Moldanauer, A. Lo. (eds), Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa

SYAHRUL DONIE, 1995, **“Faktor fisik yang mempengaruhi perkembangan ujung jurang studi kasus di daerah tangkapan waduk Wonogiri”**, (Physical factors to influencing gullyhead development a case study at Wonogiri dam catchment area). Buletin Teknologi Pengelolaan DAS, II, 2, pp. 9-26

SYVITSKI J.P.M. et al., 2005, **“Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean”**, Science, n°308, p.376

TAKEUCHI K., HAMLIN M., KUNDZEWICZ Z.W., ROSBJERG D., SIMONOVIC S.P., 1998 **“Sustainable Reservoir Development and Management”**, IAHS Publ., n° 251, Wallingford, 190 p.

TATANG TASLIMUHAROM, 2000, **“Perhitungan umur waduk”**, (Estimation de la durée de vie d’un barrage). In “Waduk”, Proc. Forum Seminar Jurusan Teknik Sipil ITB 21-22 Desember 2000, Institute Technology Bandung, II13-II26.

TRIE M. SUNARYO, SYAMSUL BACHRI, 1995, **“Penanganan sedimen di waduk-waduk pada daerah pengaliran sungai kali Brantas”**, (Mesures de réduction de la sédimentation dans les réservoirs du bassin versant du Brantas). Seminar reservoir operation and sedimentation, 28 - 29 sept 1995, Jakarta, Perum Jasa Tirta,15 p.

TUAN V.V., 1993, **“Evaluation of the impact of deforestation to inflow regime of the Hoa Binh Reservoir in Vietnam”**, Hydrology of Warm Humid regions, Proceedings of the Yokohala Symposium, July 1993, IAHS Publ. n°216, pp.135-138

UNEP, 1997, **“National report of Indonesia”**, 142 p.

UNESCO, 1995-2000, **“Catalogue of rivers”**, vol.1 (1995), vol.2 (1997), vol.3 (2000), IHP RSC Southeast Asia and the Pacific

- VARMA, C.V.J, 2002, **“Dams for development of water resources development for security of water, food & energy”**, Proceeding of international seminar on the water management in basins and the role of reservoirs, Tokyo, pp. 1-8
- VITALY R., BARTOLETTI G., IOANNILLI E., 1995, **“ENEL experience in the environmental management of maintenance of hydroelectric reservoirs”**, Hydroécol. App., Tome 7 Vol 1-2, pp.51-74
- VOROSMARTY, C.J., MEYBECK, M., FEKETE, B., SHARMA, K., 1997, **“The potential impact of neo-Cartorization on sediment transport by the global network of rivers”**, In: Proceedings of the Rabat symposium, IAHS Publ. N° 245, pp. 261-273
- VOROSMARTY, C.J., MEYBECK, M., FEKETE, B., SHARMA, K., GREEN P., SYVITSKI J., 2003, **“Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments”**, Global Planetary Change, vol.39, Issues 1-2, pp. 169-190
- VUGLINSKY V., 1995, **“Assessment of runoff changes during reservoir construction. Man’s influence on freshwater ecosystems and water use”**, IAHS Publ., n° 230, Wallingford, pp. 47-51.
- WALLING D.E, WEBB B.W., 1983, **“Patterns of sediment yield”**, In: Background to Palaeohydrology (ed. by K.J. Gregory), Wiley, Chichester, UK, pp. 69-100.
- WALLING D.E, WEBB B.W., 1996, **“Erosion and Sediment Yield: global overview”**, In: D.E. Walling and B.W. Webb(ed.), Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives, Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996, IAHS Publication N° 236, pp. 3-19.
- WALLING D.E., PROBST J-L., 1997, **“Human Impact on Erosion and Sedimentation”**, IAHS Publ., n° 245, Wallingford, 311p.
- WALLING, D. E. & FANG, D., 2003, **“Recent trends in the suspended sediment loads of the world’s rivers”**, Department of Geography, University of Exeter, Global and Planetary Change, Elsevier Science Ltd, Exeter.
- WATER RESEARCH INSTITUTE, **“Sedimentation in the reservoir of large Dams in Iran”**,
- WHITE S.M., 1990, **“The influence of tropical cyclones as soil eroding and sediment transporting events: An example from the Philippines”**, International Association of Hydrological Sciences Publication n° 192, pp. 259-269
- WHITE, W.R., 2005, **“World Water Storage in manmade reservoirs – A review of current knowledge”**, Foundation for Water Research, Bucks, United Kingdom, pp. 21.
- WHITTEN, A. J., SOERIAATMADJA, R. E., AFFIF, S. A., 1996, **“The Ecology of java and Bali”**, Periplus Editions, Hong Kong.
- WIERSUM K.F., AMBAR S., 1980, **“A note on the use of erosivity indices on Java”**, The Indonesian Journal of Geography, vol. 10, n° 40, pp. 1-8.

- WIERSUM K.F., 1985, **“Effects of various vegetation layers in an *Acacia auriculiformis* forest plantation on surface erosion in Java, Indonesia”**, S.A El-Swaify, W.C. Moldenhauer and A. Lo (eds), Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation, Society of America, Ankeny, Iowa, pp. 79-89,
- WISCHMEIER K.F., SMITH D.D., 1978, **“Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning”**, Agricultural handbook n°537, U.S. Dept. Agric., Washington D.C.
- WORLD BANK, 1990, **“Indonesia: Sustainable development of forests, land and water”**, Washington D.C., World Bank.
- WORLD BANK, 1993, **“Staff appraisal report”**, National Watershed Management and Conservation Project, Agricultural Operations Division, Country Department III: East Asia and Pacific Region, Report n°12904-IND, Washington D.C.
- WORLD BANK, 2004, **“Dams and resettlement: building good practice”**, Involuntary resettlement sourcebook – Planning and implementation in development projects, Chapter 15, World Bank, pp.321-359.
- WOROSUPROJO S., YUNianto T., NUGROHO P., 1992, **“Erosion hazard study in Kokap river basin Kulonprogo regency, Yogyakarta province, Indonesia”**, The Indonesian Journal of Geography, vol. 22, n°63, pp. 1-12
- YOUNG R.A., ONSTAD C.A., BOSCH D.D. and ANDERSON W.P., 1987, **“AGNPS, Agricultural Non-point Source Pollution Model, A Watershed Analysis Tool.”**, USDA, Conservation research report 35.
- YUNianto T., 1982, **“Soil erosion hazard study using aerial photography. Case study of the area east of West Progo Hills.”**, Ind. J. of Geography, 12, 43, pp. 29-50.
- ZENG, M., ZHU, X., KANG, L., ZUO, Z., 1999. **“Effect to intercept sediment and decrease erosion and development prospect of check-dams in water and soil erosion areas.”** Res. Soil Water Conserv. 6, 127–132 (en Chinois).
- ZHANG L., DAI X., SHI Z., 1991, **“The sources of loess material and the formation of the Loess Plateau in China”** In Okuda S., Rapp A. et Zhang L., Eds., **“Loess: Geomorphological hazards and processes”**, Catena supplement 20, pp. 1-14
- ZIEGLER A. and GIAMBELLUCA T.W., 1997, **“Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand”**, Journal of Hydrology, 196, pp. 204-229

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : MISE EN SERVICE DES BARRAGES PAR DÉCENNIE DANS LE MONDE (SOURCE : ICOLD)	8
FIGURE 2 : DISTRIBUTION DES GRANDS BARRAGES PAR CONTINENT EN 2010 (ICOLD)	9
FIGURE 3 : PIÉGEAGE DES SÉDIMENTS À L'ÉCHELLE DES BASSINS (VÖRÖSMARTY ET AL., 2003).....	19
FIGURE 4 : EFFETS EN AMONT DES RÉSERVOIRS DANS LA ZONE ENNOYÉE (BRISMAR, 2004)	20
FIGURE 5 : EFFETS EN AVAL DES RÉSERVOIRS (BRISMAR, 2004).....	21
FIGURE 6: VILLAGE D'ACCUEIL DES POPULATIONS DÉPLACÉES PAR LE BARRAGE DES TROIS GORGES, YICHANG, CHINE (OCTOBRE 2004).....	22
FIGURE 7 : PARCELLE EXPÉRIMENTALE INSTALLÉ DANS LE CADRE DU PROJET DE CONSERVATION DU BASSIN DE WONOGIRI (JICA, 2005).....	25
FIGURE 8 : COMPARAISON DES CLASSIFICATIONS NATIONALES DE TAILLES DES PARTICULES (D'APRÈS MORRIS, FAN, 1997).....	30
FIGURE 9 : SPHÉRICITÉ, ARRONDI ET TRI DES SÉDIMENTS (D'APRÈS MORRIS, FAN, 1997).....	30
FIGURE 10 : DISTINCTION ENTRE LA CHARGE EN SUSPENSION ET LA CHARGE DE FOND (D'APRÈS MORRIS, FAN, 1997).....	31
FIGURE 11 : DIFFÉRENTS MODÈLES DE PRÉLEVEURS D'ÉCHANTILLONS DE MES (MORRIS, FAN, 1997).....	32
FIGURE 12 : PRÉSENTATION DES MODÈLES SERVANT À ÉCHANTILLONNER LA CHARGE DE FOND (MORRIS, FAN, 1997).....	33
FIGURE 13 : RÉPARTITION RÉGIONALE DES DIFFÉRENTS BARRAGES (ICOLD).....	36
FIGURE 14 : DISTRIBUTION DES BARRAGES EN FONCTION DE LA TAILLE DU BASSIN (ICOLD)	37
FIGURE 15 : DISTRIBUTION DES BARRAGES EN FONCTION DU VOLUME INITIAL DU RÉSERVOIR (ICOLD)	38
FIGURE 16 : VITESSE DE SÉDIMENTATION ET SURFACE DU BASSIN-VERSANT	41
FIGURE 17 : VITESSE DE SÉDIMENTATION ET PÉRIODE D'ÉTUDE	42
FIGURE 18 : LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS	45
FIGURE 19 : ÉROSION MASSIVE DU PLATEAU LOESSIQUE CHINOIS, PROVINCE DU SHAANXI, CHINE - OCTOBRE 2007 (JC RICHARDSON).....	47
FIGURE 20 : PERTES DES SURFACES FORESTIÈRES MONDIALES.....	51
FIGURE 21 : LOCALISATION DES PRINCIPAUX FLEUVES ET VOLCANS ET DES SECTEURS D'ÉTUDE (MNT USGS RÉOLUTION 90 M).....	66
FIGURE 22 : CARTE ISOHYPSE DES TROIS PRINCIPAUX SECTEURS D'ÉTUDE	68
FIGURE 23 : PROFILS TRANSVERSAUX DES SECTEURS D'ÉTUDE.....	69
FIGURE 24 : CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DU BASSIN-VERSANT AMONT DU CITARUM	70
FIGURE 25 : CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DU BASSIN-VERSANT AMONT DU SOLO	71
FIGURE 26 : CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DU BASSIN-VERSANT AMONT DU BRANTAS	72
FIGURE 27: RÉPARATION DES SOLS DANS LE BASSIN DE WONOGIRI	74
FIGURE 28 : CONDITIONS NORMALES DANS LE PACIFIQUE (MÉTÉO FRANCE).....	75
FIGURE 29 : CONDITION EL NIÑO DANS LE PACIFIQUE (MÉTÉO FRANCE).....	76
FIGURE 30 : CONDITION LA NIÑA DANS LE PACIFIQUE (MÉTÉO FRANCE).....	77
FIGURE 31 : RÉPARTITION DES INCENDIES DE FORÊTS EN INDONÉSIE ENTRE 1984 ET 1997 (DPHPA, 1997)	78
FIGURE 32 : ESTIMATION DES SUPERFICIES RIZICOLES TOUCHÉES PAR LES INONDATIONS ET LES SÉCHERESSES EN INDONÉSIE (D'APRÈS PAWITAN, 2002)	79
FIGURE 33 : RELATION PLUIES/DÉBITS (STATION DE PUJON, JAVA-EST, 2002)	80
FIGURE 34 : ÉVOLUTION DE LA POPULATION À JAVA DEPUIS LE 19 ^{ÈME} SIÈCLE (RAFFLES, 1817 ; SEVIN, 1993 ; BPS INDONESIA, 2006).....	82
FIGURE 35 : CARTE DES DENSITÉS DE POPULATION SUR JAVA EN 2006	84
FIGURE 36 : LE DÉVELOPPEMENT RAPIDE DE BANDUNG, LA CAPITALE DE JAVA-OUEST	84
FIGURE 37 : LA RÉGION DU BASSIN-VERSANT DU CITARUM EST UN VASTE SECTEUR D'AGRICULTURE.	86
FIGURE 38 : ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE BOISÉE SUR LE MONT MALABAR.	87
FIGURE 39 : GLISSEMENTS SUPERFICIELS À CIMANGGU (CILACAP) EN NOVEMBRE 2001	89
FIGURE 40 : LA RÉGION DE BANDUNG, UN PÔLE INDUSTRIEL.....	90
FIGURE 41 : LOCALISATION DES TROIS BARRAGES DANS LE BASSIN-VERSANT DU CITARUM	93
FIGURE 42 : LE CITARUM : L'ARTÈRE VITALE DE JAVA-OUEST	93

FIGURE 43 : LE BARRAGE DE JATILUHUR (<i>PERUM JASA TIRTA</i>)	94
FIGURE 44 : LE BARRAGE DE CIRATA (<i>PERUM JASA TIRTA</i>).....	94
FIGURE 45 : LE BARRAGE DE SAGULING (<i>PERUM JASA TIRTA</i>)	95
FIGURE 46 : BARRAGE DE WONOGIRI (TRIUNT, 2009).....	96
FIGURE 47 : LOCALISATION DU BARRAGE SUR LE COURS DU BENGAWAN SOLO	96
FIGURE 48 : BARRAGE DE MRICA (<i>INDONESIA POWER</i>)	97
FIGURE 49 : LOCALISATION DES BARRAGES SUR LE COURS DU BRANTAS.....	98
FIGURE 50 : BARRAGE DE SENGGURUH	98
FIGURE 51 : BARRAGES DE SUTAMI (A), LAHOR (B), WLINGI (C) ET LODOYO (D)	99
FIGURE 52 : BARRAGE DE SELOREJO	99
FIGURE 53 : DÉTERMINATION DE LA POSITION DU BATEAU PAR CALCUL TRIGONOMÉTRIQUE (<i>PERUM JASA TIRTA</i>)	103
FIGURE 54 : PROFIL TRANSVERSAL À PARTIR DES BALISES SUR CHAQUE RIVE.....	104
FIGURE 55 : FICHE DESCRIPTIVE D'UNE BALISE POUR LE BARRAGE DE SAGULING	104
FIGURE 56 : SÉDIMENTATION DANS LE BARRAGE DE SELOREJO (<i>JASA TIRTA, 1997</i>)	106
FIGURE 57 : LÂCHÉ D'EAU SUR LE RÉSERVOIR DE WONOGIRI LE 29/12/2004	108
FIGURE 58 : DISPOSITIF DE DRAGAGE DEVANT LA CONDUITE FORCÉE DU BARRAGE DE SENGGURUH.....	109
FIGURE 59 : EXTRACTION DES SÉDIMENTS DANS LE RÉSERVOIR PAR ASPIRATION DANS LE RÉSERVOIR DE SELOREJO	110
FIGURE 60 : LIEU D'ÉCHANTILLONNAGE DE LA MES DANS LE BASSIN DU CITARUM PAR LES DIFFÉRENTS ORGANISMES INDONÉSIENS.....	112
FIGURE 61 : LIEU D'ÉCHANTILLONNAGE DE LA MES DANS LE BASSIN DU BRANTAS PAR LES DIFFÉRENTS ORGANISMES INDONÉSIENS.....	114
FIGURE 62 : LIEU DE L'ÉCHANTILLONNAGE DE MES À MARGAHAYU	115
FIGURE 63 : MARQUES EFFECTUÉES SUR LE PONT POUR LES MESURES	115
FIGURE 64 : SECTION TRANSVERSALE DU SITE D'ÉCHANTILLONNAGE À MARGAHAYU	115
FIGURE 65 : A-OTT N°1-83814 POUR LE CALCUL DES DÉBITS	116
FIGURE 66 : USDH -49 POUR LE PRÉLÈVEMENT DE MES.....	116
FIGURE 67 : DÉBRIS VÉGÉTAUX FIGURE 68 : DÉBRIS PLASTIQUES	116
FIGURE 69 : POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DISPONIBLES DANS LE BASSIN DU CITARUM (SOURCES DIVERSES) ..	118
FIGURE 70 : POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DISPONIBLES DANS LE BASSIN DU SERAYU (SOURCES DIVERSES)	119
FIGURE 71 : POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DISPONIBLES DANS LE BASSIN AMONT DU SOLO (SOURCES DIVERSES)	119
FIGURE 72 : POSTES PLUVIOMÉTRIQUES DISPONIBLES DANS LE BASSIN DU BRANTAS (SOURCES DIVERSES) ..	120
FIGURE 73 : LOCALISATION DES STATIONS HYDROLOGIQUES DANS LE BASSIN AMONT DU CITARUM.....	121
FIGURE 74 : LOCALISATION DES STATIONS HYDROLOGIQUES DANS LE BASSIN AMONT DU SERAYU	122
FIGURE 75 : DATE DE LANCEMENT DES DIFFÉRENTS SATELLITES LANDSAT ET DE LEURS DURÉES D'OPÉRATION (USGS).....	125
FIGURE 76 : QUADRILLAGE LANDSAT 1 À 4 ET LISTE DES IMAGES ACQUISES COUVRANT LES BASSINS ÉTUDIÉS (GLCF)	126
FIGURE 77 : QUADRILLAGE LANDSAT 5 À 7 ET LISTE DES IMAGES ACQUISES COUVRANT LES BASSINS ÉTUDIÉS (GLCF)	126
FIGURE 78 : EXEMPLE DE DONNÉES COLLECTÉES EN FORMAT TEXTE.....	128
FIGURE 79 : DONNÉES ACQUISES APRÈS LA MISE EN FORME ET CORRECTION SOUS EXCEL	129
FIGURE 80 : DONNÉES AU FORMAT BASE DE DONNÉES SOUS EXCEL	130
FIGURE 81 : DONNÉES AU FORMAT BASE DE DONNÉES APRÈS INTÉGRATION DANS ACCESS	130
FIGURE 82 : STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES HYDROLOGIQUES ET PLUVIOMÉTRIQUES (CITARUM ET BRANTAS)	132
FIGURE 83 : FENÊTRE DE RECHERCHE DE DONNÉES (EXEMPLE DE LA TABLE P_CITARUM)	133
FIGURE 84 : GRAPHIQUE EN SORTIE AUTOMATIQUE POUR LE POSTE PLUVIOMÉTRIQUE DE NANJUNG (BASSIN-VERSANT DE LA KALI KONTO – JAVA-EST). DONNÉES MENSUELLES ENTRE 1986 ET 1994.	134
FIGURE 85 : TABLE « SÉDIMENTATION BARRAGES »	135
FIGURE 86 : GRAPHIQUE MONTRANT LA BAISSSE DE LA CAPACITÉ DU RÉSERVOIR DE MRICA (JAVA-CENTRE) ENTRE 1988 ET 2002.....	135
FIGURE 87 : ÉVOLUTION D'UNE SECTION TRANSVERSALE ENTRE 1970 ET 2003 DANS LE RÉSERVOIR DE SELOREJO (JAVA-EST).....	136
FIGURE 88 : COMPOSITION COLORÉE EN 5-4-3 SUR LE BASSIN AMONT DU SOLO (13-05-2005).....	141

FIGURE 89 : LE REcul DES SURFACES BOISÉES ENTRE 1993 ET 2005 SUR LES VERSANTS DU MONT LAWU DANS LE BASSIN AMONT DU SOLO	142
FIGURE 90 : EXEMPLE D'INFORMATIONS DISPONIBLES DANS LE SIG POUR LA STATION DE CIRASEA-CENGRONG DANS LE BASSIN DU CITARUM	144
FIGURE 91 : CARTE D'OCCUPATION DES SOLS DANS LE BASSIN-VERSANT AMONT DU CITARUM, RÉALISÉE À PARTIR DE L'ANALYSE DES IMAGES SATELLITAIRES ET DES MISSIONS TERRAIN POUR VALIDATION.....	145
FIGURE 92 : VUE 3D DU BASSIN AMONT DU CITARUM	145
FIGURE 93 : EXEMPLE DE CARTE D'ÉROSION POTENTIELLE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA KALI KONTO, JAVA-EST	148
FIGURE 94 : LA KALI KONTO À PANGGUNG JUSTE EN AMONT DU TOKOL DAM, DESA MULYOUREJO, JAVA-EST, LES 04/02/2003 (A) ET 08/04/2003 (B).....	149
FIGURE 95 : PROTECTION À LA SORTIE DE NGEPRIH, DESA SUKOMULYO, JAVA-EST, LES 04/02/2003 (A) ET 13/08/2006 (B)	150
FIGURE 96 : GLISSEMENT DE TERRAIN, BASSIN DE LA KALI KONTO, JAVA-EST, LE 05/09/2006	150
FIGURE 97 : SÉDIMENTATION MOYENNE POUR LES BARRAGES ÉTUDIÉS À JAVA DEPUIS LEUR MISE EN SERVICE.	156
FIGURE 98 : RELATION ENTRE LE VOLUME INITIAL ET LA SÉDIMENTATION MOYENNE ANNUELLE DES RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS.....	158
FIGURE 99 : RELATION ENTRE LE VOLUME INITIAL ET LA CAPACITÉ MOYENNE ANNUELLE PERDUE DES RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS.....	160
FIGURE 100 : CAPACITÉ RESTANTE DES RÉSERVOIRS SELON LES DERNIERS CHIFFRES CONNUS.....	161
FIGURE 101 : ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ DES RÉSERVOIRS À JAVA DEPUIS LES ANNÉES 60.....	163
FIGURE 102 : EXTRACTION DES SÉDIMENTS PAR DRAGAGE DANS LE BARRAGE DE SENGGURUH ENTRE 1995 ET 2005 (PJT 1)	169
FIGURE 103 : EXTRACTION DES SÉDIMENTS PAR VIDANGE ET DRAGAGE DANS LE BARRAGE DE WLINGI ENTRE 1990 ET 2005 (PJT 1).....	170
FIGURE 104 : TAUX DE SÉDIMENTATION MOYEN ANNUEL DANS LE RÉSERVOIR DE MRICA DE SA CONSTRUCTION À 2009.....	172
FIGURE 105 : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LA SÉDIMENTATION DES RÉSERVOIRS DU BASSIN DU CITARUM	176
FIGURE 106 : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LA SÉDIMENTATION DES RÉSERVOIRS DE JAVA-CENTRE.....	177
FIGURE 107 : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LA SÉDIMENTATION DES RÉSERVOIRS DU BASSIN DU BRANTAS	178
FIGURE 108 : PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES EN INDONÉSIE (<i>PROJET CILCIS</i> , 2007).....	182
FIGURE 109 : CARTE DES ISOHYÈTES DU BASSIN-VERSANT AMONT DU CITARUM	184
FIGURE 110 : CARTE DES ISOHYÈTES DU BASSIN-VERSANT AMONT DU SOLO	184
FIGURE 111 : CARTE DES ISOHYÈTES DU BASSIN-VERSANT AMONT DU BRANTAS	185
FIGURE 112 : ANNÉES EL NIÑO ET LA NIÑA DE 1950 À 2010 (ENVIRONNEMENT CANADA)	186
FIGURE 113 : ANOMALIES DE HAUTEUR DE MER NORMALISÉES ENTRE 1990 ET 2012 (AVISO, 2012).....	186
FIGURE 114 : INCENDIES DE FORÊTS À JAVA EN OCTOBRE 2002 (IMAGE MODIS <i>MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER</i> - HTTP://MODIS.GSFC.NASA.GOV).....	187
FIGURE 115 : IMPACT D'EL NIÑO SUR LES TAUX DE SÉDIMENTATION	188
FIGURE 116 : IMPACT DE LA NIÑA SUR LES TAUX DE SÉDIMENTATION	189
FIGURE 117 : ÉVOLUTION DE LA DÉGRADATION DES TERRES DE CULTURES NON IRRIGUÉES DESA NGEBRONG, JAVA-EST	191
FIGURE 118 : GLISSEMENTS DE TERRAIN AU-DESSUS DU SABO DAM DE TOKOL, JAVA-EST	192
FIGURE 119 : RAVINEMENT DES CANAUX D'IRRIGATION, DESA WIYUREJO, JAVA-EST	193
FIGURE 120 : LES « NGAGUGUNTUR »	197
FIGURE 121: RELATION DÉBIT (Q) / PRÉCIPITATIONS (P) DANS LE BASSIN DE WONOGIRI (JAVA-CENTRE)	199
FIGURE 122 : RELATION DÉBIT (Q) / PRÉCIPITATIONS (P) DANS LE BASSIN DU BRANTAS (JAVA-EST).....	200
FIGURE 123 : EXTENSION DES ZONES DÉBOISÉES ENTRE 1990 ET 2000 DANS LE BASSIN AMONT DU BRANTAS (TRAITEMENT D'IMAGES LANDSAT TM)	202
FIGURE 124 : RELATION DÉBIT (Q) / PRÉCIPITATIONS (P) DANS LE BASSIN DU CITARUM (JAVA-OUEST)	203
FIGURE 125 : ÉVOLUTION HORAIRE DES PRÉCIPITATIONS ET DES DÉBITS DU 25 DÉCEMBRE 1999 (BRLKT, 1999)	205
FIGURE 126 : ÉVOLUTION HORAIRE DES PRÉCIPITATIONS ET DES DÉBITS DU 19 FÉVRIER 2003.....	205
FIGURE 127 : ÉVOLUTION DE LA MES ENTRE 1999 ET 2002 (BRLKT, LAPORAN 1999)	206
FIGURE 128 : BERGE À LA SORTIE DU VILLAGE DE NGEPRIH.....	207
FIGURE 129 : LA KALI KONTO À PANGGUNG, EN AMONT DU TOKOL DAM.....	208

FIGURE 130 : IMPACT DES CRUES DU MOIS DE FÉVRIER 2003 DANS LE BASSIN DE LA KONTO	209
FIGURE 131 : DÉFORESTATION SUR UN VERSANT DANS LE BASSIN AMONT DU BRANTAS (2006)	215
FIGURE 132 : ÉROSION DES SOLS SUR LES TERRASSES DANS LE BASSIN DE LA KALI KONTO (2003)	216
FIGURE 133 : VERSANTS DÉFRICHÉS EN FAVEUR DE L'AGRICULTURE DANS LE BASSIN DE LA KALI KONTO (2003)	217
FIGURE 134 : DÉFRICHEMENT EN BANDES TÉMOIN DE LA <i>REFORMASI</i> (2003).....	218
FIGURE 135 : LA SÉDIMENTATION DANS LE RÉSERVOIR DE SELOREJO ENTRE 1970 ET 1999 (JAVA-EST)	219
FIGURE 136 : LE CITARUM UNE DÉCHETTERIE FLOTTANTE À CIEL OUVERT (CITARUM.ORG)	220
FIGURE 137 : REJET DE POLLUANTS INDUSTRIELS DANS LA RIVIÈRE CIHAUR, TRIBUTAIRE DU CITARUM À JAVA- OUEST (GREENPEACE, 2012)	222
FIGURE 138 : LA POLLUTION ACCÉLÉRANT L'EUTROPHISATION DU RÉSERVOIR DE SAGULING (2002)	222
FIGURE 139 : FERME PISCICOLE SUR LE RÉSERVOIR DE CIRATA (2006)	223
FIGURE 140 : LA MORTALITÉ DES POISSONS DANS LES RÉSERVOIRS DE JAVA-OUEST (CITARUM.ORG)	224
FIGURE 141 : SÉDIMENTATION ANNUELLE DANS LES RÉSERVOIRS JAVANAIS DEPUIS LA MISE EN SERVICE DES BARRAGES.....	226
FIGURE 142 : SÉDIMENTATION ANNUELLE DANS LES RÉSERVOIRS JAVANAIS DEPUIS 1990.....	227
FIGURE 143 : INVESTISSEMENTS DE L'AGENCE JAPONAISE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE EN INDONÉSIE	233
FIGURE 144 : GOUVERNANCE DES BASSINS HYDROLOGIQUES À JAVA	240

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE DES OUVRAGES GÉNÉRAUX SUR LA SÉDIMENTATION DES RÉSERVOIRS DE BARRAGE	14
TABLEAU 2 : LISTE NON EXHAUSTIVE DES RAPPORTS ET ARTICLES CONSULTÉS AU SUJET DE BARRAGES À TRAVERS LE MONDE	15
TABLEAU 3 : LISTE DES OUVRAGES CONSULTÉS SUR LA THÉMATIQUE DU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE EN INGÉNIERIE	16
TABLEAU 4 : RÉPARTITION DES BARRAGES ÉTUDIÉS PAR TAUX DE SÉDIMENTATION.....	40
TABLEAU 5 : DESCRIPTIF DES PRINCIPAUX VOLCANS SE TROUVANT DANS LES SECTEURS D'ÉTUDE (WWW.VOLCANO.SI.EDU/WORLD/REGION.CFM?RNUM=06&RPAGE=LIST)	67
TABLEAU 6 : DERNIERS SÉISMES NOTABLES À JAVA (USGS)	73
TABLEAU 7 : CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX BASSINS HYDROLOGIQUES DE JAVA (CATALOGUE OF RIVERS, VOL.1, 2, 3, 1995, 1997, 2000).....	80
TABLEAU 8 : OCCUPATION ACTUELLE DU SOL DU BASIN DU WONOGIRI (JICA).....	88
TABLEAU 9 : ÉTAT DES SURFACES BOISÉES ET NON BOISÉES DANS LE BASSIN-VERSANT DU CITARUM (PHOTO INTERPRÉTATION LANDSAT 1996) (SARCS-LUCC, 1998).....	88
TABLEAU 10 : CARACTÉRISTIQUES DES BARRAGES DU BASSIN AMONT DU CITARUM (PERUM JASA TIRTA)	95
TABLEAU 11 : PRÉSENTATION DES BARRAGES DE WONOGIRI ET MRICA (INDONESIA POWER)	97
TABLEAU 12 : CARACTÉRISTIQUES DES BARRAGES DU BASSIN AMONT DU BRANTAS (PERUM JASA TIRTA)	100
TABLEAU 13 : ÉCHOSONDAGES EFFECTUÉS POUR LES RÉSERVOIRS DE BARRAGE DU CITARUM.....	107
TABLEAU 14 : PRÉSENTATION DES DONNÉES DE MES COLLECTÉES	113
TABLEAU 15 : DONNÉES PRÉSENTES DANS LE SIG	124
TABLEAU 16 : CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS RADIOMÈTRES SUR LES SATELLITES LANDSAT	125
TABLEAU 17 : LES BANDES SPECTRALES DE LANDSAT TM ET LEUR UTILISATION	137
TABLEAU 18 : ANALYSE DE DIFFÉRENTES COMPOSITIONS COLORÉES SUR LANDSAT TM	139
TABLEAU 19 : CLASSIFICATION DES FACTEURS D'ÉROSION	146
TABLEAU 20 : LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES	152
TABLEAU 21 : TAUX DE SÉDIMENTATION MOYEN DANS LES RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS	157
TABLEAU 22 : PERTE MOYENNE ANNUELLE EN POURCENTAGE DE LA CAPACITÉ DES RÉSERVOIRS	159
TABLEAU 23 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES ÉCHOSONDAGES EFFECTUÉS DANS LES DIFFÉRENTS RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS	168
TABLEAU 24 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES ÉCHOSONDAGES EFFECTUÉS DANS LES DIFFÉRENTS RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS	171
TABLEAU 25 : ÉCARTS À LA MOYENNE DE LA SÉDIMENTATION DANS LE RÉSERVOIR DE JATILUHUR.....	173
TABLEAU 26 : ÉCARTS À LA MOYENNE DE LA SÉDIMENTATION DANS LE RÉSERVOIR DE SELOREJO	173
TABLEAU 27 : ÉCARTS À LA MOYENNE DE LA SÉDIMENTATION DANS LE RÉSERVOIR DE WLINGI	174
TABLEAU 28 : ÉCARTS À LA MOYENNE DE LA SÉDIMENTATION DANS LE RÉSERVOIR DE SUTAMI	175
TABLEAU 29 : PLUVIOMÉTRIE DANS LE BASSIN-VERSANT AMONT DU CITARUM (GEOPHYSICS AND METEOROLOGICAL AGENCY, 1981)	183
TABLEAU 30 : TAUX D'ÉROSION ET MÉTHODES UTILISÉES À JAVA.....	194
TABLEAU 31 : ORGANISMES INDONÉSIENS ENGAGÉS DANS LA RECHERCHE SUR L'ÉROSION DES SOLS (PURWANTO, 1998).....	198
TABLEAU 32 : ÉTAT DES PROJETS FINANCÉS PAR LA BANQUE ASIATIQUE DE DÉVELOPPEMENT DANS LES BASSINS D'ÉTUDE	232
TABLEAU 33 : PROJETS SUPPORTÉS PAR LA BANQUE MONDIALE DANS LES BASSINS D'ÉTUDE	234
TABLEAU 34 : ORGANISATION DE LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU POUR LES BASSINS SOUS L'AUTORITÉ DES PROVINCES	242
TABLEAU 35 : ORGANISATION DE LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU POUR LES BASSINS SOUS L'AUTORITÉ DU GOUVERNEMENT CENTRAL	243

LISTE DES SIGLES

Abréviation	Indonésien	Anglais
Organisation		
JBIC		Japan Bank of International Cooperation
JICA		Japan International Cooperation Agency
OTCA		Overseas Technical Cooperation Agency
ADB		Asian Development Bank
IBRD (WB)		International Bank of Reconstruction and Development (Work Bank)
GWP		Global Water Partnership
FAO		Food and Agriculture Organization
WHO (OMS)		World Health Organization
INBO (RIOB)		International Network of Basin Organizations
DPU	Departemen Pekerjaan Umum	Ministry of Public Works
DGWR	Directorat Jenderal Sumber Daya Air	Directorate General of Water Resources
Dinas PSDA	Dinas Pekerjaan Umum Sumber Daya Air Propinsi Jawa Timur	Provincial Water Resources Service of Central Java
Balai PSDA	Balai Pengelolaan Sumber Daya Air	Regional Office of Water Resources Management
BAPPENAS	Badan Perencanaan Pembangunan Nasional	National Development Planning Agency
BAPPEDA	Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Propinsi Daerah Tingkat I	Regional Development Planning Agency of Province
DEPTAN	Departemen Pertanian	Ministry of Agriculture
DEPHUT	Departemen Kehutanan	Ministry of Forestry
-	Perum Perhutani	State Forestry Company
BPS	Biro Pusat Statistic	Central Bureau of Statistics
BAKOSURTANAL	Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional	National Coordination Agency for Surveys and Mapping
BMG	Badan Meteorologi dan Geofisika	Meteorological and Geophysical Agency
Administration		
-	Kota	Municipality, City
-	Kabupaten	Regency
-	Kecamatan	District
-	Kelurahan	Village
-	Bupati (Kepala Daerah TK II)	Head of Regency
-	Wali Kota	Mayor
-	Camat	Head of District

Entreprise publiques

etc.

Perum

Perusahaan Umum

Public Corporation

-

Perum Perhutani

State Forestry Corporation

PDAM

Perusahaan Daerah Air Minum

Regional Drinking Water Supply Company

PJT

Perum Jasa Tirta

Public Water Service Corporation

ANNEXES

ANNEXE 1 : TAUX DE SÉDIMENTATION DANS QUELQUES BARRAGES À TRAVERS LE MONDE	282
ANNEXE 2 : RÉPARTITION DES VOLUMES D'EAU AFFECTÉS POUR LES DIFFÉRENTS USAGES DES PRINCIPAUX BARRAGES DE JAVA	283
ANNEXE 3 : PROTOCOLE DE QUANTIFICATION DE LA M.E.S SNI 03-3961-1995	284
ANNEXE 4 : EXEMPLE DE DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE BASSIN-VERSANT AMONT DU CITARUM. LES DONNÉES DE FÉVRIER 1987 SONT UN COPIÉ/COLLÉ DES DONNÉES DE JANVIER 1987	285
ANNEXE 5 : LA COMPOSITION COLORÉE : MÉTHODOLOGIE.....	287
ANNEXE 6 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES ÉCHOSONDAGES RÉALISÉS DANS LES DIFFÉRENTS RÉSERVOIRS ÉTUDIÉS	291
ANNEXE 7 : LISTE DES PROJETS SUPPORTÉS PAR L'AGENCE JAPONAISE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE (JICA)	293

Annexes

Pays	Réservoir	Aire de drainage km ²	Capacité originale Mm ³	Année de construct°	Période	Taux de sédimentat° m ³ /km ² /an	Source
Algérie	Cheurfa	4 015	14	-	85	14,65	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Boughzoul	19 740	55	1934	68	33,43	Remini W. et autres, 2003
Algérie	Boughzoul	19 740	55	1934	52	33,73	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Sarno	264	22	1953	32	50,90	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Maffrouche	85	15	1962	46	102,30	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Djorf Torba	22 000	360	1969	19	104,31	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Fergoug	8 274	18	1970	16	106,51	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Bouhanifia	7 850	73	1948	23	116,31	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Ghrib	23 300	280	1939	47	129,15	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Ghrib	23 300	280	1939	63	137,34	Remini W. et autres, 2003
Algérie	Beni Bahdel	990	63	1938	42	158,73	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	SMBA	6 100	235	1978	7	177,99	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Foum El Gueiss	153	3	1939	47	194,69	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Cheffia	575	171	1965	21	215,32	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Bakhada	1 275	56	1936	23	360,10	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Foum El Gharza	1 300	47	1952	36	453,85	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	El Gherza	1 300	47	1952	6	577,00	Chanson H.,1998
Algérie	Hamiz	139	21	1935	72	1300,00	Chanson H.,1998
Algérie	Ksob	1 470	31	1939	9	1403,63	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Hamiz	137	21	1935	51	1790,47	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Ighil Emda	650	155	1953	49	2046,15	Remini W. et autres, 2003
Algérie	Oued El Fodda	790	228	1932	54	2243,32	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Eghilmada	650	154	-	20	2615,38	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Oued El Fodda	790	228	1932	70	2924,05	Remini W. et autres, 2003
Algérie	Oued El Fodda	800	228	1932	16	3060,00	Chanson H.,1998
Algérie	Zardezaz	346	31	1948	9	5208,73	Kassoul M. et autres, 1997
Algérie	Oued El Fodda	800	228	1932	2	5625,00	Chanson H.,1998
Algérie	El Ouldja	1	-	-	1	7960,00	Chanson H.,1998
Australie	Moore Creek	51	0	1898	13	174,00	Chanson H.,1998
Australie	Pekina Creek	136	1	1905	33	174,00	Chanson H.,1998
Australie	Eildon	3 885	10	1956	1	381,00	Chanson H.,1998
Australie	Corona	15	0	1890	20	400,00	Chanson H.,1998
Australie	Umberumberka	420	8	1914	3	407,00	Chanson H.,1998
Australie	Pykes Creek	125	24	1911	34	465,00	Chanson H.,1998
Australie	Quipolly	70	-	-	2	1143,00	Chanson H.,1998
Australie	Korrumbyn	3	-	-	6	1400,00	Chanson H.,1998
Autriche	Pontebba	10	-	-	18	1556,00	Chanson H.,1998
Autriche	Wetzmann	324	-	-	1	1852,00	Chanson H.,1998
Autriche	Saifnitz	4	-	-	1	6820,00	Chanson H.,1998
Chine	Sanmenxia	688 400	9 705	1960	43	219,79	Long Y. et autres, 2004
Chine	Xiaolangdi	694 000	12 600	2000	3	649,38	-
Egypte	Assouan	2 849 000	162 000	1964	36	33,15	Makary A.Z. et autres, 2004
Etats-Unis	Roosevelt	14 900	1 918	1911	19	438,00	Chanson H.,1998
Etats-Unis	Black rock	1 290	3	1908	21	546,00	Chanson H.,1998

Annexes

Etats-Unis	White Rock	295	49	1911	5	570,00	Chanson H.,1998
Etats-Unis	Sweetwater	482	64	1888	1	10599,00	Chanson H.,1998
Etats-Unis	Webster Reservoir	2 978	78	1956	40	13,12	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Cheney Reservoir	2 416	219	1964	33	109,82	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Tuttle Creek Lake	24 936	531	1962	37	189,84	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Lake Olathe	43	4	1956	45	202,10	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Lake Afton	27	4	1942	41	316,09	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Otis Creek reservoir	36	6	1971	31	340,18	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Gardner City Lake	14	3	1940	60	405,53	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Cedar Lake	16	1	1938	62	422,86	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Hillsdale Lake	373	86	1981	15	463,02	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Mission Lake	22	2	1924	76	674,74	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Perry Lake	2 893	304	1969	32	755,47	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Crystal Lake	2	0	1879	121	819,99	Juracek, K.E., 2006
Etats-Unis	Mound City Lake	15	2	1979	21	969,70	Juracek, K.E., 2006
Ethiopie	Filiglig	6	0	2005	2	1132,03	Ermias A. et autres, 2006
Ethiopie	Grashito	5	0	2005	2	2345,79	Ermias A. et autres, 2006
France	Pont-du-Loup	750	-	-	1	1818,00	Chanson H.,1998
Gde-Bretagne	Abbeystead	49	1	1881	18	308,00	-
Inde	Muchkundi	67	-	-		1165,00	Chanson H.,1998
Indonésie	Lodoyo	3 017	6	1980	31	27,37	PJT 1, 2012
Indonésie	Wlingi	2 890	24	1977	34	200,28	PJT 1, 2012
Indonésie	Sengguruh	1 659	21.5	1988	23	536,21	PJT 1, 2012
Indonésie	Lahor	160	36	1977	34	1299,63	PJT 1, 2012
Indonésie	Selorejo	236	62	1971	40	2562,50	PJT 1, 2012
Indonésie	Sutami	2 050	343	1972	39	2324,33	PJT 1, 2012
Indonésie	Jatiluhur	4 500	3 000	1963	46	3971,01	PJT 2, 2009
Indonésie	Mrica	1 022	194	1989	23	4275,50	Indonesia Power, 2012
Indonésie	Cirata	4 119	2 165	1988	12	4816,91	Indonesia Power, 2000
Indonésie	Saguling	2 283	982	1986	18	6120,11	Indonesia Power, 2004
Indonésie	Bening	90	38	1981	26	3446,50	PJT 1, 2012
Indonésie	Wonogiri	1 350	560	1980	31	4816,30	PJT 1, 2012
Iran	Sefidrud	56 200	1 760	1962	18	691,97	Water Research Institute
Iran	Zayandehrud	42 000	1 460	1970	28	1124,15	Water Research Institute
Iran	Dez	17 320	3 460	1962	35	1124,76	Water Research Institute
Italie	Corlo	628	49	1954	36	3464,51	Vitali R. et autres, 1995
Italie	Boschi	170	1	1930	54	137,17	Vitali R. et autres, 1995
Italie	Quarto di Romagna	215	5	1925	65	932,54	Vitali R. et autres, 1995
Italie	Riolunato	149	1	1920	70	110,20	Vitali R. et autres, 1995
Italie	Cismon	496	-		10	353,00	Chanson H.,1998
Italie	Lavagnina	26	-	1882	20	784,00	Chanson H.,1998
Italie	Monte Reale	436	-		1	1927,00	Chanson H.,1998
Maroc	Mohamed V	50 000	725	1967	35	232,00	Remini W. et autres, 2003
Maroc	El Massira	28 500	2 724	1979	23	315,79	Remini W. et autres, 2003
Maroc	Mansour Edahabi	15 000	592	1972	30	320,00	Remini W. et autres, 2003

Annexes

Maroc	Bir El Ouidane	6 400	1 484	1953	49	703,13	Remini W. et autres, 2003
Pologne	Porabka	1 082	27	1937	2	288,00	Chanson H., 1998
Pologne	Roznov	4 885	167	1941	3	398,00	Chanson H., 1998
Porto Rico	La Plata	469	40	1974	24	422,00	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Prieto	25	1	1955	42	518,43	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Loiza	538	27	1953	41	571,67	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Patillas	65	18	1914	83	701,44	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Cidra	21	7	1946	51	715,01	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Yahuecas	45	2	1956	41	772,15	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Garzas	16	6	1943	53	834,54	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Guajataca	80	48	1928	71	1091,17	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Dos Bocas	310	38	1942	57	1101,30	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Loco	22	2	1951	49	1434,95	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Carite	21	14	1913	86	1819,87	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Caonillas	127	56	1948	52	2033,16	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Guayo	25	19	1956	41	2580,30	Soler-López, L.R., 2001
Porto Rico	Lucchetti	45	20	1952	48	3937,92	Soler-López, L.R., 2001
Roumanie	Antohesti	40	0	1984	11	206,46	Purvanel G. et autres, 2004
Roumanie	Gaiceana	47	0	1984	11	331,29	Purvanel G. et autres, 2004
Roumanie	Cuibul Vulturilor	542	10	1978	14	408,54	Purvanel G. et autres, 2004
Roumanie	Râpa Albastra	253	11	1979	14	632,41	Purvanel G. et autres, 2004
Roumanie	Fichitesti	163	6	1977	16	1108,13	Purvanel G. et autres, 2004
Roumanie	Puscasi	296	17	1973	25	1472,97	Purvanel G. et autres, 2004
Taiwan	Shihmen	763	60	-	6	4366,00	Chanson H., 1998
Taiwan	Tsengwen	460	-	-	10	6300,00	Chanson H., 1998
Taiwan	Wu-Sheh	205	-	-	3	7274,00	Chanson H., 1998
Taiwan	Wu-Sheh	205	-	-	2	9959,00	Chanson H., 1998
Taiwan	Wu-Sheh	205	-	-	1	10838,00	Chanson H., 1998
Tunisie	Sidi Salem	18 250	555	1981	21	306,85	Remini W. et autres, 2003
Tunisie	Mellegue	10 300	332	1954	48	576,70	Remini W. et autres, 2003
Tunisie	Sidi Saad	8 950	209	1981	10	603,35	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Houmine	418	130	1983	8	1196,17	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Bou Hertma	390	118	1976	15	1282,05	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Nebhana	855	86	1965	26	1918,13	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Bezirk	84	6	1960	31	1952,38	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Lakhmess	127	8	1966	25	2464,57	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Lebna	199	29	1986	5	2512,56	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Siliana	1 040	70	1987	4	3365,38	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Chiba	64	8	1965	26	3515,63	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Masri	53	7	1968	23	3811,32	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Kasseb	101	82	1969	22	4227,72	Lahlou A. , 1991,
Tunisie	Marguellil	1 120	110	1990	1	4910,71	Lahlou A. , 1991,

Annexe 1 : Taux de sédimentation dans quelques barrages à travers le monde

Annexes

Fleuve	Barrages	Surface du bassin (Km ²)	Capacité (10 ⁶ m ³)	Année	Fonctions	Capacité hydroélectrique (MW)	Irrigation agricole (Km ²)	Utilisation industrielle (10 ⁶ m ³)	Aquaculture et pêche (10 ⁶ m ³)	Fourniture en eau municipale (10 ⁶ m ³)
Citarum	Jatiluhur	4 500	3 000,00	1963	A,F,I,N,P,W	150,00	3045,00	45,75	47,30	400,50
Citarum	Saguling	2 283	982,00	1986	P	700,00				
Citarum	Cirata	4 119	2 165,00	1988	P	500,00				
Bengawan Solo	Wonogiri	1 350	560,00	1981	A,F,N,P	12,40	232,00		560,00	
Serayu	Mrica	1 022	193,50	1989	P	180,00	65,50		141,00	
Widas	Bening	89,5	37,50	1981	A,F,P	0,65	91,20			
Konto	Selorejo	236	62,30	1971	A,F,P	4,50	57,00			
Brantas	Sutami	2 050	343,00	1972	A,F,P	3 x 35	340,00	48,00		45,00
Brantas	Lahor	160	36,10	1977	A,F,P		11,00			
Brantas	Wlingi	2 890	24,10	1977	A,F,P	2 x 27	150,00			
Brantas	Lodoyo	3 017	5,90	1980	A,F,P	4,50				
Brantas	Sengguruh	1 659	21,50	1988	N,P	2 x 14,5				
	Catalogue of rivers (Vol.1 & 3) UNESCO				A	Irrigation		N	Maintien des débits	
	Indonesia Power				F	Contrôle des inondations		I	Usage industriel	
	Jasa Tirta 1				P	Hydroélectricité		W	Fourniture en eau municipale	

Annexe 2 : Répartition des volumes d'eau affectés pour les différents usages des principaux barrages de Java



A



B



C

- 1/ Passage de l'échantillon au four pendant 1 heure à 550°C (photo B3)
- 2/ Une fois refroidi, passage au dessiccateur pendant 15 minutes (photo B1)
- 3/ Pesée de l'échantillon (photo C)
- 4/ Passage au four pendant 1 heure à 110 °C (photo B3)
- 5/ Une fois refroidi, second passage au dessiccateur 15 minutes
- 6/ Pesée de l'échantillon
- 7/ Répétition de la procédure jusqu'à avoir une différence de moins de 4% entre la pesée et la pesée précédente
- 8/ Mettre l'échantillon dans un tube à essai pour connaître 1/ le volume d'eau – 2/ le volume d'eau + le volume d'échantillon (photo A)
- 9/ Mettre la porcelaine sur la flamme sans faire bouillir l'échantillon (photo B2)
- 10/ Quand l'eau est évaporée, passage au four 1-2h à 105°C
- 11/ Troisième passage au dessiccateur 15 minutes
- 12/ Dernière pesée de l'échantillon

Annexe 3 : Protocole de quantification de la M.E.S SNI 03-3961-1995

REALISASI AIR MASUK , KELUAR , CURAH HUJAN DAN DMA WADUK
 PRODUKSI PEMBANGKITAN PLTA SAGULING
 TAHUN 1987

Bulan : Januari 1987

Tg	TMA Nanjung	Inflow		Outflow M3/sec	Produksi KWH	Pemakaian Air	DMA (M)	Evapo rasi	STASIUN PENGUKUR / PENAKAR CURAH HUJAN (mm)											Jumlah
		Nanjung	DAM						Cicalengka	Paseh	Chincona	Ciparay	U. Berung	Bandung	Cililin	Montaya	Sukawana	DCC	Cisondar	
1	3,117	226,71	235,35	80,13	6 355 000	6 923 232			0	9	5	25	13	1	0	33	2	1	4	93
2	2,801	165,65	165,15	121,81	9 593 000	10 524 384			0	22	12	0	9	1	0	0	1	2	0	47
3	2,585	159,80	153,08	125,05	9 955 000	10 804 320			0	33	36	9	12	15	11	12	8	13	14	163
4	2,936	202,63	224,22	108,15	8 556 000	9 344 160			0	7	35	3	38	3	6	68	4	7	29	200
5	3,006	211,85	208,65	134,34	10 838 000	11 606 976			0	3	3	0	5	1	1	3	2	4	9	31
6	2,730	176,97	194,00	101,81	8 032 000	8 796 384			0	0	1	0	7	8	26	13	35	21	3	114
7	2,608	162,53	218,10	86,9	7 046 000	7 508 160			0	7	33	5	3	1	43	2	3	22	33	152
8	2,655	167,93	168,37	119,07	9 455 000	10 287 648			0	1	4	0	0	0	0	3	0	0	1	9
9	2,390	138,2	148,00	135,93	10 781 000	11 744 352			0	12	15	2	7	10	7	21	2	41	1	118
10	2,295	129,28	123,16	119,35	9 525 000	10 311 840			0	1	0	5	1	1	3	15	3	6	0	35
11	2,233	121,97	100,28	87,30	7 069 000	7 542 720			0	5	4	1	0	0	1	13	1	2	2	29
12	2,114	110,4	75,92	109,63	8 843 000	9 472 032			0	1	10	3	0	0	1	11	2	1	5	34
13	1,984	98,26	114,61	94,38	7 624 000	8 154 432			0	8	9	1	2	3	10	19	1	13	3	69
14	1,919	92,50	20,00	89,59	7 108 000	7 740 576			0	1	1	0	2	5	12	2	0	10	0	33
15	1,788	81,48	13,93	68,52	5 530 000	5 920 128			0	2	7	1	1	3	4	28	4	4	4	58
16	1,734	77,08	8,00	103,61	8 191 000	8 951 904			0	0	8	0	0	0	0	1	1	0	0	10
17	1,709	75,08	0,00	130,34	10 376 000	11 261 376			0	1	5	1	0	2	3	9	2	5	0	28
18	1,643	70	16,29	97,16	7 606 000	8 394 624			0	11	1	0	0	0	2	0	1	0	5	20
19	1,592	66,17	0,00	107,88	8 511 000	9 320 832			0	1	1	1	0	0	1	10	0	2	4	20
20	1,551	63,21	0,00	135,54	10 765 000	11 710 656			0	0	12	0	0	0	0	23	2	0	9	46
21	1,555	63,50	0,00	133,7	11 408 000	11 551 680			0	48	1	0	0	0	0	1	1	1	2	54
22	1,553	63,36	366,29	152,07	11 072 000	13 138 848			11	21	7	15	8	16	63	13	22	66	14	256
23	1,833	85,21	70,22	131,42	10 411 000	11 354 688			9	15	2	6	33	0	0	1	3	0	3	72
24	1,968	96,63	0,00	122,07	9 449 000	10 546 848			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1,843	86,04	22,33	89,31	7 118 000	7 716 384			0	0	0	1	0	0	2	0	2	2	0	7
26	1,672	72,25	0,00	117,59	9 188 000	10 159 776			11	27	40	12	9	12	26	7	31	25	5	205
27	1,774	80,33	6,50	125,64	9 876 000	10 855 296			5	7	8	6	3	2	5	1	8	3	3	51
28	2,029	102,36	10,00	126,31	9 958 000	10 913 184			0	2	1	1	1	1	1	0	3	0	2	11
29	1,940	94,37	0,00	118,60	9 173 000	10 247 040			0	6	6	1	1	2	2	5	10	1	5	39
30	1,818	83,92	0,00	108,58	8 518 000	9 381 312			1	2	9	0	4	7	15	2	27	5	11	83
31	1,765	79,58	7,33	113,53	8 819 000	9 808 992			0	2	5	1	2	2	1	0	5	0	2	20

REALISASI AIR MASUK , KELUAR , CURAH HUJAN DAN DMA WADUK
 PRODUKSI PEMBANGKITAN PLTA SAGULING
 TAHUN 1987

Bulan : Februari 1987

Tg	TMA Nanjung	Inflow		Outflow M3/sec	Produksi KWH	Pemakaian Air	DMA (M)	Evapo rasi	STASIUN PENGUKUR / PENAKAR CURAH HUJAN (mm)											Jumlah
		Nanjung	DAM						Cicalengka	Paseh	Chincona	Ciparay	U. Berung	Bandung	Cililin	Montaya	Sukawana	DCC	Cisondar	
1	1,757	78,96	5,88	82,41	6 408 000	7 120 224			0	9	5	25	13	1	0	33	2	1	4	93
2	1,929	93,38	27,63	124,47	9 723 000	10 754 208			0	22	12	0	9	1	0	0	1	2	0	47
3	2,297	128,50	38,46	123,04	9 695 000	10 630 656			0	33	36	9	12	15	11	12	8	13	14	163
4	2,200	118,71	0,00	116,42	9 168 000	10 058 688			0	7	35	3	38	3	6	68	4	7	29	200
5	1,981	98,00	7,42	118,00	9 249 000	10 195 200			0	3	3	0	5	1	1	3	2	4	9	31
6	1,865	87,87	0,13	102,06	8 048 000	8 817 984			0	0	1	0	7	8	26	13	35	21	3	114
7	1,770	80,00	24,67	113,13	8 826 000	9 774 432			0	7	33	5	3	1	43	2	3	22	33	152
8	1,765	79,58	22,88	90,14	6 936 000	7 788 096			0	1	4	0	0	0	0	3	0	0	1	9
9	1,782	81,00	0,00	127,53	9 892 000	11 018 592			0	12	15	2	7	10	7	21	2	41	1	118
10	1,720	76,00	1,17	139,56	10 944 000	12 057 984			0	1	0	5	1	1	3	15	3	6	0	35
11	1,670	72,08	0,00	113,43	8 918 000	9 800 352			0	5	4	1	0	0	1	13	1	2	2	29
12	1,666	71,77	0,00	122,27	9 480 000	10 564 128			0	1	10	3	0	0	1	11	2	1	5	34
13	1,592	66,21	0,00	102,73	8 046 000	8 875 872			0	8	9	1	2	3	10	19	1	13	3	69
14	1,553	63,30	17,33	138,99	10 752 000	12 008 736			0	1	1	0	2	5	12	2	0	10	0	33
15	1,731	76,87	44,42	117,16	9 058 000	10 122 624			0	2	7	1	1	3	4	28	4	4	4	58
16	2,035	102,96	1,92	140,60	10 968 000	12 147 840			0	0	8	0	0	0	0	1	1	0	0	10
17	2,032	102,67	0,00	123,31	9 410 000	10 653 984			0	1	5	1	0	0	2	3	9	2	5	28
18	1,987	96,54	2,08	99,48	7 850 000	8 595 072			0	11	1	0	0	0	2	0	1	0	5	20
19	2,464	146,25	70,58	87,81	7 016 000	7 586 784			0	1	1	1	0	0	1	10	0	2	4	20
20	2,598	161,35	100,13	97,74	7 808 000	8 444 736			0	0	12	0	0	0	0	23	2	0	9	46
21	2,576	158,80	86,80	99,42	7 983 000	8 589 888			0	48	1	0	0	0	0	1	1	1	2	54
22	2,367	135,79	50,88	82,19	6 337 000	7 101 216			11	21	7	15	8	16	63	13	22	66	14	256
23	2,264	125,17	10,92	116,56	9 168 000	10 070 784			9	15	2	6	33	0	0	1	3	0	3	72
24	2,323	131,18	19,45	118,04	9 297 000	10 198 656			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	2,225	121,17	6,44	121,17	9 604 000	10 469 088			0	0	0	1	0	0	2	0	2	2	0	7
26	2,144	113,21	0,29	124,90	9 653 000	10 791 360			11	27	40	12	9	12	26	7	31	25	5	205
27	2,030	102,52	0,00	129,46	10 056 000	11 185 344			5	7	8	6	3	2	5	1	8	3	3	51
28	1,924	92,96	0,00	123,73	9 687 000	10 690 272			0	2	1	1	1	1	0	0	3	0	2	11
29									0	6	6	1	1	2	2	5	10	1	5	39
30									1	2	9	0	4	7	15	2	27	5	11	83
31									0	2	5	1	2	2	1	0	5	0	2	20

Annexe 4 : Exemple de données pluviométriques dans le bassin-versant amont du Citarum. Les données de février 1987 sont un copié/collé des données de janvier 1987

La réalisation d'une composition colorée consiste à affecter à chacune des trois couleurs primaires (le rouge, le vert et le bleu) trois bandes spectrales d'un capteur satellite. La couleur sert avant tout à faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux. Leur emploi, après traitement, permet ainsi de faciliter l'interprétation d'un territoire et de rendre l'analyse plus aisée.

Par synthèse additive, toutes les couleurs peuvent être reconstituées. Les couleurs résultantes sont fonction des valeurs numériques des pixels dans chacune des trois bandes spectrales. Par exemple, les pixels correspondant à la végétation ont des valeurs plus élevées dans le proche IR (forte réflexion du rayonnement due à la structure cellulaire de la feuille) que dans le rouge et dans le vert (absorption du rayonnement visible). La végétation apparaît donc en rouge sur la composition colorée. Les teintes bleues (bleu foncé au bleu cyan) de l'eau, sont liées au fait que seules les plus courtes longueurs d'onde (vertes) parviennent jusqu'au fond et sont réfléchies vers la surface. Dans le rouge, la majeure partie du rayonnement est absorbée avant d'avoir pu atteindre le fond. Dans le proche IR, il est absorbé très rapidement par les premiers micromètres de la surface marine.

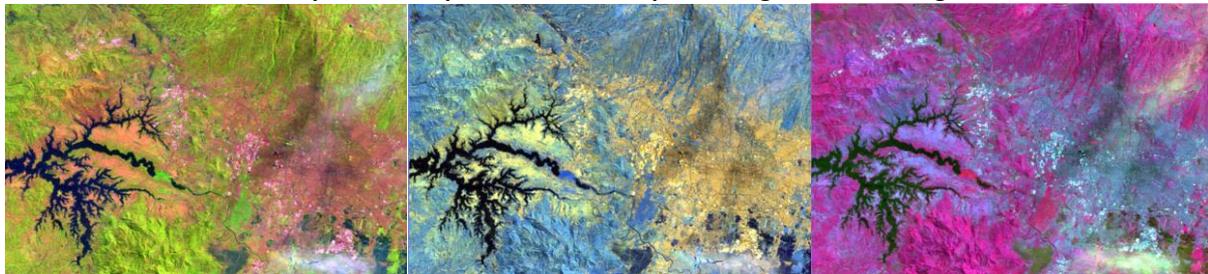
En fonction de l'affectation des couleurs primaires aux trois bandes spectrales, on obtient soit une composition colorée dite naturelle ou vraies couleurs, soit une composition en fausses couleurs.

- Dans une image en vraies couleurs, on affecte aux bandes spectrales acquises dans les longueurs d'onde du bleu, du vert et du rouge, les trois couleurs primaires correspondantes. Le rouge est attribué à la bande rouge, le vert à la bande verte et le bleu à la bande bleue. L'image résultante correspond donc exactement à ce qu'un observateur pourrait observer s'il se trouvait à bord du satellite. Sur le capteur Landsat TM, qui sera le format d'image principalement utilisé, la végétation apparaît en vert foncé, les surfaces cultivées en vert plus clair et les surfaces minérales (bâties) apparaissent très claires (blanc). L'eau, quant à elle, apparaît dans des teintes qui vont du bleu foncé au bleu cyan, selon la profondeur et la turbidité.
- Si les bandes spectrales de l'image ne correspondent pas aux trois couleurs primaires, l'image qui en résulte est appelée une image en fausses couleurs. Par conséquent, la couleur d'un objet dans l'image affichée n'a pas de ressemblance avec sa couleur réelle. Il existe plusieurs façons de produire des images en fausses couleurs chacune étant plus adaptée à une application particulière. Cette combinaison est très utilisée en télédétection car elle est tout à fait adaptée à l'étude de la végétation car cet affichage attribue des couleurs fictives aux bandes spectrales afin de déterminer les différentes propriétés de la végétation qui réfléchit très fortement le rayonnement proche IR. Sur la composition colorée, la végétation apparaît dans différentes teintes de rouge en fonction des espèces, mais aussi des conditions environnementales. L'eau qui absorbe pratiquement toutes les longueurs d'onde apparaît très foncée, presque noire, alors que les surfaces minérales apparaissent très claires, dans des tons allant du bleu clair au blanc. Par exemple, la réflectance plus élevée de l'eau dans le domaine du visible que dans celui de l'infrarouge nous conduira à utiliser préférentiellement les bandes 123 (bleu / vert / rouge) si l'on s'intéresse à la

profondeur ou à la couleur de l'eau. En revanche, si nous nous préoccupons de la végétation, les bandes rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge seront plus appropriées.

Lorsque plus de trois bandes spectrales sont disponibles sur un capteur satellitaire, ce qui est par exemple le cas pour les capteurs Landsat TM et TM+ qui acquiert sept images simultanément dans sept longueurs d'onde différentes allant du visible à l'infrarouge thermique, rien n'interdit de réaliser une composition colorée autre que les combinaisons standards en fonction de ce que l'on souhaite mettre en évidence. Il est ainsi possible d'identifier certains types de milieux à l'aide, d'une part, de la signature spectrale des surfaces dans les différentes longueurs d'onde et, d'autre part, de la sensibilité de l'œil pour les couleurs et les contrastes de couleurs. Ci-dessous quelques unes des nombreuses combinaisons parmi les 35 possibles à partir du capteur Thematic Mapper.

Différents exemples de compositions colorées pour la région de Bandung - Java-ouest



Combinaison 542

Combinaison 754

Combinaison 435

Annexe 5 : La composition colorée : méthodologie

Rivières (Km)	Barrages Localisation	Surface du bassin (km ²)	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	Année	Capacité restante (10 ⁶ m ³)	Année	Sédimentation de la période (10 ⁶ m ³)	Sédimentation cumulée (10 ⁶ m ³)	Période		Taux de sédimentation (m ³ /km ² /an)
Bengawan Solo (540)	Wonogiri (Java-Centre)	1350	560,00	1980	477,10	1993	82,90	82,90	1980	1993	4 724
					433,00	2005	44,10	127,00	1993	2005	2 722
					391,28	2008	41,72	168,72	2005	2008	10 301
					364,94	2011	26,35	195,07	2008	2011	6 505
Brantas (320)	Sengguruh (Java-Est)	1659	21,50	1988	5,36	1993	16,14	16,14	1988	1993	1 946
					2,16	1996	3,20	19,34	1993	1996	643
					5,35	1997	-3,19	16,15	1996	1997	-1 923
					3,52	2001	1,83	17,98	1997	2001	276
					3,20	2002	0,32	18,30	2001	2002	193
					2,30	2003	0,90	19,20	2002	2003	542
					1,48	2005	0,82	20,02	2003	2005	247
					1,02	2008	0,46	20,48	2005	2008	92
Brantas (320)	Lahor (Java-Est)	160	36,10	1977	33,05	1994	3,05	3,05	1977	1994	1 121
					32,43	1995	0,62	3,67	1994	1995	3 875
					31,48	1999	0,95	4,62	1995	1999	1 484
					31,30	2002	0,18	4,80	1999	2002	375
					30,60	2006	0,70	5,50	2002	2006	1 094
					28,32	2009	2,28	7,78	2006	2009	4 750
Konto	Selorejo (Java-Est)	236	62,30	1971	59,20	1977	3,10	3,10	1971	1977	2 189
					58,13	1982	1,07	4,17	1977	1982	907
					56,64	1988	1,49	5,66	1982	1988	1 052
					48,87	1993	7,77	13,43	1988	1993	6 585
					47,61	1997	1,26	14,69	1993	1997	1 335
					42,70	1999	4,91	19,60	1997	1999	10 403
					44,01	2003	-1,31	18,29	1999	2003	-1 388
					41,69	2007	2,32	20,61	2003	2007	2 458
					39,59	2009	2,10	22,71	2007	2009	4 449
38,11	2011	1,48	24,19	2009	2011	3 138					

Annexes

Widas	Bening (Java-Est)	89,5	32,90	1981	31,70	1993	1,20	1,20	1981	1993	1 117
					28,74	2004	2,96	4,16	1993	2004	3 007
					25,72	2007	3,02	7,18	2004	2007	11 248
Brantas (320)	Sutami (Java-Est)	2050	343,00	1972	253	1977	90	90,00	1972	1977	8 780
					221,29	1982	31,71	121,71	1977	1982	3 094
					192,41	1987	28,88	150,59	1982	1987	2 818
					192,39	1989	0,02	150,61	1987	1989	5
					189,97	1992	2,42	153,03	1989	1992	393
					185,27	1994	4,7	157,73	1992	1994	1 146
					184,59	1995	0,68	158,41	1994	1995	332
					183,42	1997	1,17	159,58	1995	1997	285
					180,45	1999	2,97	162,55	1997	1999	724
					176,00	2002	4,45	167,00	1999	2002	724
					174,57	2003	1,43	168,43	2002	2003	698
					174,60	2004	-0,03	168,40	2003	2004	-15
					174,29	2007	0,31	168,71	2004	2007	50
					165,45	2009	8,84	177,55	2007	2009	2 156
					157,17	2011	8,283	185,83	2009	2011	2 020
Brantas (320)	Wlingi (Java-Est)	2890	24,10	1 977	18,32	1982	5,78	5,78	1977	1982	400
					14,44	1985	3,88	9,66	1982	1985	448
					9,50	1988	4,94	14,60	1985	1988	570
					4,60	1990	4,90	19,50	1988	1990	848
					4,77	1991	-0,17	19,33	1990	1991	-59
					2,51	1992	2,26	21,59	1991	1992	782
					1,98	1993	0,53	22,12	1992	1993	183
					4,94	1995	-2,96	19,16	1993	1995	-512
					5,75	1996	-0,81	18,35	1995	1996	-280
					4,00	2001	1,75	20,10	1996	2001	121
					4,41	2004	-0,41	19,69	2001	2004	-47
					4,54	2007	-0,13	19,56	2004	2007	-15
					4,64	2008	-0,10	19,46	2007	2008	-35
					4,49	2010	0,15	19,61	2008	2010	26
					4,42	2011	0,08	19,69	2010	2011	26

Brantas (320)	Lodoyo (Java-Est)	3017	5,20	1 980	3,69	1990	1,51	1,51	1980	1990	50
					2,84	1993	0,85	2,36	1990	1993	94
					2,35	1996	0,49	2,85	1993	1996	54
					2,60	2003	-0,25	2,60	1996	2003	-12
					2,77	2007	-0,17	2,43	2003	2007	-14
					2,78	2008	-0,01	2,42	2007	2008	-3
					2,66	2010	0,12	2,54	2008	2010	20
					2,64	2011	0,02	2,56	2010	2011	7
Serayu (158)	Mrica (Java-Centre)	1022	193,50	1 988	190,12	1989	3,38	3,38	1988	1989	3 310
					186,68	1990	3,44	6,82	1989	1990	3 367
					180,66	1991	6,02	12,84	1990	1991	5 889
					176,87	1992	3,78	16,63	1991	1992	3 701
					173,39	1993	3,49	20,11	1992	1993	3 413
					170,00	1994	3,39	23,50	1993	1994	3 314
					164,98	1995	5,02	28,52	1994	1995	4 915
					160,37	1996	4,60	33,13	1995	1996	4 505
					158,20	1997	2,17	35,30	1996	1997	2 128
					152,20	1998	6,00	41,30	1997	1998	5 870
					147,66	1999	4,54	45,84	1998	1999	4 440
					140,63	2000	7,03	52,87	1999	2000	6 876
					137,25	2001	3,38	56,25	2000	2001	3 309
					133,73	2002	3,52	59,77	2001	2002	3 447
					129,30	2003	4,43	64,20	2002	2003	4 335
					126,40	2004	2,90	67,10	2003	2004	2 838
					121,80	2005	4,60	71,70	2004	2005	4 501
					117,90	2006	3,90	75,60	2005	2006	3 816
114,20	2007	3,70	79,30	2006	2007	3 620					
110,00	2008	4,20	83,50	2007	2008	4 110					
105,12	2009	4,88	88,38	2008	2009	4 775					
93,00	2012	12,12	100,50	2009	2012	3 953					

Annexes

Citarum (269)	Saguling (Java-Ouest)	2283	982,00	1 986	730,50	2004	251,50	251,50	1986	2004	6 120
Citarum (269)	Cirata (Java-Ouest)	4119	2 165,00	1 988	1926,91	2000	238,09	238,09	1988	2000	4 817
Citarum (269)	Jatiluhur (Java-Ouest)	4500	3 000,00	1 963	2556,00	1987	444,00	444,00	1963	1987	4 111
					2458,00	1995	98,00	542,00	1987	1995	2 722
					2448,00	2000	10,00	552,00	1995	2000	444
					2178,00	2009	270,00	822,00	2000	2009	6 667

	Catalogue of rivers (Vol.1 & 3) UNESCO
	Institutional Strategies for Improving the Productivity of Agricultural Water Management (p.190)
	Jasa Tirta corporation
	Indonesia Power
	BTP DAS
	Puslitbang Sumber Daya Air

Annexe 6 : Tableau récapitulatif des échosondages réalisés dans les différents réservoirs étudiés

Annexes

Nom du projet	Objectifs	Année	Financement	ODA loan Montant ¥	ODA loan Montant \$
Bassin du Brantas					
<i>Karangkates Dam Project</i>	Contrôle des inondations, irrigation, hydroélectricité	1968-1974	Japon (réparation / ODA loan)	77 130 000	
<i>Kali-Konto Dam Project</i>	Contrôle des inondations, irrigation, hydroélectricité	1968-1971	Japon (réparation / ODA loan)	16 040 000	
<i>Brantas Delta Irrigation Rehabilitation Project</i>	Irrigation	1970	Japon (ODA loan)	4 680 000	
<i>Brantas Delta Refurbishment Project</i>	Rénovation des structures d'irrigation	1973	Japon (ODA loan)	4 680 000	
<i>Porong River Rehabilitation Project</i>	Contrôle des inondations	1977	Japon (ODA loan)	14 590 000	
<i>Karangkates Project (II) (Lahor Dam)</i>	Contrôle des inondations, hydroélectricité	1977	Japon (ODA loan)	32 680 000	
<i>Wlingi Dam Project</i>	Contrôle des inondations, irrigation, hydroélectricité	1978	Japon (ODA loan)	61 500 000	
<i>Brantas Middle Reaches River Improvement Project</i>	Contrôle des inondations	1978	Japon (ODA loan)	58 740 000	
<i>Surabaya River Rehabilitation Project</i>	Contrôle des inondations	1981	Japon (ODA loan)	40 800 000	
<i>Wlingi Project (II) (Lodoyo Dam)</i>	Contrôle des inondations, hydroélectricité	1980	Japon (ODA loan)	70 080 000	
<i>Widas Irrigation Project</i>	Irrigation	1982	Japon (ODA loan)	18 330 000	
<i>Lodoyo-Turungagung Irrigation Project</i>	Irrigation	1984	ADB		20 500 000
<i>Brantas River Middle Reaches Improvement Project</i>	Contrôle des inondations	1985	Japon (ODA loan)	62 220 000	
<i>Turungagung Drainage Project</i>	Contrôle des inondations, irrigation	1985	ADB		39 000 000
<i>Sengguruh Dam Generation of Electricity Project</i>	Hydroélectricité	1989	ADB		18 200 000
<i>Mount Kelud Urgent Volcanic Disaster Mitigation Project</i>		1991	Japon (ODA loan)	32 460 000	
<i>Brantas River Middle Reaches Improvement Project (II)</i>	Contrôle des inondations	1993	Japon (ODA loan)	60 000 000	

Annexes

Bassin Du Solo					
<i>Engineering Services for Wonogiri Multipurpose Dam Project</i>		1974	Japon (ODA loan)	4 300 000	
<i>Wonogiri Multipurpose Dam Project</i>	Contrôle des inondations, hydroélectricité	1975	Japon (ODA loan)	3 200 000	
<i>Wonogiri Multipurpose Dam Project</i>	Contrôle des inondations, hydroélectricité	1975	Japon (ODA loan)	103 360 000	
<i>Engineering Services for the Wonogiri Irrigation Project</i>	Irrigation	1976	Japon (ODA loan)	5 130 000	
<i>Wonogiri irrigation Project</i>	Irrigation	1977	Japon (ODA loan)	98 000 000	
<i>Wonogiri Hydro Power Plant Project</i>	Hydroélectricité	1978	Japon (ODA loan)	34 000 000	
<i>Engineering Services for Upper Solo and Madiun River Urgent Flood Control Project</i>	Contrôle des inondations	1980	Japon (ODA loan)	8 050 000	
<i>Upper Solo River Improvement Project</i>	Contrôle des inondations	1985	Japon (ODA loan)	47 460 000	
<i>Engineering Service for Lower Solo River Improvement Project</i>	Contrôle des inondations	1991	Japon (ODA loan)	6 690 000	
<i>Lower Solo River Improvement Project (I)</i>	Contrôle des inondations	1995	Japon (ODA loan)	107 960 000	
<i>Lower Solo River Improvement Project (II)</i>	Contrôle des inondations	2004	Japon (ODA loan)	93 450 000	
Bassin du Citarum					
<i>Engineering Services for Saguling Hydro Power Plant Project</i>	Hydroélectricité	1977	Japon (ODA loan)	16 300 000	
<i>Saguling Hydro-Electric Power Plant Project (Stage 2)</i>	Hydroélectricité	1980	Japon (ODA loan)	1 030 100	
<i>Upper Citarum Basin Urgent Flood Control Project (I)</i>	Contrôle des inondations	1993	Japon (ODA loan)	31 650 000	
<i>Upper Citarum Basin Urgent Flood Control Project (II)</i>	Contrôle des inondations	1998	Japon (ODA loan)	47 220 000	
<i>Water Resources Existing Facilities Rehabilitation and Capacity Improvement Project</i>	Ressources en eau	2001	Japon (ODA loan)	146 960 000	
TOTAL				1 308 690 100	77 700 000

Annexe 7 : Liste des projets supportés par l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA)

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	1
Résumé	4
Avant-propos	5
Remerciements	6
Introduction	7
Chapitre premier : La sédimentation dans les lacs de barrage - état de la question	13
I. État de l'art de la littérature sur la sédimentation des réservoirs de barrage	13
A. Pour une meilleure connaissance de la sédimentation dans les réservoirs de barrage	13
1. Les types de publications	13
a. Le faible nombre d'ouvrages généralistes sur le sujet	14
b. Une littérature plus fournie dans les études de cas et les rapports d'étude	14
2. Une thématique dominée par les sciences de l'ingénieur	15
a. Une approche hydraulique des processus	16
b. Les modèles mathématiques et physiques au cœur des préoccupations	16
c. De meilleures connaissances au service de la gestion durable des ouvrages	17
3. L'émergence des préoccupations environnementales et sociales	17
a. Un point de vue nouveau sur les barrages	17
b. La priorité des enjeux environnementaux	18
c. Une meilleure prise en compte des enjeux sociaux	21
B. Pour une meilleure évaluation des rythmes de sédimentation	22
1. L'érosion des sols	23
a. Les programmes de conservation des sols	23
b. Les parcelles expérimentales	24
c. Les modèles empiriques pour l'estimation des taux d'érosion des sols	26
2. Le transport fluvial des sédiments	29
a. L'importance de la connaissance des propriétés des sédiments	29
b. La matière en suspension (MES)	31
c. La charge de fond	32
3. Le dépôt des matériaux	34
a. Les dépôts temporaires	34
b. Les dépôts définitifs	34
II. Des taux et des rythmes de sédimentation hétérogènes à l'échelle mondiale	35
A. Présentation des résultats bibliographiques	35
1. État des données collectées : une représentation régionale de la sédimentation des réservoirs	35
2. Distribution des barrages étudiés par surface de drainage	36
3. Distribution par volume initial des réservoirs	37
B. Analyse des données de sédimentation pour les barrages étudiés	39
1. Étude des taux de sédimentation	39
2. Rapport taille du bassin versant / vitesse de sédimentation	41
3. Rapport durée du suivi / vitesse de sédimentation	42

III. Les facteurs de la sédimentation dans les réservoirs de barrage	43
A. Les facteurs physiques	43
1. Un climat aux précipitations fortes	43
2. Des sols meubles facilement mobilisables	44
a. La texture et la stabilité structurale des sols	44
b. Un cas d'école : le plateau des loess en Chine centrale	46
3. Une topographie marquée accélérant le déplacement des matériaux mobilisés	47
B. Les facteurs anthropiques	48
1. Une pression démographique forte	48
2. Le défrichement massif des surfaces boisées	49
a. Une ressource en danger	49
b. Une accélération de la déforestation	49
c. Les principales causes de la déforestation	50
3. Des politiques agricoles qui influencent les taux d'érosion	51
IV. Un enjeu pour une gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin.....	52
A. Les bailleurs de fonds - financeurs des grands barrages mondiaux.....	53
1. Les bailleurs de fonds multilatéraux	53
2. L'aide bilatérale	54
3. L'importance du financement dans la gestion des grands bassins fluviaux.....	55
B. La gestion intégrée des ressources en eau	56
1. Le rôle essentiel de la Commission mondiale des barrages (CMB).....	57
2. Les organismes de bassins.....	58
3. Une gestion qui tient compte des enjeux locaux et régionaux	61

Chapitre 2 : Présentation du cadre d'étude : les principaux bassins fluviaux de java..... 63

I. Un cadre favorable à la production sédimentaire	67
A. Une topographie escarpée en amont s'ouvrant sur de vastes plaines alluviales	67
1. Des secteurs amont dominés par des volcans actifs.....	67
2. De vastes plaines alluviales	69
B. Un cadre géologique marqué par le volcanisme et des sols contrastés	69
1. Géologie	69
2. Une structure faillée propice aux séismes	72
3. Des sols sensibles à l'érosion	73
C. Un climat tropical qui favorise l'ablation des matériaux	74
1. Un régime pluviométrique bien marqué aux perturbations cycliques	75
2. Des cours d'eau aux régimes fortement liés aux précipitations	79
II. Des enjeux élevés.....	81
A. Une pression démographique de plus en plus forte.....	81
1. Une croissance démographique élevée	81
2. Les zones les plus densément peuplées d'Indonésie	83
B. Des besoins agricoles croissants qui entraînent une mutation de l'occupation des sols	85
1. Une agriculture intensive en réponse à une demande accrue : la riziculture.....	85
2. La conversion des surfaces boisées en terres arables.....	87
3. Une fragilisation des terrains	89
C. L'industrialisation galopante et ses conséquences hydriques	90
1. Une croissance industrielle suivant l'expansion urbaine	90
2. Une crise permanente de l'eau	91
III. La construction des barrages pour répondre aux besoins javanais face à la gestion de l'eau	92
A. Barrages du bassin du Citarum	92
1. Le barrage de Jatiluhur.....	94
2. Le barrage de Cirata	94
3. Le barrage de Saguling	95

B.	Barrages du bassin du Solo et du Serayu	95
1.	Le barrage de Wonogiri	96
2.	Le barrage de Mrica	97
C.	Barrages du bassin du Brantas	98
1.	Le barrage de Sengguruh	98
2.	Les barrages de Sutami, Lahor, Wlingi et Lodoyo	99
3.	Le barrage de Selorejo.....	99

Chapitre 3 : Acquisition des données et présentation de la méthodologie101

I.	Acquisition des données	101
A.	Acquisition des données sédimentaires : état des données.....	101
1.	Les sondages de réservoir pour déterminer l’accumulation sédimentaire.....	102
a.	La technique des profils transversaux : méthodes et technique.....	103
b.	L’étude de la granulométrie et la mesure du débit solide dans la retenue	105
2.	Données concernant les échosondages	106
3.	Des données complémentaires	107
4.	Données concernant la charge sédimentaire dans les cours d’eau	110
a.	Les données de matières en suspension (MES) dans les cours d’eau javanais	111
b.	Campagne d’échantillonnage de MES dans les cours d’eau.....	114
B.	Acquisition des données sur les facteurs de la sédimentation	117
1.	Collecte des données pluviométriques	117
a.	Les données journalières.....	118
b.	Les données horaires.....	120
2.	Collecte des données hydrologiques.....	120
a.	Les données journalières.....	121
b.	Les données horaires.....	122
3.	Collecte des données numériques	122
a.	Données numériques pour le SIG : Rassembler et homogénéiser les informations disponibles 123	
b.	Collecte des images satellitaires.....	124
c.	Retour critique sur les données : une question de fiabilité.....	126
II.	Traitement des données et création des outils	127
A.	Création et présentation de la base de données (BDD).....	127
1.	Mise en forme des données.....	128
a.	Acquisition des données.....	128
b.	Standardisation sous Excel	129
c.	Importation des données dans Access®	129
2.	Organisation des données dans la BDD.....	131
a.	Le système relationnel.....	131
b.	Des requêtes pour optimiser la recherche de données	132
c.	La représentation graphique des données	133
3.	BDD sédimentaire	134
a.	L’évolution des volumes sédimentaires dans les réservoirs	134
b.	Les profils transversaux du fond des réservoirs	136
B.	Utilisation des images satellitaires pour une étude diachronique de l’occupation des sols	137
1.	La composition colorée	137
2.	Une étude diachronique de l’évolution des sols et du couvert forestier	140
3.	Exemple pour le bassin amont du fleuve Solo	141
C.	Création et présentation du système d’information géographique (SIG).....	142
1.	Traitement des données : une amélioration des outils existants	142
a.	Vérification et correction des données recueillies	142
b.	La qualité des données recueillies.....	143

2.	Application des données : l'édition de nouvelles cartes thématiques.....	144
a.	Un outil d'appui au travail de terrain	144
b.	La création de carte par croisement d'informations : Le cas du bassin de la Konto à Java-Est. 146	
III.	Une approche naturaliste	149
A.	Un suivi de la morphologie des cours d'eau	149
B.	Une étude de la condition des versants.....	150
IV.	Rencontres et entretiens avec les acteurs	151
Chapitre 4 : Analyse de l'évolution de la sédimentation dans les lacs de barrage		155
I.	La sédimentation des réservoirs de barrage – bilan pluri-décennal	155
A.	Des taux de sédimentation variables	157
1.	Analyse du volume perdu dans les réservoirs.....	157
2.	Une relation forte avec la taille des réservoirs	157
B.	La perte moyenne annuelle de la capacité des réservoirs	159
1.	Analyse de la capacité perdue dans les réservoirs	159
2.	Une relation mettant en évidence d'autres enjeux	160
C.	Capacité brute restante des réservoirs.....	161
1.	Capacité restante supérieure à 50%	161
2.	Capacité inférieure à 50%	162
II.	Rythmes de sédimentation à l'échelle pluri-annuelle.....	162
A.	Étude des rythmes de sédimentation	162
1.	Baisses légères et régulières	164
2.	Les fortes baisses.....	169
B.	Analyse des rythmes de sédimentation	172
1.	Le réservoir de Mrica à Java-Centre	172
2.	Le barrage de Jatiluhur à Java-Ouest	173
3.	Le réservoir de Selorejo à Java-Est	173
4.	Le barrage de Wlingi à Java-Est	174
5.	Le barrage de Sutami à Java-Est	174
C.	Analogies et divergences de la sédimentation des réservoirs javanais	175
Chapitre 5 : Les facteurs d'évolution de la sédimentation		181
I.	Les facteurs naturels.....	181
A.	Les précipitations, un agent érosif puissant sur les terres volcaniques de Java	181
1.	Des précipitations élevées	182
a.	Un gradient pluviométrique ouest/est.....	182
b.	Une pluviométrie variable à l'échelle des bassins.....	183
2.	Les anomalies climatiques.....	185
a.	Les épisodes El Niño qui embrasent Java	187
b.	La Niña une perturbation favorisant glissements de terrain et crues	188
B.	Une forte érosion des sols	190
1.	Les empreintes de l'érosion sur les versants.....	190
2.	Des taux d'érosion sur les versants très élevés.....	193
3.	Des éléments qui restent à quantifier	194
C.	Le transport des sédiments fluviatiles	198
1.	Analyse pluri-décennale	199
2.	Analyse à l'échelle de la crue, le cas de la Konto	204
3.	Une accélération des flux liquides, facteur d'une augmentation de la concentration solide	206
4.	Le rôle érosif des fleuves javanais	207

II. Les facteurs anthropiques.....	210
A. Un défrichement rapide et non maîtrisé des hautes terres.....	210
1. L'état des surfaces boisées avant la <i>Reformasi</i>	210
a. L'époque coloniale.....	210
b. De l'indépendance à la <i>Reformasi</i>	213
2. <i>Reformasi</i>	217
B. Les activités humaines impactant la sédimentation des réservoirs.....	220
1. La gestion des déchets et leur traitement.....	220
a. Les déchets plastiques, un fléau pour les rivières.....	220
b. L'eutrophisation causée par la pollution.....	221
2. Les lacs surexploités.....	223
Chapitre 6 : La gestion des grands bassins hydrologiques javanais en question.....	231
I. De nombreux acteurs impliqués.....	231
A. Les organismes internationaux.....	231
1. Banque asiatique de développement - <i>Asian Development Bank</i> (ADB).....	231
2. Agence japonaise de coopération internationale - <i>Japanese International Cooperation Agency</i> (JICA).....	233
3. Banque mondiale - <i>World Bank</i>	234
B. Les organismes gouvernementaux.....	235
1. Ministère des travaux publics - <i>Departemen Pekerjaan Umum (PU)</i>	235
2. Ministère du plan - Agence nationale de planification et de développement - <i>Badan Perencanaan dan Pembangunan Nasional - (BAPPENAS)</i>	236
3. Ministère des forêts - <i>Departemen Kehutanan</i>	236
4. Ministère de l'agriculture - <i>Departemen Pertanian</i>	236
C. Les entreprises publiques.....	237
1. <i>Perum Jasa Tirta - (PJT)</i>	237
2. <i>Perusahaan Listrik Negara - (PLN)</i>	237
3. <i>Indonesia Power</i>	237
D. Les centres de recherche.....	238
1. <i>Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) - Jakarta</i>	238
2. <i>Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional (BAKOSURTANAL) - Cibinong</i>	238
3. <i>Volcanological Survey of Indonesia (VSI) - Bandung</i>	238
II. L'organisation nationale du territoire, source de nombreuses problématiques.....	239
A. La gestion de la ressource en eau en Indonésie.....	239
1. Un découpage stratégique.....	239
2. La multiplicité des acteurs dans la gestion des ressources en eau.....	241
B. La gestion des bassins javanais face à la décentralisation.....	244
1. Les problèmes de la décentralisation sur la gestion du territoire.....	244
2. L'impact de l' <i>Otda</i> sur les surfaces boisées.....	245
III. La mise en eau des réservoirs à la source d'une perturbation des zones amonts.....	247
A. L'étude du déplacement forcé des populations.....	247
1. Des zones densément peuplées par des habitants attachés à leurs terres.....	248
2. Un appauvrissement des populations déplacées.....	248
3. Des mesures positives aux évolutions problématiques.....	249
B. L'impact du déplacement des populations sur les taux de sédimentation.....	250
1. La réinsertion des populations déplacées dans des zones fortement peuplées.....	250
Conclusion.....	252

<i>Références bibliographiques</i>	257
<i>Table des figures</i>	272
<i>Table des tableaux</i>	276
<i>Liste des sigles</i>	277
<i>Annexes</i>	279
<i>Table des matières</i>	294