



HAL
open science

Les barrages de l'Oubangui: de l'impact hydraulique actuel à la prospective environnementale

Chanel Nzango

► **To cite this version:**

Chanel Nzango. Les barrages de l'Oubangui: de l'impact hydraulique actuel à la prospective environnementale. Géographie. Université d'Orléans, 2018. Français. NNT: . tel-01994173

HAL Id: tel-01994173

<https://hal.science/tel-01994173>

Submitted on 25 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ
LABORATOIRE CEDETE EA-1210

THÈSE présentée par :
CHANEL NZANGO

soutenue le : **26 novembre 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Géographie-Aménagement-Environnement

Les barrages de l'Oubangui:
de l'impact hydraulique actuel à la prospective environnementale

THÈSE dirigée par :
Laurent TOUCHART
Pascal BARTOUT

Professeur, Université d'Orléans
Maître de conférences (HDR), Université d'Orléans

RAPPORTEURS :
Géraud MAGRIN
Véronique MALEVAL

Professeur, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Maître de Conférences (HDR), Université de Limoges

JURY
Laurent TOUCHART
Pascal BARTOUT
Géraud MAGRIN
Véronique MALEVAL
David BLANCHON

Professeur, Université d'Orléans (Directeur)
Maître de Conférences (HDR), Université d'Orléans (Directeur)
Professeur, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne (Rapporteur)
Maître de Conférences (HDR), Université de Limoges (Rapporteure)
Professeur, Université de Paris 10 Nanterre (Examinateur)

Avant-Propos

*Cette thèse est réalisée au laboratoire **CEDETE** (Centre d'Etudes pour le Développement des Territoires et l'Environnement) avec le concours de l'Université d'Orléans et le soutien financier du gouvernement Centrafricain via **l'ENERCA** (Energie Centrafricaine).*

La thèse porte sur « les barrages de l'Oubangui : de leurs impacts hydrauliques actuels à leurs prospectives environnementales ». Elle fait suite à un Mémoire de Recherche réalisé au laboratoire CEDETE en 2014 intitulé : « l'influence de la variabilité du régime hydrologique sur la morphodynamique de l'Oubangui ». Le sujet de cette thèse a plus ou moins évolué au cours de nos quatre années de recherches en raison des difficultés rencontrées sur le terrain. Le sujet initial s'intitulait : « Impacts environnementaux des barrages-réservoirs sur l'hydrosystème des têtes du bassin du Congo : études de cas du projet de transfert d'eau de l'Oubangui vers le lac Tchad ». Les difficultés récurrentes rencontrées concernent l'inaccessibilité de nos zones d'études en raison des instabilités politico-sociales en Centrafrique et au Tchad (Boko-Haram), et l'indisponibilité des données hydrologiques à cause de l'arrêt de mesures sur les stations d'observations hydrométéorologiques. Cette légère modification de l'énoncé n'a pas du tout détourné le fil conducteur de cette étude, mais cela a permis de concentrer nos travaux de recherches uniquement sur le bassin de l'Oubangui.

La réalisation de cette étude doctorale ressemble typiquement à la trajectoire d'une rivière « sauvage » qui n'est rarement « rectiligne », mais relativement sinueuse, car celle-ci est toujours constituée d'embâcles, de rochers, de forêt, que la rivière doit frayer pour atteindre son embouchure. Sans l'apport des Hommes, je ne saurais contourner tous les obstacles rencontrés durant la réalisation de ce travail. C'est ainsi que, je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur contribution.

*Tout d'abord, je tiens à remercier mes deux Directeurs de thèse : **Laurent Touchart** et **Pascal Bartout** qui m'ont donné ce privilège et qui ont été présents tout au long de ce travail. Leurs critiques, leurs appréciations, leurs exigences et leurs enthousiasmes associés sont d'une grande contribution à la réussite de ce doctorat.*

*Je remercie tous les membres du laboratoire **CEDETE** et du **CES** de Châteauroux pour leurs contributions. Je remercie également la société **ENERCA** qui m'a accueillie dans sa structure, et qui m'a offert les possibilités de recherches sur tous les barrages du territoire Oubanguien.*

*Je remercie le Dr Nguimalet ainsi que tous les autres membres du laboratoire **LACCEG** de l'Université de Bangui pour leurs collaborations scientifiques. Je remercie également les Sociétés **GIE-SCEVN** et **SOCATRAF** pour leur contribution à l'obtention des données sur la navigation fluviale entre l'Oubangui et le Congo. Un grand merci aux laboratoires **LNBTP** et **LHL** pour leurs services proposés dans le cadre des analyses sédimentologiques et physico-chimiques. Un grand remerciement aux personnels de l'Ambassade de Centrafrique à Paris, et à l'Archevêque Ndayen pour ses précieux conseils.*

*Ce serait une catastrophe écologique majeure d'oublier ma famille. Mes vifs remerciements vont à ma mère Lembet Nestorine, à Nassif Jean-Jacques, à Mamadou Paul, au couple Ballet, couple Mandart, couple Dupré, couple Cabirolt, couple Mouffron, couple Mboumba, couple Yologaza, à la famille Nzango, Agou, Lembet, Mamadou, Bisseffi, etc. Une attention particulière est accordée à **Zagore** et à **Luki**.*

RESUME

Le bassin de l'Oubangui est l'un des bassins fluviaux les moins aménagés du globe malgré ses potentialités hydrauliques remarquables. Seulement deux aménagements hydrauliques majeurs sont répertoriés sur cet immense bassin, il s'agit du barrage de *Mobaye* sur la rivière *Oubangui* et du complexe hydraulique de *Boali* sur la rivière *Mbali*. Ce n'est que très récemment qu'un mégaprojet d'aménagement hydraulique a été proposé en vue de mettre en valeur les ressources en eau de l'Oubangui, il s'agit du projet PTEIB (*Projet de Transfert d'Eau Interbassin*) qui consiste à ériger deux gigantesques barrages-réservoirs sur le bassin de l'Oubangui afin de transférer de l'eau vers le *lac Tchad* qui serait en phase de « récession » hydrologique. Nombreux sont les travaux scientifiques qui démontrent que l'établissement des barrages sur un cours d'eau ne s'effectue rarement sans dommages environnementaux. À ce titre, les dommages principaux sont d'ordres écologiques et sociétaux. Cependant, on ignore encore les impacts potentiels de cette mégastructure hydraulique sur notre bassin d'étude, car la dimension environnementale n'a pas vraiment été prise en compte dans les « études de faisabilités techniques » dudit projet. De même, on ignore encore les impacts potentiels des barrages fonctionnels (*barrages de Mobaye et de Boali*) sur le bassin de l'Oubangui. Ainsi, cette thèse aborde de manière inédite les barrages de l'Oubangui à travers leurs impacts négatifs sur la continuité hydrosédimentaire et écologique. La thèse aborde aussi bien les barrages fonctionnels que les barrages planifiés.

Des analyses hydrostatistiques, sédimentologiques et géomatiques, couplées aux investigations de terrains, ont permis d'évaluer les effets hydro-écologiques des barrages fonctionnels sur l'Oubangui. Par ailleurs, une « extrapolation hydrologique » a été conduite en vue de prospecter les effets potentiels prévisibles des barrages projetés sur l'hydrosystème de l'Oubangui. Excepté le barrage « au fil de l'eau » à *Mobaye*, nos résultats soulignent l'influence significative de l'ensemble de ces ouvrages hydrauliques sur le « régime hydro-sédimentaire » de l'Oubangui.

Mots-clés : Oubangui, demi-barrage, barrage-réservoir, continuum hydrosédimentaire, régime hydrologique, ajustement fluviaux.

ABSTRACT

The *Ubangui* basin is one of the least developed river basins in the world despite its remarkable hydraulic potential. Only two major hydraulic developments are listed on this immense basin, it is the dam of *Mobaye* on the *Ubangui River* and the hydraulic complex of *Boali* on the *Mbali river*. Very recently, a megaproject for water management has been proposed to develop Ubangui's water resources; it is the IBWT project (Inter-Bassin Water Transfer Project) which consists in erecting two gigantic dams-reservoirs on the Ubangui basin in order to transfer water to Lake Chad, which would be in a phase of hydrological recession. Numerous scientific studies have shown that the establishment of dams on a river rarely occurs without environmental damage. As such, the main damages are ecological and societal. However, we still do not know the potential impacts of this hydraulic megastructure on our study area, because the environmental dimension has not really been taken into account in the "technical feasibility studies" of the project. Similarly, the potential impacts of functional dams (*Mobaye and Boali dams*) on the Ubangui basin are still unknown. Thus, this thesis deals in an unprecedented way with the dams of Oubangui through their negative impacts on the hydrosedimentary and ecological continuity. The thesis addresses both functional dams and planned dams.

Hydrostatistical, sedimentological and geomatic analyzes, coupled with field investigations, made it possible to evaluate the hydro-ecological effects of the functional dams on Ubangui. In addition, a "hydrological extrapolation" was carried out in order to explore the predictable effects of the projected dams on the Ubangui hydrosystem. Except for the "over water" dam at *Mobaye*, our results underline the significant effects of all these hydraulic structures on the Ubangi "hydro-sedimentary regime".

Key-words: Ubangui, half dam, reservoir-dam, hydrosedimentary continuum, hydrological regime, river adjustment.

SOMMAIRE

« *Les barrages de l'Oubangui : de leur impact hydraulique actuel à la prospective environnementale* »

Avant-Propos.....	2
Résumé.....	4
Sommaire.....	6
Introduction.....	7

Partie 1 – Cadres Thématiques et Physiques de l'étude

Chapitre 1 – Cadre thématique de l'étude.....	26
Chapitre 2 – Cadre physique du bassin de l'Oubangui.....	61
Chapitre 3 – Les enjeux environnementaux contemporains sur l'Oubangui.....	90

Partie 2 – Etudes d'impact hydraulique des barrages sur le bassin de l'Oubangui

Chapitre 1 – Etudes de cas du demi-barrage de Mobaye.....	115
Chapitre 2 – Etudes de cas du barrage-réservoir de Boali.....	138

Partie 3 – Prospective environnementale des barrages planifiés sur l'Oubangui

Chapitre 1 – Le projet de dérivation de l'Oubangui vers le lac Tchad.....	162
Chapitre 2 – Etudes d'impacts prévisibles du barrage de Palambo sur l'Oubangui....	179
Chapitre 3 – Perspectives d'aménagements et de gestions durables des barrages de l'Oubangui.....	197

Conclusion générale.....211

Références bibliographiques.....	220
Liste des acronymes.....	248
Table des matières.....	271

INTRODUCTION

Pour vous faciliter la lecture:

- ✓ *Des coordonnées géographiques ont été ajoutées à côté de chaque site d'étude pour mieux vous repérer spatialement.*
- ✓ *Les graphiques et les photographies non sourcés ont été réalisés et prises par l'auteur.*
- ✓ *La table des matières et des illustrations figurent à la fin du manuscrit.*
- ✓ *Vu le caractère original de chaque terrain (sous forme d'un demi-barrage par exemple), il était préférable de ne pas imposer artificiellement une méthodologie générale unique. C'est ainsi que chaque chapitre fera l'objet d'une démarche méthodologique spécifique.*

Les enjeux des aménagements hydrauliques en rivière

De toutes les substances chimiques sur terre, l'eau est un fluide essentiel à la vie terrestre et au développement socioéconomique. Elle était au centre de nombreuses civilisations et, est de nos jours le support de nombreuses activités humaines. Elle fait partie du quotidien de tout un chacun pour ses besoins domestiques et, pour beaucoup, c'est un élément clé du cadre de vie. Lavoisier (1743-1794), le père de la chimie moderne montrait que l'eau n'était que « H_2O », c'est-à-dire, une molécule constituée essentiellement de deux atomes d'Hydrogène et d'un atome d'Oxygène. L'eau douce présente sur terre se trouve en grande partie dans les calottes glaciaires et seulement une infime fraction est cependant répartie entre les plans d'eau et les cours d'eau [WCD, 2000 ; Martins, 2008]. Son inégale répartition sur terre influence la distribution humaine. Les hommes ont tendance à s'installer de préférences à proximité des *lacs et rivières* afin d'exploiter au maximum leurs ressources en eau de manières multiformes (irrigation, approvisionnement en eau potable, extraction des granulats, pêche, navigation, hydroélectricité etc.). Dès l'antiquité, les hommes se sont déjà installés près des grands fleuves à l'image du *Nil*, du *Tigre*, ou de *l'Euphrate* pour bâtir les premières civilisations au monde. C'est ainsi qu'on a retrouvé en amont du *Caire*, les traces des premiers **barrages** construits sur le Nil [Collier & al, 1996 ; Rollet, 2007]. Les **Egyptiens** se servaient déjà de ces ouvrages pour écrêter les crues du *Nil* et pour irriguer des terres agricoles dans le désert. Selon le dernier rapport de l'ICOLD en 2011, on compte près de 60 000 **grands barrages** répertoriés dans le monde, et la majorité d'entre eux sont construits au 20^{ème} siècle suite à une forte demande en eau et énergie de l'après-guerre mondiale. Ces ouvrages ont commencé vraiment à émerger dans le monde à partir du 18^{ème} siècle grâce à l'avènement de l'énergie hydroélectrique en Europe, comme un « *symbole de développement économique, de progrès technologique et de modernisation* » [Martins, 2008]. C'est cette énergie qui a permis que la révolution industrielle du 19^{ème} siècle ait lieu : mines, forges, filatures, papeteries, ont pris leur essor avec les roues, puis avec les turbines hydrauliques, bien avant d'utiliser le charbon [Ginocchio & Violet, 2012]. Depuis lors, les barrages sont considérés comme l'une des composantes principales de la civilisation industrielle. Aucun secteur du génie n'a contribué plus au développement de la civilisation que l'art et la science du contrôle des cours d'eau [Baxter & al., 1980]. En revanche, la construction de grands barrages en rivières nécessite de disposer de moyens financiers considérables. Cela explique le faible taux d'électrification de certains bassins tropicaux malgré leurs potentialités hydrauliques remarquables. Mais si

certains voient les barrages comme des figures du progrès, ils sont pour d'autres des monuments à l'injustice sociale et au développement destructeur [Fischer, 2001]. Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, les barrages sont perçus comme des objets de destructions et sont donc dénigrés [While, 1977 ; Petts & Gurnell, 2005]. Leur construction en rivière s'est en effet ralentie depuis 1980 à cause du durcissement de la réglementation, qui impose dans le renouvellement des concessions aux exploitants des usines hydroélectriques de prendre en compte les impacts des barrages sur les écosystèmes [Barraud & Germaine, 2017]. Ainsi, bon nombre de projets d'aménagements hydrauliques ont été rejetés ou abandonnés.

En Europe, l'une des exigences de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) est de redonner à certains cours d'eau altérés leur « *état non anthropisé* ». Le retour à cet état supposé proche du naturel se fait par des opérations de « *restauration hydromorphologique et physico-chimiques* » afin d'atteindre le « *bon état écologique* » des cours d'eau (fig. 1). Ces opérations offrent l'avantage de redonner un fonctionnement écologique « *naturel* » aux lits fluviaux par le retour des faciès d'écoulement lotiques (*Radiers-Mouilles-Bancs*), et le rétablissement d'un transport sédimentaire non perturbé. La Directive Européenne est transposée dans le droit Français en 2006 par la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) qui conduit à l'effacement des ouvrages hydrauliques constituant des obstacles à la continuité écologique des rivières. Par ailleurs, les Etats-Unis sont considérés comme le foyer d'émergence du mouvement de démantèlement des barrages [Barraud, 2011 ; Drapier & al, 2017]. Le mouvement « *dam removal* » est apparu en Outre-Atlantique dès 1970, et est devenu un outil majeur pour le rétablissement du bon état écologique des rivières [Drapier & al, 2017].

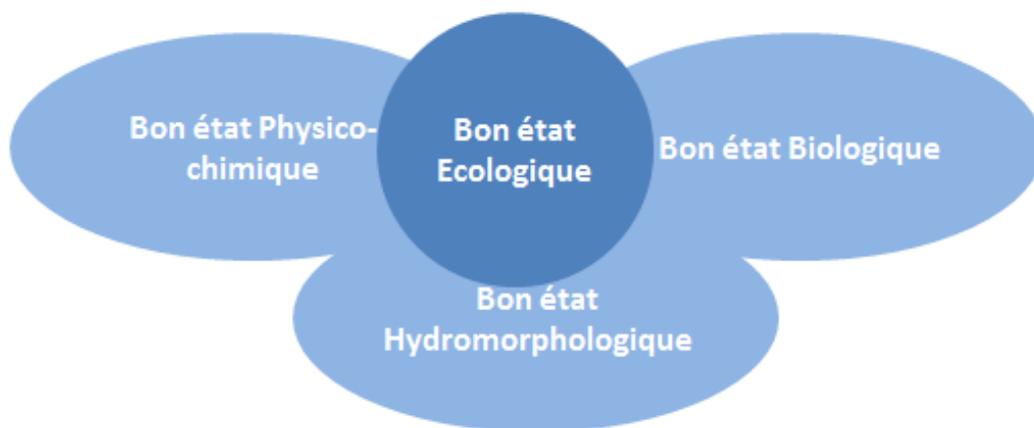


Fig. 1 – Bon état écologique des cours d'eau. (Source : Agence de l'eau Artois Picardie)
Fig. 1 – Top ecological status of rivers. (Source: Water Agency of Artois Picardie)

Supprimer les ouvrages hydrauliques qui n'ont plus d'usages avérés est donc devenu depuis quelques années une option phare à considérer pour la restauration écologique des tronçons fluviaux court-circuités. A ce titre, les opérations de suppression concernent globalement les petits ouvrages hydrauliques, notamment les « *seuils en rivière* ». Contrairement aux « *grands barrages* », les seuils sont faciles à démanteler alors que leurs effets en rivière sont très peu étudiés et peu connus. La restauration hydromorphologique des cours d'eau est une activité récente dont les impacts socio-environnementaux sont encore mal appréhendés et peu documentés. Les projets de démantèlement se concentrent dans le monde occidental et sont le plus souvent analysés à travers le seul prisme des enjeux écologiques [Bernhardt & al., 2005 ; Darby & Sear, 2008 ; Barraud & Germaine, 2017]. Les retours d'expériences sur le démantèlement des premiers ouvrages hydrauliques font cependant défaut. Quelques dommages environnementaux ont été enregistrés sur le *Darby Creek* (USA) après le désaménagement du barrage de *Borough Dam* [Lespez & al, 2016], ou sur *l'Yonne* (France) après l'arasement du barrage de *Pierre Glissotte* [Gilet & al, 2018]. Les principaux risques écologiques liés au démantèlement des petits barrages en rivière sont le risque de suralluvionnement en aval lié à la reprise de l'érosion linéaire et latérale, le risque d'inondation en aval lié à la réactivation de la dynamique fluviale, et le risque de perturbation de l'équilibre écologique mis en place par le nouveau niveau de base du plan d'eau [Malavoi, 2010]. Du fait de la complexité de ces processus, les gestionnaires doivent mieux connaître leurs cours d'eau afin de mieux anticiper les risques liés aux opérations de restaurations.

La problématique des aménagements hydrauliques en domaine tropical : cas du bassin du Congo

De part et d'autre de l'équateur et jusqu'aux parallèles 23° 27 Nord et Sud (tropiques du Cancer et du Capricorne) se localise le domaine tropical qui présente des caractéristiques climatiques bien spécifiques [Mathieu, 2009]. Gaussen & Legris (1963) ont déjà remarqué que le mot *tropical* n'est pas employé par tous les auteurs de la même façon. De manière simplifiée, le domaine tropical est caractéristique d'un milieu à la fois chaud et humide durant toute l'année. Le domaine tropical humide est la zone située proche de l'équateur où il existe une abondance hydrique grâce à leur pluviosité qui s'étale sur la majeure partie de l'année. Ce dernier concentre en effet les plus grands bassins fluviaux au monde tels que *l'Amazone*, le

Congo, l'Orénoque, le Brahmapoutre, le Mékong et le Paraná... [Martins, 2008]. Ces bassins sont d'une grande importance socio-économique pour leurs riverains en matière de navigation fluviale, d'aménagements hydrauliques, et d'approvisionnement en eau et en aliments. Les peuples indigènes abritant ces immenses bassins sont généralement des *peuples de l'eau* (ex : les *Missing*, les *Bajau*, les *Huitoto*, les *Ngbandi*, les *Kayapós*, les *Bantu...*), et des *peuples de la forêt* (ex : les *Guarani*, les *Yanomami*, les *Pygmées Baka et Aka*,). Bien que repartit sur différents continents, ces peuples ont en commun un fond socio-religieux (animiste) reposant sur des cultes anciens et des célébrations. Leur système économique repose ni sur « *l'économie du marché* », ni sur la recherche de profit et d'intérêt, mais repose plutôt sur « *l'économie de subsistance* » qui est très dépendante des conditions climatiques.

Ce qui précède indique que le bassin du Congo à l'instar des bassins fluviaux tropicaux, est un bassin immensément riche grâce à sa situation à cheval de l'équateur. D'une aire totale de $3,7 \cdot 10^6$ de km^2 , il est considéré comme le second poumon de la planète après le bassin Amazonien ($\sim 7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$). D'une importance quasi-planétaire, le bassin du Congo est une réserve mondiale en biodiversité et en ressources hydriques. Sa forêt primaire occupe plus de la moitié de sa surface, alors que sa densité humaine est très faible. Au sens strict, le bassin du Congo compte environ 30 millions d'habitants [Megevand al., 2013] dont la majorité vit encore de l'agriculture traditionnelle (UNESCO, 2010). Ce bassin regorge presque le tiers du potentiel hydroélectrique du continent Africain (AIE, 2009). Celui-ci est estimé à plus de 100 000 MW (CICOS, 2009). Comparativement aux autres bassins tropicaux (ex : Mékong, Paraná...) qui ont subi un grand nombre de transformations, le bassin du Congo est faiblement fragmenté par les barrages [Martins, 2008] bien qu'il comprenne l'un des plus puissants fleuves au monde, le fleuve Congo, dont le module annuel s'élève à près de $41\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ [Callède & al, 2010 ; Laraque & al., 2013]. Son taux d'électrification est inférieur à 20% (CICOS, 2009), soit l'un des plus faibles au monde. On notera que jusqu'au 19^{ème} siècle, ce bassin était encore considéré comme le dernier territoire quasi « *terra incognita* » du globe, les cours d'eau qui le drainent étaient encore qualifiés de « *rivières sauvages* » et ont servi à cette époque d'itinéraires d'exploration (¹Réf. *Livingstone & Stanley*).

¹Dr Livingstone fut un précurseur de l'exploration de l'Afrique centrale au 19^{ème} siècle. Il a découvert les chutes spectaculaires de Zambèze et l'a baptisé « chute Victoria » en hommage à la reine Victoria. Ce missionnaire Britannique a exploré une partie du bassin du Congo et voulait également découvrir les sources mythiques du Nil en partant du Lac Tanganyika. Ne disposant pas de moyens suffisants pour dompter la nature tropicale (forêts, chutes d'eau, maladies...), cette dernière mission n'était pas une réussite. Livingstone fut finalement retrouvé par le reporter Stanley alors qu'en occident on le croyait déjà mort.

Trois hypothèses ont été avancées pour expliquer le retard dans l'exploration du bassin du Congo. Certains pensent que ce retard était d'ordre institutionnel (préservation des richesses). D'autres pensent que les explorateurs n'avaient pas de moyens suffisants pour dompter ce territoire. Ou encore, d'autres affirment que les peuples indigènes du bassin étaient hostiles et peu collaboratifs aux explorateurs.

C'est à partir du 20^{ème} siècle que le bassin Congolais a commencé à être réellement aménagé. Les travaux d'aménagement visaient d'abord à améliorer les conditions de la navigation intérieure, et à produire surtout de l'énergie hydroélectrique par le biais des centrales hydrauliques. Toutefois, cet immense bassin ne compte qu'une vingtaine d'ouvrages hydrauliques malgré bien qu'il dispose d'un réseau hydrographique très dense. Les principaux cours d'eau du bassin ayant subi ces aménagements sont : *le Kouilou* (barrage de Moukoulou en 1974), *l'Oubangui* (barrage de Mobaye en 1989), *le Lualaba* (barrage de N'zilo en 1953), *la Mbali* (barrage de Boali en 1991), *la Nzoro* (barrage de Kibali en 2011) et *le fleuve Congo* (ex: barrages d'Inga 1 en 1972, Inga 2 en 1977). La quasi-totalité de ces barrages sont destinés à produire de l'énergie hydroélectrique et non à irriguer des terres agricoles.

De nombreux projets d'aménagements hydrauliques ont été élaborés au cours des dernières décennies visant à valoriser les ressources en eau, et de satisfaire les besoins en énergie du bassin du Congo. De tels projets nécessitent de lourds investissements financiers afin de minimiser leurs impacts socio-environnementaux. Les plus pharaoniques d'entre eux sont : **le projet Grand Inga** sur le fleuve *Congo*, et **le projet PTEIB** (*Projet de Transfert d'Eau InterBassin*) sur la rivière *Oubangui* à **Palambo** (fig. 2).

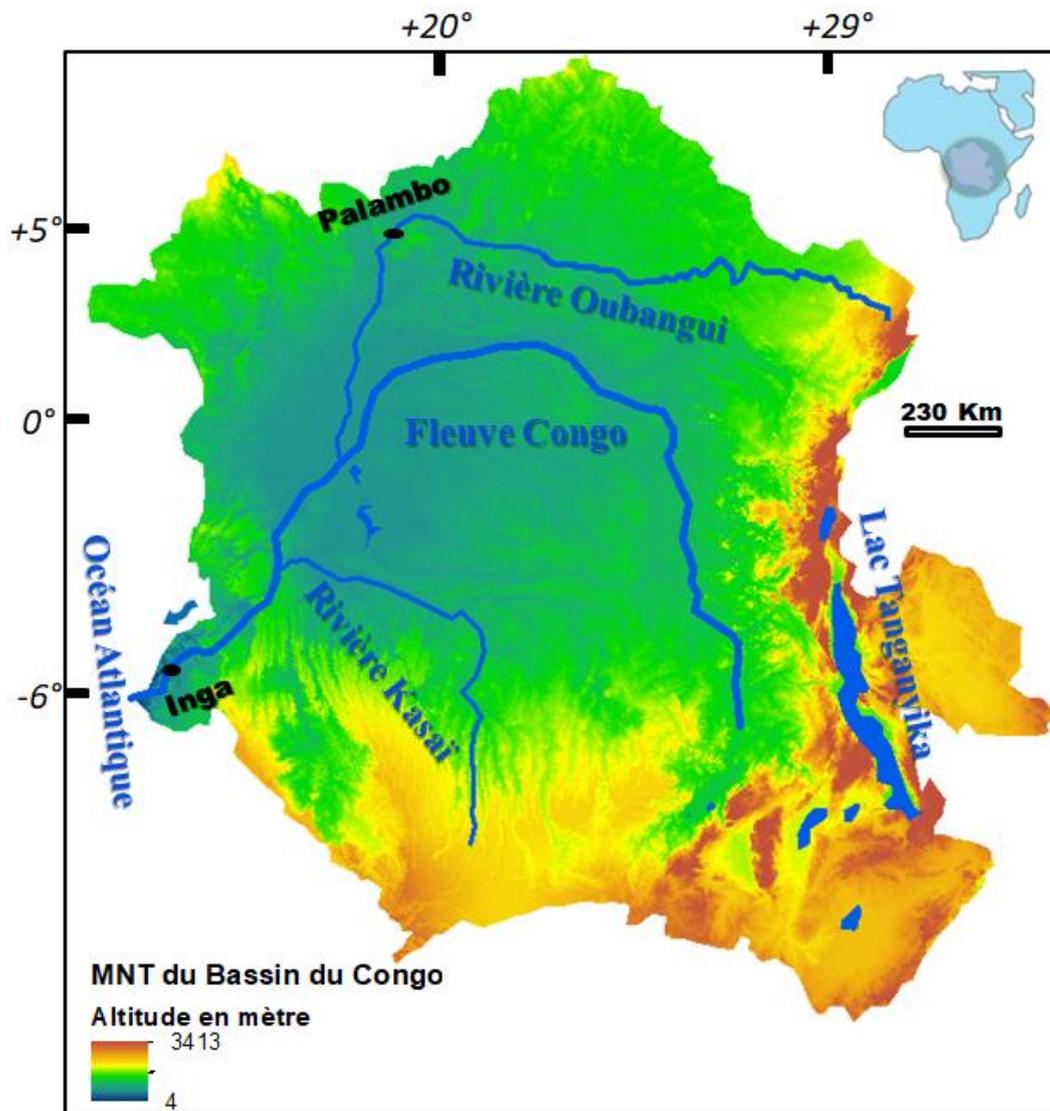


Fig. 2 – Le bassin du Congo et ses principaux cours d'eau
Fig. 2 – The Congo Basin and its main rivers

Le projet **Grand Inga** est en effet un méga barrage hydroélectrique projeté sur la plus importante « chute » du fleuve Congo dans sa partie inférieure en République Démocratique du Congo (*fig. 3*). En 1885, le géographe Wauters faisait déjà remarquer que les chutes d’Inga qui étaient considérées comme des obstacles à la navigation, deviendraient peut-être un jour une force capable de distribuer la lumière et la force motrice dans les provinces riveraines du Congo. L’achèvement du méga-barrage d’Inga est prévu en 2025 et permettra d’installer une puissance énergétique supérieure à 40 000 MW [Rousselot, 2012], presque le double de la puissance produite actuelle du plus grand barrage hydroélectrique au monde, *le barrage des trois gorges* (22 400 MW). D’un coût d’aménagement estimé à plus de 22 milliards de dollars,

le *Grand Inga* est un projet d'envergure continentale. A termes, la mégastructure pourrait soutenir les besoins en énergie de toute l'Afrique subsaharienne. Des réseaux de connections sont aussi prévus pour alimenter l'Afrique du Nord (l'Egypte) et l'Afrique Australe (*fig. 3*). Le projet a été salué par la communauté internationale (BAD, BEI, AFD, ONU, G₂₀) comme un projet phare pour l'électrification de l'Afrique [Rousselot, 2012], ce continent dont le taux d'électrification est limité à 42% (CICOS). Selon le rapport de l'AIE de 2010, l'Afrique connaîtra un taux de croissance moyenne annuelle de 3,5% entre 2008 et 2035 (AIE, 2010), tandis que sa demande moyenne en énergie croît de 8% par an. Fournir l'accès à l'énergie aux ménages des zones urbaines et rurales restera un défi de plus en plus pressant. En dépit des bénéfices escomptés, le projet *Grand Inga* suscite toujours de nombreuses controverses environnementales.

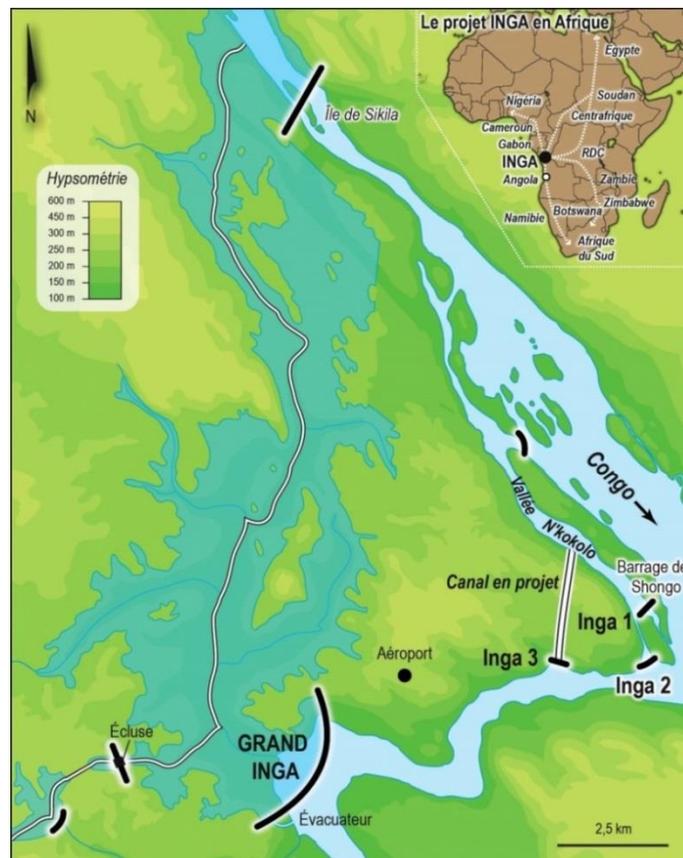


Fig. 3 – Le Grand Inga et les projets de connexion internationale. Source : Rousselot (2012).
Fig. 3 – Grand Inga and international connection projects. Rousselot, (2012).

Le projet **PTEIB** (*IBWT en anglais*) est également un gigantesque projet d'aménagement hydraulique consistant à dériver les eaux de l'*Oubangui* (sous-bassin du Congo) vers le lac Tchad via la rivière *Chari*, principal contributeur du lac. Le projet a été proposé en 2011 par

le bureau d'étude *CIMA+ International* sous la houlette de la *CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad)*, afin de gérer durablement les ressources en eau et de répondre graduellement à la pénurie d'eau sur le lac Tchad. En effet, le lac Tchad est cet immense plan d'eau d'Afrique qui offre de nombreuses opportunités de vies à des dizaines de millions de personnes vivant dans le *Sahel*, l'un des « hotspots » climatiques du globe. Jadis, considéré comme une « mer intérieure », la superficie du lac Tchad se serait réduite de manière spectaculaire. Lors de la dernière conférence de l'UNESCO sur le lac Tchad qui s'est tenue en février 2018 à *Abuja* au *Nigeria*, l'UA (Union Africaine) a approuvé le projet PTEIB comme étant un projet *panafricain* visant à restaurer le lac Tchad pour un développement, une sécurité et une paix durables dans la région. Le projet PTEIB n'est que la version revisitée du vieux projet « *TRANSAQUA* » dont l'idée avait germé durant les sécheresses des années 1970-1980 [Magrin, 2018]. La version actuelle proposée par *CIMA+* consiste à réaliser un *transfert combiné « pompage-gravité »* sur le bassin de l'Oubangui depuis les sites de *Palambo* ($18^{\circ} 57' 4'' E, 4^{\circ} 42' 24'' N$) et *Bria* ($22^{\circ} 5' 9'' E, 6^{\circ} 39' 31'' N$) (fig. 4).

D'autres avantages escomptés du projet PTEIB concernent la production de l'hydroélectricité pour alimenter la ville de *Bangui* et ses environs, la régulation de la navigation fluviale sur l'axe Oubangui-Congo, et la lutte contre la « Saharanisation » du bassin du Congo. *CIMA+* rapporte en effet que, ce projet est techniquement faisable, mais sa réalisation nécessite d'énormes coûts financiers et quelques dommages environnementaux. *Cependant, on ignore toujours les impacts environnementaux prévisibles dudit projet sur le bassin du lac Tchad et sur celui de l'Oubangui, car les études de faisabilités réalisées par CIMA+ n'ont porté que sur les faisabilités techniques et économiques du projet. On sait aussi très peu de choses sur la disponibilité actuelle en eau de l'Oubangui à revitaliser l'écosystème aquatique du lac Tchad, dans la mesure où certains travaux de recherches ont signifié que l'Oubangui est entré dans une phase sèche depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, et que cette sécheresse se traduit par une baisse notable d'écoulement de décennies en décennies. Que sait-on de la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui ? Qu'en est-il de l'écoulement de la rivière Chari, principale tributaire du lac Tchad ? Le lac Tchad s'assèche-t-il réellement ? Le recul du plan d'eau du lac Tchad ne dépend-il pas d'autres facteurs (érosion sur le bassin, fort transfert sédimentaire, fortes densités humaines, développement des activités consommatrices d'eau sur le bassin, etc.) que de la récession pluviométrique, voire hydrologique sur le Chari ? N'existe-t-il pas d'autres moyens durables de préserver l'écosystème du lac Tchad*

sans pour autant apporter l'eau de l'Oubangui ? Quelle est la perception de ce projet de transfert d'eau par les riverains du lac Tchad, et par ceux de l'Oubangui ? Quels sont les enjeux environnementaux actuels sur l'Oubangui ? Quels sont les enjeux géopolitiques dudit projet à l'échelle régionale et internationale ? Quelles leçons a-t-on tiré des aménagements hydrauliques existants qui puissent guider ces nouveaux aménagements ? Sur le plan socio-environnemental, quels seront les impacts potentiels du projet PTEIB à l'échelle locale (site d'aménagement), régionale (bassin de l'Oubangui) et interbassin ? Ce projet ne serait-il pas une source de conflits géopolitiques, ou au contraire, serait-il un levier de stabilité socio-économique régionale ? Voilà autant d'interrogations que cette thèse s'efforce d'apporter quelques réponses inédites.



Fig. 4 – Les deux options du transfert interbassin proposées par CIMA+. (Source: Lemoalle & Magrin, 2014).

Fig. 4 – The two interbasin transfer options proposed by CIMA +. (Lemoalle & Magrin, 2014).

Intérêts d'études d'impacts des barrages sur l'Oubangui

L'Oubangui est une rivière transfrontalière entre trois nations, à savoir la République du Congo Démocratique (RDC), la République Centrafricaine (RCA), et la République du Congo-Brazzaville. Long de plus de 2 200 Km, il est le principal tributaire septentrional du fleuve Congo. La rivière draine en effet un bassin versant quasi-forestier de 643 900 Km², soit le un-cinquième du bassin du Congo. Son bassin est très peu fragmenté par les barrages malgré ses potentialités hydroélectriques remarquables. Plus de 2 000 MW de potentiel hydroélectrique non exhaustif estimé, mais ceux-ci sont quasiment inexploitable. De ce fait, *l'énergie traditionnelle*, qui repose sur l'utilisation des combustibles ligneux, demeure la principale source d'énergie dans le bassin. Pour autant, la fraction d'énergie moderne utilisée sur le bassin est répartie entre *l'énergie thermique* et *l'énergie hydroélectrique*.

L'énergie thermique est l'énergie issue de la combustion des hydrocarbures dans les vingtaines de centrales thermiques en place. Le pétrole, en particulier, considéré comme une *énergie fossile*, est en effet le principal hydrocarbure utilisé dans ces centrales thermiques. Dans la partie Centrafricaine du bassin de l'Oubangui, le pétrole est totalement importé, et la production d'énergie thermique est à la merci des instabilités du cours mondial du pétrole. Toutefois, ce pays dispose d'un potentiel pétrolier en cours de clarification (PNUD, 2017).

Pour sa part, l'énergie hydroélectrique est produite par les centrales hydrauliques qui utilisent la force motrice de l'eau pour en transformer en courant électrique. A ce titre, deux aménagements hydroélectriques sont réalisés sur ce vaste bassin :

- ✓ Chronologiquement, le premier concerne le *complexe hydraulique de Boali* (18° 00' 05" E, 4° 55' 10" N). Il s'agit là d'une chaîne d'aménagements hydroélectriques qui court-circuite le linéaire de la rivière *Mbali*, un sous affluent de la rivière Oubangui. Long d'environ 30 Km, cette chaîne d'aménagement « au fil de l'eau » est répartie en 3 centrales hydrauliques. La première centrale date de 1954, la deuxième date de 1976, et la troisième, équipée d'un grand barrage-réservoir, date de 1991.
- ✓ Le second est réalisé sur la rivière Oubangui et se rapporte à l'aménagement hydroélectrique de *Mobaye* (21° 11' 0" E, 4° 18' 02" N). Edifié en 1989, l'ouvrage de Mobaye est un « *demi-barrage* », car il n'obstrue que partiellement la largeur du chenal de l'Oubangui dans ce secteur de « rapides ».

- ✓ Un troisième aménagement hydraulique a été signalé sur le haut-Oubangui dans la localité de *Kibali* ($29^{\circ} 29' 52'' E, 3^{\circ} 19' 59'' N$), l'une des régions les plus reculées de la République Démocratique du Congo. Il s'agit d'une Petite Centrale Hydraulique (PCH) installée en 2011 par la société RANGOLD sur la rivière *Nzoro* (*affluent de l'Oubangui*) en vue de produire de l'hydroélectricité pour soutenir leurs opérations d'extractions minières.

Si l'énergie thermique est considérée comme une énergie fossile et non renouvelable, cela n'est pas le cas de l'énergie hydroélectrique qui est toujours considérée comme une source d'énergie propre et renouvelable par excellence. Sa production n'entraîne pas d'émission de gaz à effet de serre (GES). Son avènement au 18^{ème} siècle a en effet motivé la construction de plusieurs barrages monumentaux dans le monde. Ces ouvrages étaient devenus des symboles de développement économique et social. Leur nombre n'a cessé d'augmenter pour atteindre leur apogée après la seconde Guerre Mondiale, période où, ils étaient considérés comme des « Cathédrales du 20^{ème} siècle » [Bazin & Gascon, 2015]. Depuis les années 1980, la construction des barrages s'est en effet ralentie [Barraud & Germaine, 2017], car ils étaient de plus en plus décriés dans les pays développés. Les barrages, surtout les grands, sont accusés de tous les maux du siècle : ils agressent la nature, déplacent les peuples autochtones, piègent les sédiments, perturbent le régime pluviométrique, provoquent des séismes et renforcent l'effet de serre (...) Pressées par les opinions publiques et les ONG, les institutions internationales refusent désormais de financer les grands barrages [Bazin & Gascon, 2015]. Ce nouveau paradigme, très d'actualité en Europe et en Amérique du Nord, donne lieu à l'abandon de nombreux projets d'aménagements hydrauliques, et à la suppression de plusieurs ouvrages transversaux. Mais dans le bassin du Congo, notamment sur l'Oubangui, la politique du rétablissement de la « continuité écologique » n'est pas une priorité, car le bassin est très moins aménagé et il n'existe quasiment pas des recueils d'expériences sur les effets environnementaux des barrages existants. La plupart des rivières du bassin sont encore à l'état « sauvage » ou presque, et leurs dynamiques fluviales sont encore mal cernées. En outre, les études d'impacts des aménagements hydrauliques sur l'Oubangui est un champ de recherches encore peu investi, et pourtant, cette rivière est l'une des premières à être étudiée en Afrique subsaharienne.

Les travaux antérieurs menés sur ce bassin ont permis dans un premier temps de comprendre la complexité de l'écoulement de l'Oubangui à l'endroit des seuils rocheux (ex : chutes et

rapides) qui entravaient la navigabilité des navires. Il convient de rappeler que la voie fluviale servait d'itinéraire principal pour l'exploration de l'Afrique centrale. Les travaux scientifiques remarquables de Bruel (1899), de Yaye (1951), de Tixier (1954) et de Boulvert (1985) font d'office pionniers sur cet aspect. Dans un second temps, les études antérieures réalisées ont pour but de décrire et de comprendre la dynamique hydrologique de l'Oubangui dans un contexte de changement climatique. A ce titre, nous citons les travaux remarquables d'Olivry (1988), de Censier (1995), de Feizouré & al. (1995), d'Orange (1996), de Pandi (2009), de Calleda & al. (2010), de Laraque & al. (2013), de Nguimalet & al. (2013). En revanche, peu d'attention a été réellement portée sur les effets des aménagements hydrauliques sur le bassin de l'Oubangui. On ignore à ce jour les effets écologiques ou environnementaux des barrages opérationnels sur l'Oubangui. Pourtant, il a été démontré ailleurs que la présence des ouvrages hydrauliques, surtout les grands barrages, réduisent la richesse écologique des tronçons fluviaux court-circuités. En atténuant les crues, les barrages modifient le régime hydrologique et diminuent la mobilité latérale d'un cours d'eau. Ils constituent des obstacles à la libre circulation des espèces aquatiques migratrices [...] Mais c'est surtout la dynamique sédimentaire que les barrages viennent perturber en entraînant un dépôt des sédiments dans les retenues [Royet, 2015]. *Mais, que sait-on de l'influence des barrages de Boali et de Mobaye sur le fonctionnement hydrologique et écologique de l'Oubangui ? Par extrapolation, quels seront les effets potentiels des barrages planifiés sur l'Oubangui ?*

L'une des raisons qui explique le peu d'investissement dans les recherches scientifiques sur l'Oubangui se trouve en effet dans l'instabilité politico-sociale récurrente en République Centrafricaine et en République Démocratique du Congo. Runge (2007) a ainsi souligné que, « *pour de multiples raisons dont le climat tropical chaud et humide, la mauvaise infrastructure et l'instabilité politico-économique, le bassin Oubanguien est réputé pour être l'une des zones les plus difficiles pour réaliser des études scientifiques de terrain* ». En outre, les barrages opérationnels recensés sur l'Oubangui se trouvent dans des endroits reculés et difficiles d'accès. Il n'existe pratiquement pas d'observations hydrométéorologiques sur ces sites d'aménagements. Sur l'ensemble des stations hydrométriques installées dès le 19^{ème} siècle sur le bassin de l'Oubangui, seule la station de Bangui (18° 35' 73" E, 4° 21' 51" N), installée en aval des « rapides » où gît l'hôtel Oubangui, est encore opérationnelle, enregistrant de manière continue le débit de l'Oubangui. Les soixantaines d'autres stations installées ne sont plus opérationnelles depuis l'arrêt des missions de l'IRD (Ex ORSTOM) en

Centrafrique au début des années 1990. En dépit des difficultés scientifiques rencontrées, cette thèse se propose donc d'étudier de manière inédite, les barrages de l'Oubangui à travers leurs impacts négatifs sur l'écoulement, notamment sur la **continuité hydrosédimentaire**. Cette continuité en rivière est le garant de la *diversité écologique* ou de la *mosaïque fluviale*. La thèse aborde aussi bien les barrages fonctionnels que les barrages planifiés. ***L'hypothèse principale avancée est que : la présence des barrages (existants ou projetés) sur l'Oubangui, comme la présence de tous ouvrages hydrauliques en rivière, altère significativement le régime d'écoulement.*** Or, ce régime d'écoulement est très indispensable dans les bassins fluviaux les moins industrialisés du globe. Il permet naturellement de rythmer la vie des communautés vivantes, de garantir le cycle biologique des espèces aquatiques, de garantir les activités humaines (pêche, agriculture, extraction de sable, pratiques ancestrales liées à l'eau...). Le régime d'écoulement, aussi appelé « *régime hydrologique* », est aussi un facteur essentiel dans le renouvellement des formes fluviales (habitat), il est, en un mot, le déterminant principal de la dynamique fluviale qui est à l'origine de la diversité écologique des cours d'eau.

Organisation générale du manuscrit

Notre manuscrit comporte huit chapitres, répartis en **trois grandes Parties** :

La Partie 1 traite les Cadres Thématiques et Physiques de l'étude, ainsi que les Enjeux environnementaux actuels sur le bassin de l'Oubangui. *Globalement, cette première partie permet de caractériser le bassin de l'Oubangui dont la dynamique fluviale est peu étudiée et peu connue. De ce fait, nous avons fait des analyses rétrospectives via des archives disponibles. Aussi, nous avons recouru aux travaux réalisés par d'autres chercheurs notamment aux travaux réalisés par les chercheurs de l'IRD (Institut de Recherches et de Développement). En complément à ces travaux, nous avons fait des investigations de terrain afin de recueillir de nouvelles données permettant de mieux caractériser la dynamique fluviale récente de l'Oubangui.*

La Partie 2 traite exclusivement les Etudes d'impact des barrages fonctionnels sur le bassin de l'Oubangui. *Ces barrages fonctionnels ne sont autres choses que le barrage de Boali sur la rivière Mbali, et le barrage de Mobaye sur la rivière Oubangui. Des analyses géomatiques, sédimentologiques, et hydrostatistiques ont permis d'évaluer les effets de ces ouvrages sur régime hydrosédimentaire.*

La Partie 3 étudie enfin, les Effets prévisibles des barrages planifiés sur l'Oubangui. *Les principaux barrages planifiés sur l'Oubangui sont le barrage de Palambo et celui de Bria. Ces deux ouvrages sont planifiés pour transférer de l'eau vers le lac Tchad. Le but ici est de faire une « étude prospective » sur les effets potentiels de ces futurs aménagements sur notre bassin d'étude.*

Partie 1

Cadres Thématiques et Physiques de l'étude

Chapitre 1 – Cadre Thématique de l'étude

- A- Bases Conceptuelles en Hydrologie (Fluviale)
- B- Etat de connaissances sur les impacts des barrages

Chapitre 2 – Cadre Physique du bassin de l'Oubangui

- A- Contexte Géographique
- B- Contexte Géomorphologique
- C- Contexte Géologique
- D- Contexte Hydroclimatique
- E- Cadre réglementaire du bassin de l'Oubangui

Chapitre 3 – Les enjeux environnementaux contemporains sur l'Oubangui

- A- Les Enjeux liés aux changements climatiques
- B- Les Enjeux liés aux aménagements fluviaux

Introduction de la Partie 1

La première partie de ce travail est une partie introductive, car elle aborde les cadres thématiques et physiques de notre étude ainsi les enjeux environnementaux contemporains sur l'Oubangui.

Le cadre thématique vise à inscrire notre sujet dans un champ disciplinaire, qui est ici l'hydrologie fluviale. Il permet de définir les concepts clés liés à l'écoulement de l'eau de surface. Il permet également de dresser une synthèse des travaux abordant les impacts des barrages sur les écoulements en rivière.

Le cadre physique quant à lui vise à caractériser le bassin de l'Oubangui dans son contexte hydroclimatique, géomorphologique, hydroclimatique etc. La caractérisation est sans doute indispensable pour appréhender la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui.

Un troisième chapitre abordant les enjeux environnementaux contemporains qui influencent la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui.

Chapitre 1 – Cadre Thématique

Les cours d'eau offrent de nombreux services et sont le support de nombreux aménagements humains. De nature « **hydrologique** », l'étude des cours d'eau est désormais pluridisciplinaire et continue d'inspirer de nombreuses recherches. Ce premier chapitre présente les **bases conceptuelles** de l'hydrologie fluviale avant de faire un « **état de l'art** » des **effets des barrages** en rivière.

La présentation des bases conceptuelles et théoriques constitue un préalable indispensable à tout travail de recherche [Brown, 1996], en particulier sur les travaux de recherches en sciences hydrologiques qui ont beaucoup évolué au cours du siècle dernier. Les concepts définis dans le présent chapitre seront repris tout au long de ce travail.



A- Bases Conceptuelles en Hydrologie (Fluviale)

1- Introduction à l'hydrologie fluviale (tropicale)

L'hydrologie se définit de manière générale comme étant la science qui étudie le **cycle de l'eau** (précipitations, évapotranspiration, écoulement superficiel et souterrain, condensation, etc.). Ce cycle s'effectue par la transformation et le transfert de l'eau sous ses différents états entre l'atmosphère et la surface terrestre, dont le moteur est le soleil.

L'hydrologie fluviale constitue donc la branche de l'hydrologie qui concerne l'écoulement de l'eau sur la surface terrestre. Plusieurs facteurs physiques conditionnent l'écoulement fluvial dont les facteurs morphologiques, lithologiques, pédologiques, biogéographiques et climatiques. Seul le facteur climatique (ex : température et pluviométrie) influence considérablement l'écoulement fluvial, les autres n'interviennent que pour différencier les cours d'eau d'un même domaine hydroclimatique [Frecaut, 1983]. Ainsi, en domaine tropical, les précipitations (pluviométrie) constituent donc le facteur à prendre en compte dans l'écoulement fluvial en l'absence de saisons thermiques. On remarque par ailleurs que les **crues** en domaine tropical chaud et humide sont toujours d'origine pluviale, à la différence de celles des régions de hautes et moyennes latitudes. Le facteur essentiel de leur genèse étant un excès pluviométrique, ou une averse, caractérisé par son total précipité, sa durée et son intensité [Frecaut, 1983]. Tandis que la genèse des **étiages** est à mettre directement en relation avec l'irrégularité des précipitations et plus spatialement avec les sécheresses climatiques, se traduisant par un déficit pluviométrique marqué. Demangeot (1999) classe en deux catégories les courbes pluviométriques intertropicales : il existe alors une **courbe monomodale**, caractérisée par un maximum en solstice d'été et un minimum en solstice d'hiver de l'hémisphère, et une **courbe multimodale**, caractérisée par plusieurs maximums séparés plus ou moins nettement par autant de minimums.

Les régions intertropicales sont relativement bien arrosées du fait de leur position équatoriale qui leur permet de disposer d'un taux élevé en *humidité absolue*. Cependant, une part de l'eau précipitée est destinée à l'évaporation, et l'autre part, à l'écoulement, d'où l'équation :

$$P = E + D, \text{ avec } P : \text{Précipitation, } E : \text{Evaporation + Transpiration, et } D = \text{Drainage.}$$

De même que la précipitation, l'évapotranspiration (ETP) est un élément fondamental du bilan d'écoulement, il intervient pratiquement toute l'année, du fait des températures assez

uniformément élevées [Frecaut, 1983]. Qualifié de « déficit d'écoulement », l'ETP est, selon Tardy (1986), le mécanisme qui permet à l'eau de quitter la surface de la terre pour rejoindre l'atmosphère sous forme de vapeur. Le drainage pour sa part, correspond à l'écoulement de l'eau en surface (ruissellement) et en souterrain (infiltration). Contrairement à l'écoulement souterrain, l'écoulement superficiel constitue la partie de l'hydrologie la plus étudiée et la plus applicable. Dès le début du 20^{ème} siècle, Maurice Pardé (1955) a posé les premières bases d'observations directes en hydrologie de surface, et cela concerne notamment les mesures de « *débit* » (hydrométrie). Le débit (*discharge*) correspond en effet au volume d'eau écoulé par unité de temps. Il s'écrit : $Q (m^3/s) = A.V$, avec (Q) le débit, (A) l'aire mouillée et (V), la vitesse d'écoulement (*flow velocity*). La vitesse d'écoulement dépend de la *pente* (*slope*) et de la *rugosité* (*roughness*) du chenal. Elle peut être déterminée avec l'équation de *Manning-Strickler* qui inclut la rugosité et la pente : $V = Ks. Rh^{2/3}. J^{1/2}$ avec : Ks le Coefficient de rugosité de Strickler, Rh le Rayon hydraulique et J , la Pente du chenal. *La rugosité des berges et du lit* entraîne des pertes de charges par frottement, elle dépend de la nature des matériaux qui composent le lit et de la végétation qui peut plus ou moins l'encombrer [Bravard & petit, 1997].

En raison de leur abondance hydrique, le débit des rivières tropicales est généralement plus élevé comparativement à celui des rivières de hautes et moyennes latitudes. Cinq des plus puissants fleuves au monde sont tropicaux [Demangeot, 1999]. Il s'agit de l'Amazone (209 000 m³/s), du Congo (41 000 m³/s), du Yang Tsé Kiang (35 000 m³/s), de l'Orénoque (29 000 m³/s) et du Brahmapoutre (20 000 m³/s). A l'échelle annuelle, les débits fluviaux ne sont pas constants dans le temps, fluctuant en fonction des variations saisonnières : c'est le « *régime hydrologique* ». Ainsi, les régimes fluviaux tropicaux sont très simples dans leur principe : ils sont pluviaux, ce qui signifie que les débits sont directement commandés par les pluies. Le régime hydrologique est le déterminant principal de la *mosaïque fluviale* (*Patchwork alluvial*), il est indispensable au renouvellement des habitats aquatiques et au remaniement des formes fluviales. Le régime hydrologique naturel de la plupart des rivières est caractérisé par des crues régulières, qui peuvent fortement influencer la distribution et l'abondance des organismes aquatiques [Poff & al., 2002 ; Mannes & al, 2009]. Le régime des crues est comparé à un battement (*Flood pulse concept*), le cours d'eau peut avoir un niveau d'eau élevé en période de crue puis être suivi par une période de décrue, ce qui joue un rôle sur la dimension transversale du cours d'eau [Kreis, 2004 ; Dufour, 2005 ; Grivel, 2008].

Les crues sont aujourd'hui reconnues comme un des moteurs les plus importants de la structure et du fonctionnement des écosystèmes fluviaux [Poff & al., 1997 ; Hart & Finelli, 1999 ; Malard & al., 2006]. Les crues mythiques du Nil dans l'Égypte antique étaient nourricières, et étaient considérées comme un « *don de Dieu* », car elles apportent des limons susceptibles de fertiliser le sol dans le désert. Globalement, on distingue deux types de débits de crues pouvant guider des processus hydrologiques et biogéomorphologiques : *les débits de crue fréquente* ou débits morphogènes (Q_{morph}), et les *débits de crue rare* ou crue exceptionnelle. En domaine tropical, la « **mousson** » est de loin, le type de pluie qui génère les grandes crues. Elle est considérée comme le système climatique le plus puissant au monde et se produit en fonction de la migration latitudinale de la **ZCIT** (*Zone de Convergence Intertropicale*). La mousson rythme la vie des sociétés tropicales. Elle est à l'origine de grandes civilisations Asiatiques basées sur la culture du riz et des céréales [Aubaile-Sallenave, 2014]. Le cycle de la mousson permet au lac Tonlé-Sap d'être un lac nourricier pour de nombreux Cambodgiens. Le mot mousson dérive du mot arabe « *maûsim* » signifiant « *saison* », est souvent assimilé aux crues saisonnières en Asie. Mais en réalité, la mousson recouvre un phénomène plus général aux zones intertropicales.

2- Le système fluvial et l'équilibre dynamique

Maurice Pardé (1943) qualifiait de « Potamologie », la science géographique des cours d'eau. L'auteur distingue à cet effet, deux branches d'études interférentes : l'Hydrologie fluviale (Hydrométrie) et la Dynamique fluviale [Dacharry & Laganier, 2001]. La première branche s'intéresse principalement aux *mesures de débits et leurs variations spatio-temporelles (régime hydrologie)*. La deuxième est la **dynamique fluviale** (*fluvial Dynamics*), s'intéressant aux « *études des forces qui agissent dans les lits des rivières par le fait des courants, des débits liquides et solides, puis les aspects, les particularités des lits... et les déformations qu'ils subissent sous l'action des forces en question* ».

La notion de la dynamique fluviale a évolué très rapidement vers d'autres disciplines, notamment chez les *géomorphologues* qui l'utilisent pour étudier les interactions complexes entre les *structures d'écoulement*, le *transport sédimentaire* et la *morphologie fluviale* (fig. 5).

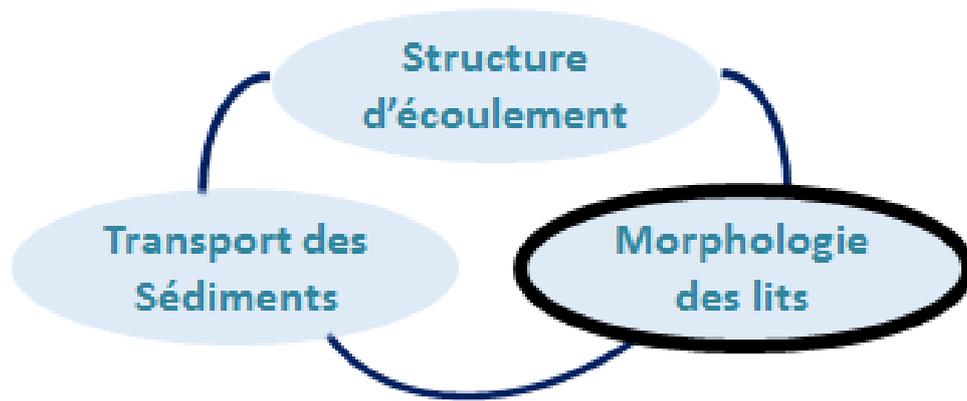


Fig. 5 – Représentation de la Dynamique fluviale selon Buffin-Bélanger (2012)
Fig. 5 – Fluvial dynamics represented by Buffin-Bélanger (2012)

Les structures d'écoulement (*flow structures*) en rivière concernent le *débit liquide* et la *charge solide*. Ces deux variables contrôlent l'évolution physique des rivières à l'échelle du *bassin versant*.

Le transport solide (*sediment transport*) considère tous les processus de mise en mouvement des matériaux et leur mode de transport depuis les zones d'érosion vers les zones d'accumulation. Ces processus en rivière dépendent largement de la *vitesse d'écoulement* et de la *taille granulométrique des alluvions (particle size)* (fig. 6).

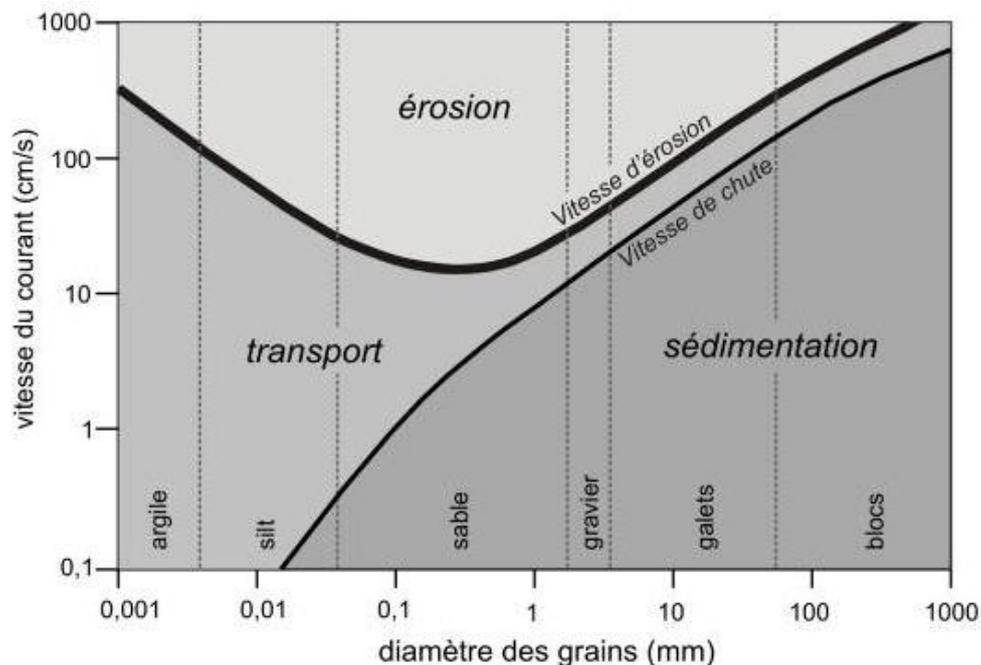


Fig. 6 – Diagramme classique de Hjulström (1935); in Martins (2008).
Fig. 6 – Hjulström Classic Diagram (1935); in Martins (2008).

Le transport solide en rivière dépend aussi de la *force tractrice* (*friction force*) dans le chenal, qui est une force de frottement exercée par l'eau sur les parois et sur le fond du chenal afin d'arracher les particules ; son équation est la suivante : $\tau_0 = \gamma \cdot R \cdot S$ avec τ_0 la force tractrice, γ le poids spécifique de l'eau, R le Rayon hydraulique et S la pente de ligne de charge. De la taille des grains se distinguent en rivières deux grands modes de transport des charges sédimentaires (*sediments loads*) : le charriage et la suspension (fig. 7). **Le charriage** (*bed load*) est le mouvement des grains grossiers (*coarse-sediment load*) près du fond par roulement, glissement ou saltation. **La suspension** (*suspended load*) concerne le mouvement des particules fines (*washload*), donc légères, qui sont maintenues dans le corps de l'écoulement, sans contact fréquent avec le lit, sous l'effet des fluctuations turbulentes au sein du liquide. Un grain déjà mis en mouvement par charriage passe en suspension lorsque la composante verticale de la vitesse turbulente est supérieure à sa vitesse de chute [Recking, Richard & Degoutte, 2013]. La concentration des *matières en suspension* dans une rivière (*turbidité*) permet de rendre compte de la *dégradation spécifique* (*DS*) d'un bassin versant. Les cours d'eau tropicaux drainant un bassin versant forestier (ex : Congo, Paraná et Oubangui) ont généralement une dégradation spécifique faible comparativement aux cours d'eau des régions semi-arides (ex : Niger) et des régions montagnardes (ex : Brahmapoutre, Magdalena). Un autre mode de transport en rivière qui est souvent négligé mais très efficace en milieu tropical concerne le *transport en solution*, consistant à l'évacuation des matières dissoutes (*Dissolved load*) dans l'eau. Pour son module annuel de $41\ 000\ m^3/s$, le fleuve Congo exporte par exemple 67% de matières dissoutes contre seulement 33% de matières solides du total de ses flux sédimentaires vers l'océan Atlantique.

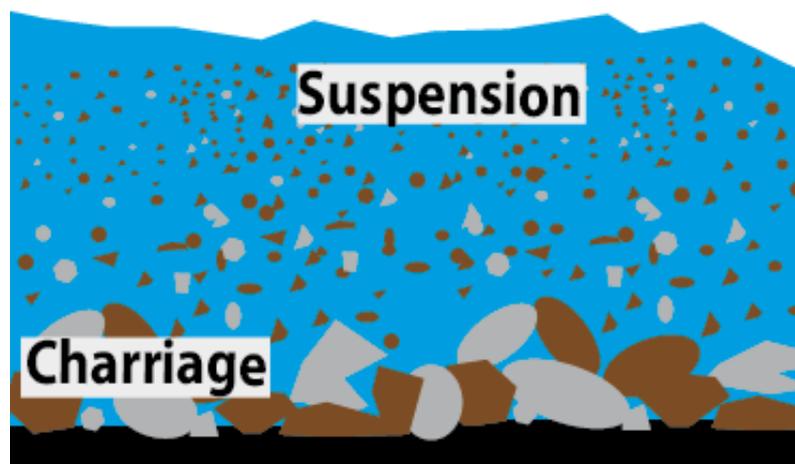


Fig. 7 – Les deux principaux modes de transport sédimentaires en rivière
Fig. 7 – The two main modes of transport of sediment loads into the river

La morphologie fluviale (*river form*) désigne des structures sédimentaires de tailles variées, de la microforme à la macroforme sédimentaire [Hendrick & al., 2010 ; Chapuis, 2012]. La morphologie fluviale n'est jamais le fruit du hasard, elle est la résultante des interactions entre le climat (fluctuations hydro-pluviométriques), la géologie (lithologie) et la pente du chenal. Elle est généralement caractérisée par un certain nombre de paramètres physiques (ex : *largeur, profondeur, pente locale du chenal*) qui répondent à des facteurs de contrôle à la fois locaux (*pente du fond de vallée, granulométrie des sédiments, présence de ripisylve*) et globaux (*débit solide, débit liquide*) [Leopold & al., 1964 ; Thorne, 1997 ; Bravard & Petit, 1997]. Les formes fluviales ne sont pas aussi immuables, elles sont dynamiques dans l'espace-temps en réponse aux fluctuations hydrosédimentaires, et se diversifient longitudinalement en fonction de la *puissance spécifique* du cours d'eau (*fig. 8*). Cette puissance spécifique (*specific power*) correspond alors à la *compétence* d'une rivière à mobiliser ses charges sédimentaires, et a pour équation: $\omega = \tau u$ avec τ la force tractrice totale et u la vitesse moyenne du courant [Petit & al., 2000].

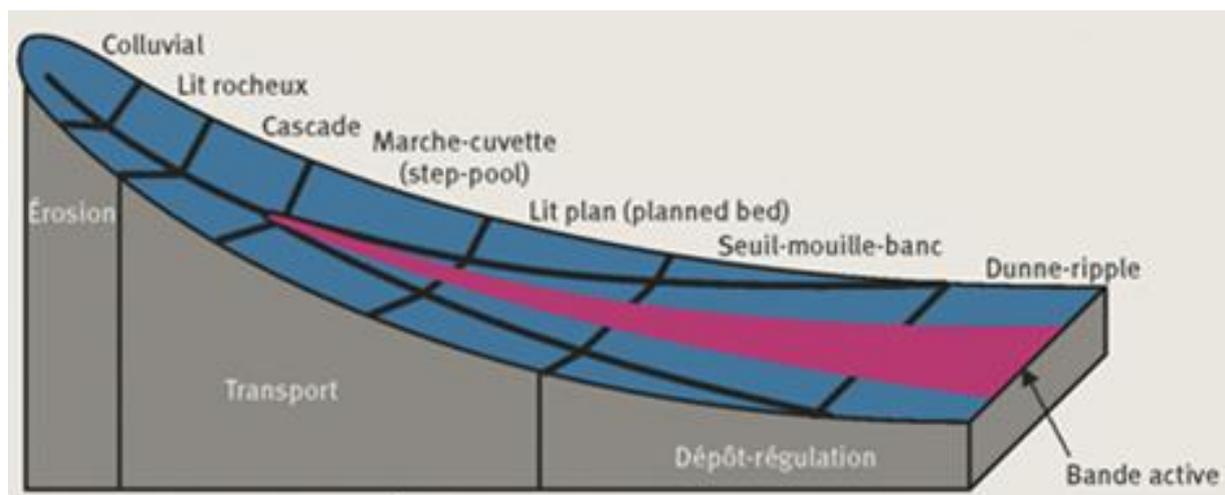


Fig. 8 – Distribution longitudinale de la morphologie fluviale. [D'après Montgomery & Buffington, 1997 ; in Liebault, Renaitre & Pateuil, 2013]

Fig. 8 – Longitudinal distribution of river morphology. [According to Montgomery & Buffington, 1997 ; in Liebault, Renaitre & Pateuil, 2013]

De différents styles fluviaux résultent du façonnement de la morphologie fluviale par les crues. Les styles fluviaux (*channels patterns*) correspondent à l'ajustement progressif des formes fluviales suivant les variations longitudinales des conditions d'écoulement. Généralement, on distingue quatre grands styles fluviaux : *style rectiligne* (*straight channel*),

style *méandrique* (*meandering channel*), style *tressé* (*braided channels*) et style *anastomosé* (*anastomosing channel*). Deux critères principaux permettent cette classification (fig. 9) : la *sinuosité* et la *multiplicité des chenaux* [Bravard & Petit, 2000]. Leopold & Wolman (1957) sont les premiers à établir une classification sur les styles fluviaux, puis viennent les classifications de Schumm (1963), Viers (1967), Rust (1978), Nanson & Knighton (1996).

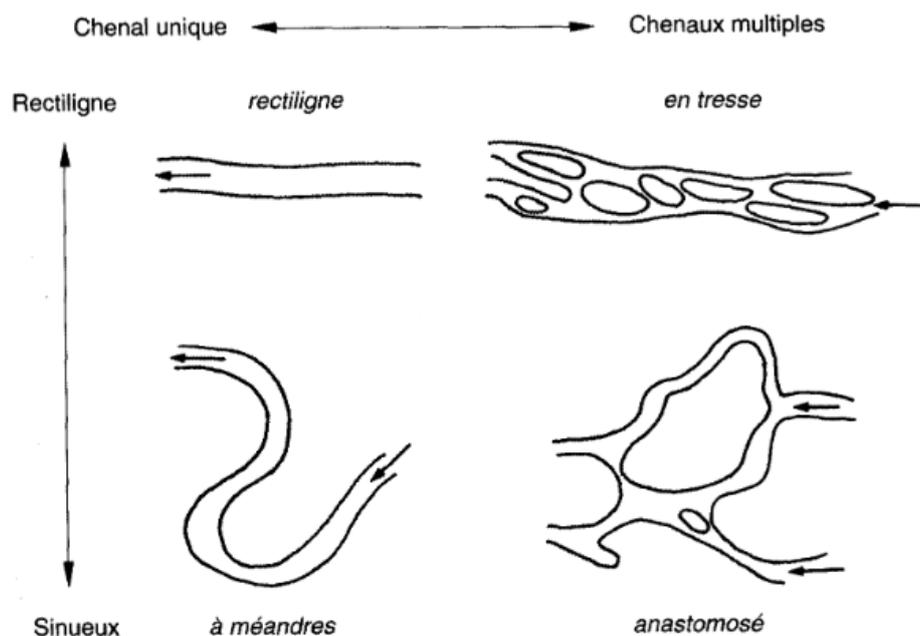


Fig. 9 – Classification de styles fluviaux en fonction de la sinuosité et du nombre des Chenaux. [Rust, 1978; Bravard & Petit, 2000]

Fig. 9 – Classification of fluvial styles according to sinuosity and number of channels. [Rust, 1978 ; Bravard & Petit, 2000]

On observe également sur certains chenaux, différents faciès d'écoulement qui se présente en *alternance de seuil-mouilles* (*Riffle-Pool Sequence*) (fig. 10). Chacun de ces faciès présente sur une certaine longueur, une physionomie générale homogène sur le plan des hauteurs d'eau, des vitesses et de la granulométrie [Malavoi, 1989]. Ces différents faciès permettent de garantir une *diversité d'habitat* aux espèces aquatiques afin d'accomplir leurs cycles vitaux (reproduction, alimentation, croissance, refuges. Pour Lévêque (2001), la notion d'habitat renvoie à deux principes fondamentaux en écologie : *l'hétérogénéité* et la *variabilité* qui créent la diversité biologique. Cependant, le moteur écologique et spatial de la diversité d'habitat en rivière est la *mobilité latérale* des chenaux lors des crues. Celle-ci permet de remobiliser les stocks sédimentaires du chenal et de créer de nouveaux dépôts qui se

végétalisent et participent ensuite à la construction de la plaine alluviale [Liebault & al., 2013]. Mais pour qu'une rivière divague latéralement et érode ses berges, elle doit disposer d'un certain *espace de liberté* (*recreation space*) afin de maintenir une connexion entre le *talweg* et la *plaine inondable* (*flood plain*) (fig. 11). L'espace de liberté garantit en effet le bon état écologique d'une rivière à long terme, car il permet à la rivière de dissiper son énergie, de se recharger en sédiments par érosion des berges, de créer et régénérer de milieux annexes (ex : bras morts) et d'échanger avec la nappe [ONEMA, 2012].

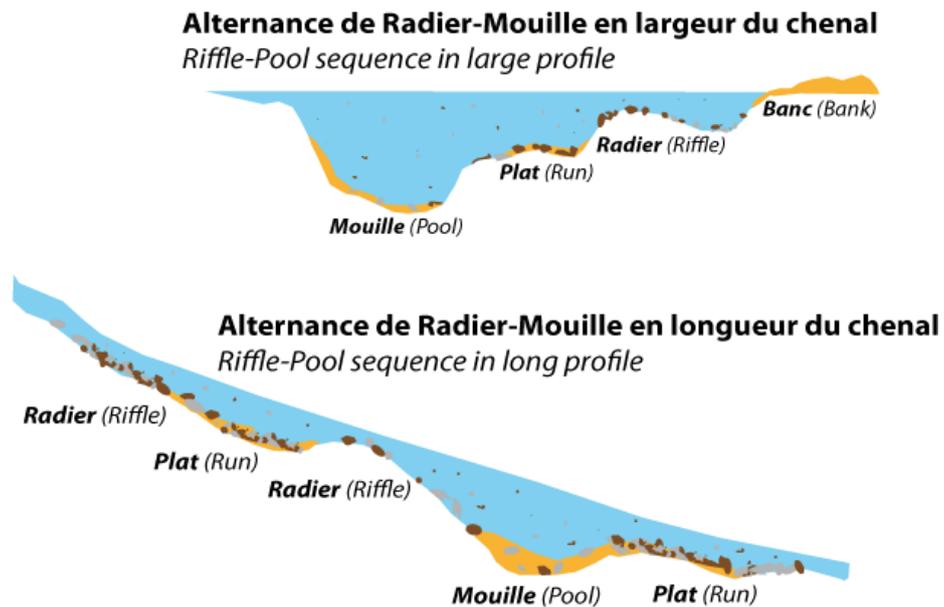


Fig. 10 – Succession de Radiums- mouilles en longueur et largeur d'un chenal
Fig. 10 – Riffle-pool sequence in long and large profile

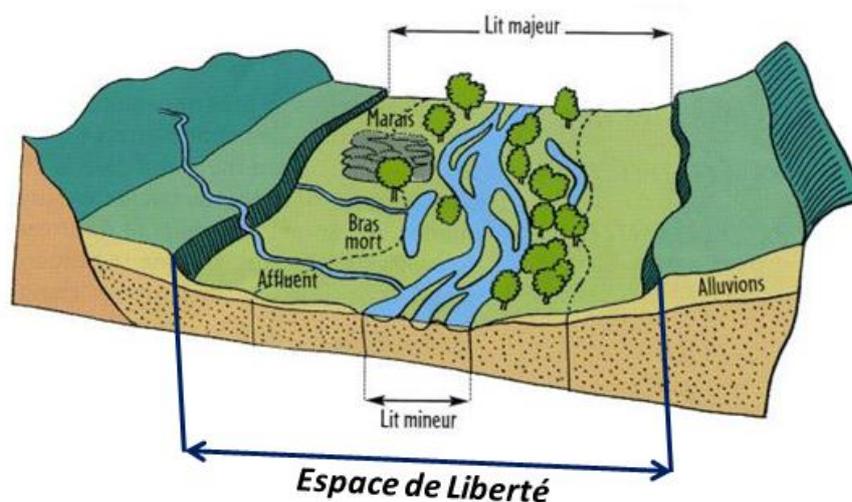


Fig. 11 – Espace de liberté d'un cours d'eau (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse).
Fig. 11 – Recreation space of river (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse).

Dans un contexte de gestion durable des milieux aquatiques, les gestionnaires des lits fluviaux utilisent couramment le concept d'*hydrosystème fluvial* pour gérer les cours d'eau dans leur fonctionnement global. Le concept est mis en application dans l'approche d'analyse diachronique en géomorphologie fluviale contemporaine, et considère les espaces fluviaux comme un *système ouvert* à *entrées-sorties* et à *processus-réponse fluvial* [Schumm, 1977 ; Amoros & Petts, 1993]. L'énergie solaire et les précipitations constituent les entrées dans la cascade hydrologique du bassin, et les sorties, écoulement et pertes par évapotranspirations [Petts & Bravard, 1993]. Les auteurs de ce concept, élaboré et testé sur le *Rhône*, indiquent qu'il est particulièrement adapté aux grands cours d'eau, ou tout au moins à ceux disposant d'une plaine alluviale suffisamment vaste pour permettre la création de la mosaïque d'unités géomorphologiques [Amoros & al., 1987 ; Dacharry & al., 1996 ; Malavoi & Souchon, 1996 ; Malavoi & Bravard, 2010]. Chez les géomorphologues fluviaux, le concept d'hydrosystème fluvial est développé pour appréhender les échanges et les interactions sur un lit fluvial sous quatre dimensions (*fig. 12*), dont trois sont relatives à *l'espace* et un au *temps* [Roux, 1982 ; Amoros & Petts, 1993] :

- ✓ *La Dimension Longitudinale (1D)*, permet d'appréhender tous les phénomènes résultant des flux unidirectionnels le long du gradient amont-aval ; dans un écoulement unidirectionnel, le débit s'accroît de l'amont vers l'aval, contrairement à la pente, à l'altitude et la vitesse qui décroissent. Ces phénomènes sont à l'origine de l'organisation spatiale des transferts de sédiments sur le *continuum fluvial*, et cela fait l'objet d'une zonation hydrosédimentaire chez Schumm (1977) : 1) avec une *zone source* (*fig. 12*) située en tête du bassin versant qui correspond à la zone de production sédimentaire, 2) une *zone de transfert* qui permet d'évacuer les charges sédimentaires vers l'embouchure, et 3) une *zone d'accumulation* caractérisée par une pente et une vitesse extrêmement faibles propices au stockage sédimentaire. En général, les communautés végétales et animales se répartissent longitudinalement (gradient amont-aval) en fonction de la nature du substrat, de la vitesse du courant, de la température et de l'oxygénation des eaux [Lévêque, 2016].
- ✓ *La Dimension Latérale (2D)*, englobe tous les échanges de flux bidirectionnels horizontaux entre le lit mineur (*minor riverbed*) et les annexes hydrauliques (plaine alluviale, bras morts etc.). Selon les caractéristiques géomorphologiques locales, on observe dans la dimension transversale du cours d'eau l'existence de nombreux

habitats dans le lit majeur (fig. 12) : le chenal principal, la zone rivulaire adjacente au chenal avec des bois durs et des ripisylves, la plaine d'inondation, des marais, des bras-morts, des bras secondaires, des formations herbacées [Lévêque, 2016]. En fonction du cycle « crue-décru », il existe une certaine interaction passive ou active entre les différentes communautés aquatiques qui hébergent chacun de ces éléments.

- ✓ *La Dimension Verticale (3D)*, concerne tous les échanges entre le chenal et la nappe phréatique (*Groundwater table*). La nappe phréatique et les cours d'eau sont souvent considérés comme étant des éléments distincts, mais il importe de les visualiser comme étant des composantes d'un continuum hydrologique [Brunke & Gonsier, 1997 ; in Viel, 2015] ; selon son niveau, la nappe peut constituer une source d'eau pour le cours d'eau (exfiltration) ou, à l'inverse, elle peut capter les eaux du cours d'eau (infiltration). Les processus d'infiltration sont nécessaires à l'approvisionnement de la nappe et de maintenir les services qu'elle procure ; à l'inverse, le processus d'exfiltration offrent aussi des avantages, notamment au niveau de la régulation de la température de l'eau [Cosandey & Robinson, 2000 ; Viel, 2015].
- ✓ *La Dimension Temporelle (4D)*, permet d'appréhender aussi bien les cycles saisonniers que les événements rares mais aussi les héritages des changements climatiques et tectoniques qui ont une influence sur le plan écologique ou géomorphologique. Les actions anthropiques (aménagement, prélèvements de granulats, ...) jouent également un rôle sur la géométrie du lit et par conséquent sur la diversité floristique et faunistique [Wiederkehr, 2012].

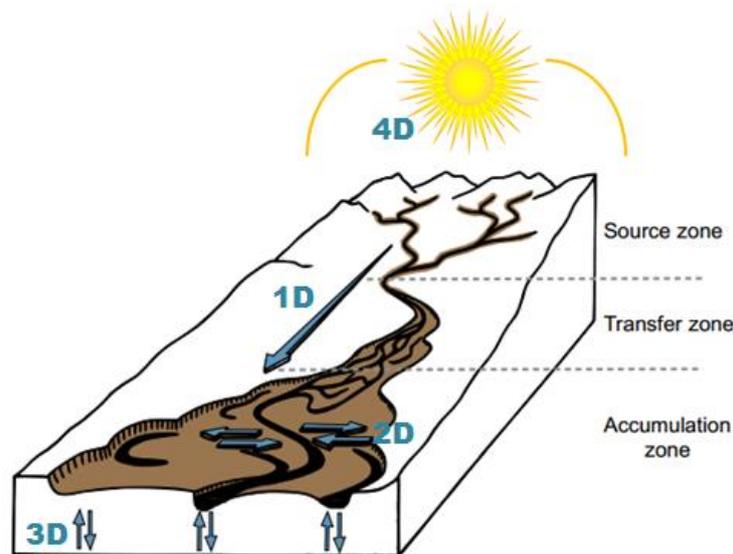


Fig. 12 – Emboîtement schématisé de l'hydroystème fluvial [Amoros & Petts, 1993]
Fig.12 – Encase schematically of the river hydrosystem [Amoros & Petts, 1993]

3- L'équilibre dynamique et les Ajustements fluviaux

Deux paramètres commandent le fonctionnement physique des hydrosystèmes fluviaux : les flux hydriques et les flux de matières [Gautier & Touchart, 1999]. Ces deux flux ne sont pas constants dans le temps, ils varient selon différents pas de temps, en fonction des fluctuations hydroclimatiques et des aménagements humains. La rivière doit donc ajuster continuellement son lit pour maintenir une capacité de transport en adéquation avec sa charge sédimentaire [Recking & al., 2013]. En fonction des altérations des flux liquides et solides, la rivière peut présenter une certaine *résistance* ou être *résilient*. La résilience se définit par la capacité d'un système à pouvoir intégrer dans son fonctionnement une perturbation, sans pour autant changer de structure qualitative [Holling, 1973]. Le concept « *d'équilibre dynamique* » est fondé sur le bilan hydrosédimentaire équilibré en rivière (fig. 13), et postule que les systèmes fluviaux sont capables de retrouver un état d'équilibre (*state equilibrium*) proche de leur état initial à la suite d'une perturbation [Navratil, 2005]. L'équilibre sédimentaire d'un cours d'eau dépend d'une adéquation entre les trois facteurs suivants: l'hydrologie du cours d'eau, la granulométrie des sédiments présents dans le lit et la pente du chenal [Belleudy & Lefort].

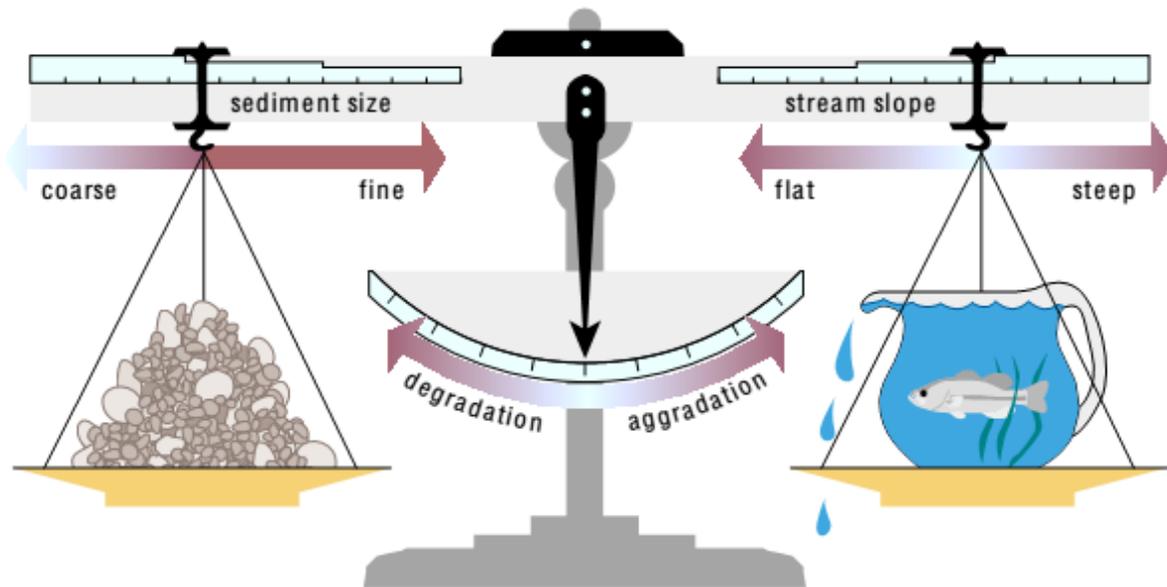


Fig. 13 – Principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane, 1955) basé sur le Bilan entrées-sorties d'un système fluvial.

Fig. 13 - Principle of dynamic equilibrium (according to Lane, 1955) based on the input-output balance of a fluvial system.

Les systèmes fluviaux sont souvent considérés comme des organismes vivants dotés d'un système immunitaire capable de réagir à toutes perturbations externes d'origines naturelles

(climatiques, géologique etc.) ou anthropiques (changement d'occupation du sol, extractions de granulats et aménagements fluviaux). Ces perturbations sont susceptibles d'entraîner une mutation de tout ou partie du système fluvial. La réaction/réponse du système fluvial aux perturbations est qualifiée *d'ajustement fluvial*. Ceci permet au système de revenir à « *l'équilibre initial* » ou d'évoluer vers un « *nouvel équilibre* » morphologique afin d'évacuer toute ou partie de sa charge solide. Cependant, le retour à l'équilibre ne se fait pas immédiatement après la perturbation, il s'agit d'un processus lent, il existe toujours une échelle temporelle nécessaire pour la relaxation d'un système fluvial après perturbation (*fig. 14*). Cette échelle varie du pas de temps décennal au pas de temps plurimillénaire [Knighton, 1998]. Dans certains cas, l'équilibre n'est même pas atteint et l'écosystème reste dans un état de perpétuelle « convalescence » [Wolman & Gerson, 1978 ; Martins, 2008]. Les deux principaux types d'altérations ou de **perturbations** en rivières sont : La perturbation « rythmique » et la perturbation « progressive » [Brierley & al., 2008]. La perturbation rythmique est reliée aux évènements épisodiques localisés, de durée limitée, de faible fréquence et d'amplitude élevée. Dans ce cas, les réponses pour ces évènements sont spatialement non uniformes. La perturbation progressive est un stress continu et en croissance dans le temps et l'espace, celle-ci change plusieurs caractéristiques du cours d'eau et provoque des réponses dans un large secteur : c'est le cas des effets des barrages en rivière.

En théorie on a deux types de **réponses** du système fluvial à la suite d'une altération, qui vont dépendre de l'intensité de l'altération et du type de rivière : Le premier type de réponse correspond à une réponse peu marquée qui est une *adaptation sans changement de style (accommodation)* ; le deuxième type est un *changement extrême des caractéristiques morphologiques* du système fluvial appelé *métamorphose fluviale (river metamorphosis)* [Piegay & Schumm, 2003 ; Alacayaga, 2013]. Un cas de métamorphose fluviale causé par les effets des aménagements hydrauliques a été signalé sur *l'Isar* en *Bavière* [Malavoi & Bravard, 2010], où la rivière passe d'un lit tressé et large de près de 600 mètres, en une rivière à chenal unique de moins de 100 m de large, suite à la construction d'un barrage hydroélectrique à la fin des années 1950.

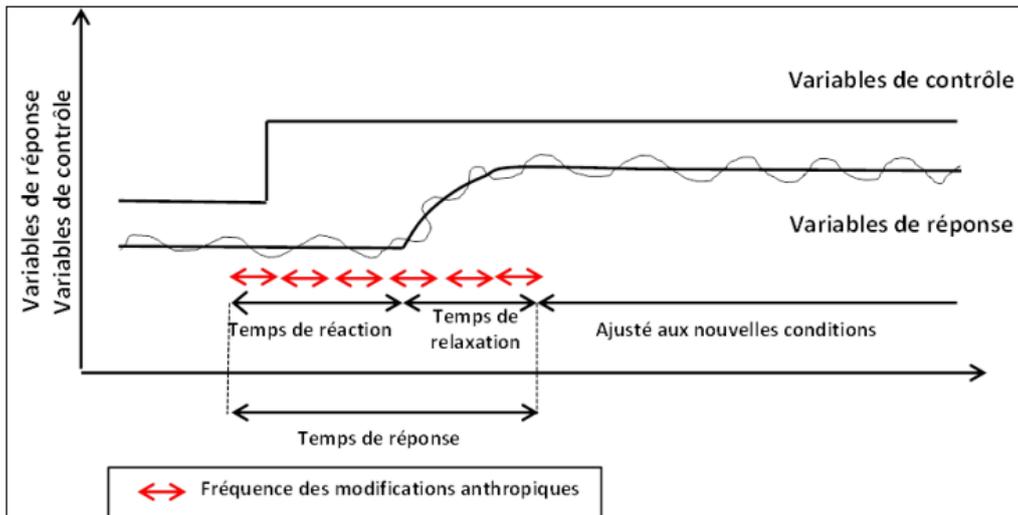


Fig. 14 – Temps de Réponses d’un système fluvial aux modifications brutales d’une variable de contrôle [Knighton, 1984 ; in : Rollet, 2007]

Fig. 14 – Response time of a river system to sudden changes in a control variable [Knighton (1984) in : Rollet (2007)]

Pour des auteurs comme Church (1995), Gaeuman & Schmidt (2005), Phillips & Slattery (2005), les changements dans la **largeur** d’un chenal pouvaient être la première réponse d’un chenal à la construction d’un barrage. Sear (1996), distingue quatre cas d’ajustement de la largeur d’un chenal (fig. 15) :

- 1) *Le premier cas concerne les cours d’eau touchés par des modifications de faible ampleur (simples oscillations autour de valeurs moyennes), le style fluvial ne change pratiquement pas, le pas de temps varie de 50 à 100 ans.*
- 2) *Dans le deuxième cas, si le cours d’eau fait l’objet de changements durables, le style fluvial peut changer de manière durable et n’évoluer ensuite que faiblement autour d’une nouvelle géométrie moyenne d’équilibre. Le pas de temps ici varie également de 50 à 100 ans.*
- 3) *Les modifications apportées aux cours d’eau sont fortes mais relativement brèves, l’effet de ces altérations n’est pas permanent. En réponse à ce changement temporaire, le cours d’eau s’oriente quelque temps vers un nouveau style, puis revient progressivement à son patron antérieur.*
- 4) *Le quatrième cas concerne les ajustements sur le long terme, les modifications et les changements de styles peuvent être assez fréquents, en fonction des fluctuations de débits*

liquides (Q) et solides (Q_s) ou de perturbations externes majeures (variation du niveau des mers, mouvements tectoniques, etc.) ; le pas de temps est de 1000 ans.

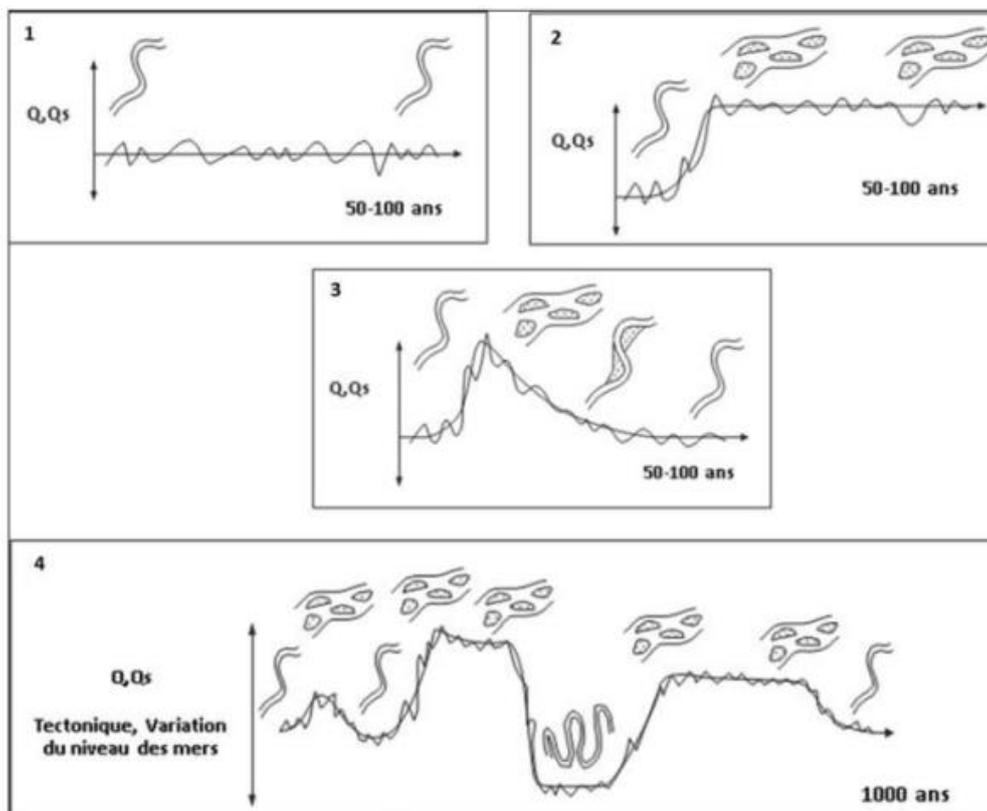


Fig. 15 – Différents cas d'évolution du style fluvial : (1) sans changement de forme, (2) changement de forme, (3) changement de forme et un retour à la forme initiale, (4) changement du style fluvial. (Source: Sear, 1996 ; in Nabet, 2013).

Fig. 15 – Different cases of evolution of the fluvial style: (1) without change of form, (2) change of form, (3) change of form and a return to the initial form, (4) change of fluvial style. [Source: Sear, 1996; in Nabet, 2013].

La largeur du lit n'est pas la seule variable qui s'ajuste de manière spectaculaire en aval d'un barrage. Les résultats d'études de terrain et du laboratoire ont montré que *la profondeur* et *la granulométrie* d'une rivière s'ajustent également après régulation du débit. **La profondeur** s'ajuste généralement de manière verticale par *incision* ou par *aggradation*. Doyle & Harbor (2003) ont montré que les chenaux à fond caillouteux sont les plus susceptibles de processus d'aggradation, tandis que les chenaux à fond sableux sont les plus susceptibles de processus d'incision. Sur base des profils en travers, Brandt (2000a) propose un modèle théorique permettant de comprendre l'ajustement vertical d'un chenal en aval d'un barrage. Le modèle de Brandt (2000a) synthétise à l'aide d'une typologie en 9 classes basées sur l'équation de

Lane (1955), qui prend en compte la variabilité du débit liquide (Ql) et la balance entre la charge solide disponible et la capacité du transport sédimentaire (fig. 16).

Qu'il s'agisse de la **granulométrie**, l'ajustement en aval d'un barrage peut se faire par *pavage* ou par *affinement des grains (downstream fining)*. Ces trois paramètres sensibles (largeur, profondeur et granulométrie) sont relativement interdépendants et la modification de l'un peut entraîner l'ajustement significatif des deux autres et pouvant conduire à un changement d'état durable du tronçon.

	charge < capacité	charge = capacité	charge > capacité
Ql réduits	<p>Cas 1</p>	<p>Cas 2</p>	<p>Cas 3</p>
Ql non modifiés	<p>Cas 4</p>	<p>Cas 5</p>	<p>Cas 6</p>
Ql augmentés	<p>Cas 7</p>	<p>Cas 8</p>	<p>Cas 9</p>

Fig. 16 – Schéma des ajustements morphologiques des sections en travers en réponse aux modifications des débits liquides par rapport à la capacité de transport. Le trait gris correspond à la section en travers originelle avant l'implantation du barrage, et le trait noir correspond à la section après les effets du barrage. Source: Brandt (2000a)

Fig. 16 – Diagram of morphological adjustments of cross sections in response to changes in liquid flows in relation to transport capacity. The gray line corresponds to the original cross-section before the dam was installed, and the black line corresponds to the section after the effects of the dam. Source: Brandt (2000a)

B- Etat de connaissances sur les impacts des barrages

1- Taille et type des barrages dans le monde

Le mot « *barrage* » en hydraulique fluviale se définit comme un ouvrage artificiel qui barre la largeur d'un cours d'eau (Petit Larousse). Cependant, il manque toujours de précisions de taille pour distinguer un *grand barrage* d'un *petit barrage*. De manière générale, on définit la taille d'un barrage à travers ses caractéristiques physiques, telle que la hauteur de la crête de l'ouvrage en travers, le volume d'eau stocké dans la retenue et la surface occupée par la retenue. Nombreux auteurs se réfèrent à la définition de la CIBG (*Commission Internationale des Grands Barrages*) pour définir un grand barrage comme étant « *un ouvrage hydraulique en travers dont la hauteur de crête dépasse 15 m et le volume du réservoir atteint les 3 millions de mètre cube* ». Dans son registre mondial, la CIBG (ICOLD en anglais) compte actuellement environ 60 000 grands barrages dont la moitié de l'effectif concerne les barrages à « fonction unique ». A ce titre, l'irrigation et l'hydroélectricité concentrent respectivement 50% et 20% des barrages à fonction unique. Ces ouvrages ont connu une hausse spectaculaire au 18^{ème} siècle avec l'avènement de l'hydroélectricité avant d'atteindre leur apogée au 20^{ème} siècle. Malgré tout, l'hydroélectricité n'est de loin la principale source de production d'énergie au monde. Selon les chiffres de l'AIE (*Agence Internationale de l'Energie*), la production d'énergie hydroélectrique ne représente que 2,4% de la production mondiale d'électricité, loin derrière le pétrole (31,4%), le charbon (29%) et le gaz naturel (21,3%). La taille des barrages hydroélectriques est aussi fonction de leur « *hauteur de chutes* ». Ainsi, pour chaque hauteur de chute exploitée, il existe une turbine correspondante :

- ✓ Turbine Caplan, pour une hauteur de chute < 30 m (*basse chute*)
- ✓ Turbine Francis, hauteur de chute >30<200 m (*moyenne chute*)
- ✓ Turbine Pelton, hauteur de chute > 200 m (*haute chute*).

Les turbines ont la particularité de transformer l'énergie cinétique de l'eau liquide en énergie mécanique, puis en énergie électrique par l'alternateur ; des lignes de hautes tensions se chargent d'acheminer l'énergie aux centres de consommation. Les aménagements hydroélectriques peuvent s'envisager soit en « *hautes chutes* » dans le cas des cours d'eau à forts dénivelés, ou au « *fil de l'eau* » sur les cours d'eau de moyennes altitudes (*fig. 17*). Le choix du site d'aménagement hydroélectrique se fait généralement en fonction de la topographie (capacité du stockage de la vallée), de l'hydrologie (débit), de la géologie (stabilité du terrain) et aussi de la main-d'œuvre.

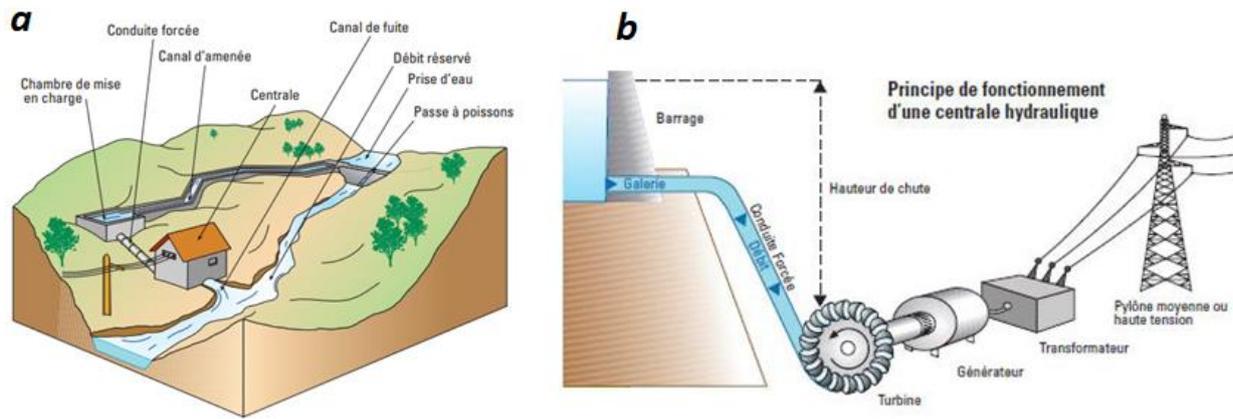


Fig. 17 – Principe d’un aménagement hydroélectrique : a) une centrale au fil de l’eau ; b) les équipements d’une centrale hydroélectrique (Source : ADEME, 2003).

Fig. 17 – Hydroelectric Principle operation: (a) a run-of-river power station; b) equipment of a hydroelectric power station (Source: ADEME, 2003).

Typologie des ouvrages hydrauliques sur les lits fluviaux

On entend par « type » de barrage, la structure physique de l’ouvrage, notamment son dimensionnement, ses matériaux de construction et ses fonctions ; tout ceci dépend des caractéristiques physiques du site d’aménagement (sol, topographie, géologie, hydrologie ...). Si la langue anglaise est riche en typologie des ouvrages transversaux en rivière, cependant en France, il n’existe que deux grands types d’ouvrages transversaux en fonction de leur niveau d’obstruction du fond de vallée : on distingue « *les seuils en rivière* » et les « *barrages* » [Braud & Alber, 2013] :

- ✓ **Les seuils en rivière** (*Run-of-river dam ou Overflow dams*) sont des ouvrages fixes ou mobiles, barrant tout ou partie du lit mineur d’un cours d’eau (SANDRE, 2008). Ils sont généralement d’une hauteur inférieure à 5 m (soit la hauteur de berges des plus grands cours d’eau). Les *seuils* ont pour effets principaux de diminuer les vitesses en augmentant le niveau d’eau à l’amont. Au sein des seuils, on peut également distinguer deux familles d’ouvrages : *les seuils fixes* qui sont des ouvrages en travers du cours d’eau, au-dessus desquels l’eau s’écoule ; et les *seuils mobiles* qui sont en réalité formés d’une partie fixe dont l’emprise transversale est plus ou moins large et d’une ou plusieurs parties mobiles.
- ✓ **Les barrages (dam)**, sont des ouvrages de forte hauteur, presque toujours supérieure à 5 m, qui obstruent une grande partie du fond de vallée, soit bien plus que le simple lit

mineur [Malavoi & al., 2011 ; Braud. & al., 2013]. En fonction des installations, on distingue : *les barrages-poids* et *les barrages en remblais*.

- *Les barrages-poids* sont faits en béton massif dont leur propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau, c'est le cas du barrage des trois gorges en Chine. Ce type de barrage présente une forme généralement courbée leur permettant de reporter la pression de l'eau sur les rives, dans ce cas on parle de *barrage-voûte*.
- *Les barrages en remblais* sont faits en terre ou en un mélange de terre et d'enrochement, c'est le type de barrage le plus ancien, ils représentent environ 70% des barrages construits dans le monde (CIGB, 2011).

2- Les barrages et les conflictualités dans le monde

Importance de l'eau et retour des grands barrages sur la scène mondiale

Avant que la ville lui confère une valeur économique, l'eau a d'abord été une ressource symbolique, même la Bible en fait mention dès ses premiers chapitres (Genèse 1,2). L'eau a été au centre de nombreuses civilisations : le *Gange* est sacré pour les *Hindous*, le *Nil* était un don de Dieu pour les Egyptiens, le *Mékong* est la mère de toutes les eaux pour les Thaïlandais, et *l'Amazone (l'Urubamba)* est aussi sacrée pour les *Incas*. Le caractère symbolique de *l'Oubangui* est donc multiple. Pour certains, *l'Oubangui* est une résurgence du *Nil* près du *lac Albert*, donc il est une rivière sacrée. Pour d'autres, notamment les *Ngbandi*² (peuple de l'eau), *l'Oubangui* est une rivière des Dieux. On distingue parmi ces Dieux, *les Talimbi (génie d'eau, hommes-caïmans)*, *les Mami-wata (Sirène)*, *les zo ti likundu (sorcières)*, etc. Pour Cimprič (2011), ces représentations imaginaires fonctionnent à la fois comme un régulateur des normes de savoir-vivre et de moralité des personnes. Le respect des codes et des rites permet aux riverains de vivre en symbiose avec leur rivière ; cela leur permet aussi de garantir les activités humaines en lien avec la rivière, en l'occurrence, la pêche et l'agriculture. Malheureusement, cet équilibre est presque rompu avec l'arrivée du catholicisme en Afrique noire, et l'urbanisation rapide après la décolonisation. *L'Oubangui* qui, jadis, avait une fonction sacrée et nourricière, a acquis une nouvelle fonction économique dans la moitié du

² *Les Ngbandi sont une population d'Afrique centrale appartenant au groupe des « peuples de l'eau » Originaire du haut-Nil, on les retrouve de nos jours en Centrafrique, au Congo-Démocratique, au Cameroun, au Congo-Brazzaville, et au Sud-Soudan. Source : Dampierre (1967), Boyldieu & Diki-Kidiri (1982).*

20^{ème} siècle. Ses granulats sont extraits désormais pour construire des ponts et routes. Son eau est prélevée pour alimenter la population grandissante en eau potable. Son linéaire fluvial (parsemé d'îles et rapides) est de plus en plus aménagé pour servir d'autoroute fluviale entre Bangui-Brazzaville. Ces différents aménagements conjugués aux effets des changements climatiques affectent les ressources en eau de l'Oubangui et cela crée parfois des situations de pénurie d'eau sur ce bassin fluvial bien arrosé. Ces cas de pénuries sont généralement recensés lors des « saisons sèches » où les eaux de surfaces ne sont plus alimentées par les eaux pluviales, et que la nappe phréatique n'est plus aussi alimentée par les eaux de surface.

À l'échelle mondiale, la demande en eau est de plus en plus supérieure à la quantité d'eau disponible. La consommation mondiale en eau a quadruplé depuis 1950 du fait de l'accroissement de la population et du développement économique après la 2^{nde} guerre mondiale [Martins, 2008].]. Déjà au 18^{ème} siècle, l'économiste Britannique Thomas Robert Malthus (1766-1834) a tiré la sonnette d'alarme dans son essai intitulé « le principe de population ». Selon ce révérend, « *si elle n'est pas freinée, la population s'accroît en progression géométrique, alors que les subsistances ne s'accroissent qu'en progression arithmétique.* » [Rutherford, 2007]. Selon les chiffres de l'ONU, la population mondiale est passée de 2,5 milliards en 1950 à près de 7,5 milliards de nos jours. Les projections démographiques actuelles montrent que ces chiffres pourraient atteindre 9 milliards en l'an 2050 et 11,5 milliards d'ici l'an 2100. En revanche, les projections sur la consommation de l'eau montrent que la demande mondiale en eau devrait augmenter d'au moins 2 à 3% dans les décennies à venir (CIGB). Ainsi, le thème de l'eau est l'un des plus importants en ce début de 21^{ème} siècle car au fur et à mesure que la population mondiale augmente, la demande en eau s'accroît [Wackermann & Rougier, 2010].

La crise actuelle de l'eau est d'abord une crise de la forte demande que de l'offre [Victoria, 2012]. L'eau est devenue une ressource aussi convoitée que le pétrole le fut au 20^{ème} siècle, cela éveille des rivalités capables de dégénérer en conflits ouverts [Galland, 2012]. Les pays les moins arrosés du globe s'imposent dans leur gestion de ressources en eau afin de faire face aux défis de l'urbanisation et de la croissance démographique. Face à cette situation, la construction des réservoirs d'eau paraît essentielle pour gérer les ressources hydriques et répondre aux besoins grandissants en eau et en énergie. Déjà au 20^{ème} siècle, la construction de nombreux barrages-réservoirs a permis de soutenir la croissance économique de l'après-guerre. Mais ces ouvrages ont connu un répit à la fin des années 1990 du fait de leurs coûts

socio-environnementaux. C'est l'époque où les promoteurs des barrages ont rencontré d'énormes résistances dans la réalisation de leurs projets d'aménagements. Pressées par les opinions publiques et les ONG, les institutions internationales refusent désormais de financer les grands barrages [Bazin & Gascon, 2015]. La Banque Mondiale a ainsi renforcé ses politiques d'évaluations et de financements de projets des grands barrages vis-à-vis des promoteurs.

Afin d'assurer leur indépendance en eau et en énergie, certains pays émergents ont opté pour d'autres modes de financements des projets d'aménagements hydrauliques. Tel est le cas du Brésil, où la Banque Publique de Développement a assuré l'essentiel du financement du très controversé barrage de *Belo Monte* sur la rivière *Rio Xingu* (affluent de l'Amazone). En Ethiopie, le *Grand barrage Renaissance* (GERD) a été financé grâce au dispositif de financement participatif mis en place par le gouvernement Ethiopien. D'un coût de 5 milliards de dollars, la construction du GERD a commencé en 2013 sur le *Nil Bleu*, son achèvement est prévu en 2018. Pour l'ingénieur en chef du projet, *Mr Simegnew Bekele*, le barrage GERD sera un facteur de stabilité régionale car il fournira de l'électricité dans toute la « Corne de l'Afrique » (Kenya, Djibouti, Soudan etc.). Une fois achevé, GERD devrait devenir le plus grand barrage hydroélectrique d'Afrique avec une capacité de 6 450 MW. C'est un projet phare pour le renouveau de l'Ethiopie, ce pays qui a sombré pendant des décennies dans la guerre et la famine. Mais l'Egypte qui dépend vitalemment des eaux du *Nil*, craint de passer sous l'emprise totale de l'Ethiopie, et voit en ce projet de barrage une déclaration de guerre. Considéré comme le plus long fleuve du monde avec ses 6671 km, le *Nil* est aussi considéré comme « le berceau de la civilisation Egyptienne ». Cependant, 95% des eaux du *Nil* Egyptien proviennent de l'extérieur, notamment du Soudan et de l'Ethiopie (Nil Bleu) [Lasserre, 2009]. Le traité de 1959 donnait 55,5 km³ d'eau du *Nil* à l'Egypte et 18,5 km³ au Soudan pour régler provisoirement les conflits entre les deux pays. Cela a conduit à la construction du barrage d'Assouan. L'Ethiopie ne s'estime pas liée par l'accord de 1959 qui ne lui accorde aucun droit sur le *Nil Bleu*, entreprend de construire des barrages pour la production hydroélectrique et pour l'irrigation [Blanchon, 2012]. Mais l'Egypte a toujours montré des signes très nets d'agressivité dès que le Soudan ou l'Ethiopie ont laissé paraître une volonté d'exploitation des eaux du *Nil* [Lasserre, 2009].

Le rapport du 6^{ème} Forum mondial de l'eau qui s'est tenu à Marseille en 2012 a souligné le nombre en hausse de grands barrages sur la scène mondiale en dépit de leurs controverses

environnementales. Ce regain d'intérêt du nombre des barrages est enregistré dans les pays émergents, notamment en Chine et au Brésil. La Chine est en effet le pays qui compte de nos jours le plus de barrage au monde. Environ 23 841 grands barrages recensés par la CIBG. Le pays regorge en ce moment le plus grand barrage hydroélectrique du monde, le barrage des « **Trois-Gorges** ». Ce méga-barrage turbine les eaux du fleuve *Yang-Tsé* depuis le début des années 2000 pour produire une capacité d'énergie de plus de 22 400 MW. Troisième fleuve du monde par sa longueur (6 300 km), le *Yang-Tsé* prend sa source à plus de 5400 m d'altitude, sur le plateau du *Tibet* [Sanjuan & Béreau, 2001]. Son hydrologie est caractérisée par des crues dévastatrices. Non seulement qu'il a permis de produire de l'hydroélectricité, l'aménagement des Trois-Gorges a permis aussi de réduire les risques d'inondations du fleuve *Yang-Tsé* dans les provinces centrales de Chine. De nombreux autres grands barrages ont été construits en Chine sur d'autres fleuves Asiatiques comme le *Mékong*. Ce dernier tire aussi sa source sur le plateau *Tibétain* et traverse successivement 6 pays (Chine, Birmanie, Thaïlande, Laos, Cambodge et Vietnam) avant de rejoindre la Mer méridionale de Chine. Dans sa traversée Chinoise, le *Mékong* a fait l'objet de trois aménagements hydrauliques majeurs et cinq autres en projet d'aménagements [Galland, 2012]. De nombreuses études ont souligné les effets négatifs de ces aménagements hydrauliques sur le régime hydrologique du *Mékong*, et sur l'activité piscicole du lac *Tonlé-sap* en Cambodge. Mais la Chine, puissance hydrohégémonique de l'Asie du sud-est, ne mesure pas en ce moment l'impact socio-environnemental de ces projets et ne compte pas en rester là.

Les prévisions globales montrent que le nombre des barrages devrait augmenter durant les prochaines décennies dans les pays en développement à cause de la forte croissance urbaine attendue. A ce titre, les grands fleuves de la planète deviendront tous des supports d'importants projets de développement hydraulique. Or, deux-tiers des grands fleuves de la planète sont transfrontaliers. Leurs aménagements pourraient susciter des conflits hydro-politiques. L'annonce de grands programmes hydrauliques dans les pays du sud a réactivé des rivalités entre les États qui partagent, d'amont en aval, d'immenses bassins fluviaux. Ceux dont le territoire renferme les sources affirment détenir des droits exclusifs sur les eaux, droits contestés, dans le cours inférieur, au nom de l'histoire [Bazin & Gascon, 2015]. Sans prétendre établir un recensement exhaustif des conflits hydro-politiques liés à l'établissement des barrages, on peut signaler de vives tensions autour du *barrage d'Atatürk* sur l'*Euphrate* entre la Turquie, l'Irak et la Syrie, des discordes récurrentes autour du *barrage d'Assouan* sur

le *Nil* entre l’Égypte et le Soudan, et sur le *barrage Renaissance* entre l’Égypte et l’Éthiopie. Ces conflits hydro-politiques autour des barrages résultent d’une mauvaise gouvernance de l’eau à l’échelle régionale ou du bassin. Si de telles tensions continuent, nous allons nous diriger vers une guerre de l’eau (or bleu) comme le fut le cas de la guerre du pétrole (or noir) au 20^{ème} siècle [Roman, 2018].

Les transferts d’eau comme solution pour réguler l’irrégularité spatiale de l’eau

Si les barrages ont apporté une réponse à la nécessité de redistribuer dans le temps une ressource (pluie-débit) qui n'est souvent abondante que pendant quelques mois dans l'année, et irrégulière d'une année sur l'autre. Les canaux et transferts d'eau interbassins, eux, constituent la réponse à l'inadéquation spatiale d'une ressource éloignée des besoins [Molle, 2015]. Il est admis de tous que l’eau sur terre est inégalement répartie, cela crée ainsi un déséquilibre spatial entre l’offre et la demande dans certaines contrées du globe. La mise en place des infrastructures de dérivation permettent en effet de transférer de l’eau depuis un bassin excédentaire vers un bassin déficitaire. Roman (2018) pense que, les transferts hydriques artificiels ne sont ainsi rien d’autre que des artefacts visant à faire couler l’eau vers d’autres horizons. Pour preuve, de nombreux projets de transferts d’eau ont été réalisés depuis le siècle dernier visant à répondre aux déséquilibres spatiaux entre la demande en eau et la disponibilité. En Chine par exemple les transferts d’eau visent à dériver de l’eau des provinces du sud vers les provinces industrialisées du nord. Ces travaux ont permis de dériver une partie du fleuve *Yang-Tsé* vers le fleuve *Jaune*. De même en Australie, les transferts visent à canaliser de l’eau depuis le nord du pays vers le centre afin de faire face à la pénurie d’eau. Le sud-ouest des Etats-Unis est l’un des foyers des travaux de dérivations d’eau. Le Colorado est le fleuve le plus affecté par ces opérations de pompage, consistant à dériver l’eau du canyon par le biais des pipelines pour approvisionner les Etats de la Californie, de l’Arizona, et du Nevada. En Afrique, les travaux de transferts d’eau concernent principalement le nord et le sud du continent. En Afrique du nord, c’est la « *Grande Rivière Artificielle* » (GRA) de la Lybie qui fait d’office de référence. Les opérations de la construction de la GRA ont débuté vers la fin des années 1980 et consistait à transférer de l’eau fossile des nappes aquifères du Bassin de Nubie (6 millions de m³/jour à terme) sous le désert libyen vers la Tripolitaine et les villes côtières sur plus de 3 000 km de canaux souterrains [...] Ce projet internationalement reconnu [Meyer, 2018], vise à atteindre l’indépendance alimentaire en permettant une agriculture irriguée, et d’assurer la consommation en eau des villes côtières [Roman, 2018].

En Afrique du Sud, les transferts affectent principalement le fleuve Orange, et consiste à construire un grand système de transfert d'eau, « vitrine » du régime d'apartheid, pour mettre en valeur les terres semi-arides du sud et de l'ouest du pays à partir de 1950 [Blanchon, 2006]. Considéré comme l'un des berceaux des transferts d'eau en Afrique, l'Afrique du sud ne compte pas moins de huit transferts d'eau majeurs [Blanchon, 2003]. Mais ces transferts sont ainsi d'excellents indicateurs des tensions du territoire sud-africain et traduisent un rapport de force régional à un moment donné, qui explique leur direction [Blanchon, 2006]. Du moins, l'Afrique centrale est la partie du continent la moins équipée en infrastructures de transferts d'eau. Toutefois, un immense projet de transfert d'eau a pris naissance dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, et visait essentiellement à transférer une partie des eaux du bassin du Congo vers le sahel (lac Tchad) afin de lutter contre la sécheresse. Dénommée « TRANSAQUA », ce projet de transfert interbassin a évolué au fil des temps. Sa version récente proposée par la firme CIMA+ en 2011 consiste à dériver l'eau de l'Oubangui vers le lac Tchad via la rivière Chari. Comme de nombreux projets de pompage, ce projet de transfert d'eau inter-bassin (PTEIB) est sujet à de nombreuses controverses qui freinent sa réalisation. Les recueils d'expérience sur les grands travaux de dérivations sus-évoqués ont montré que les opérations de transfert d'eau s'accompagnent toujours des effets négatifs sur l'environnement. On estime que le Colorado est déjà « mort » d'un point de vue écologique [roman, 2018], car le fleuve n'atteint plus son embouchure à cause des détournements pour approvisionner les grandes mégapoles Ouest-Américaines dont le *Los Angeles*. De même, les prélèvements massifs du fleuve Orange en Afrique du sud ont entraîné trois conséquences principales sur le plan environnemental [Blanchon, 2006] : *La première est la transformation des cours d'eau sud-africains en systèmes hybrides : avec la multiplication des transferts, les hydrosystèmes - organismes linéaires - sont devenus des réseaux maillés hybrides, où il est très difficile de distinguer le naturel de l'artificiel.* Il en va de même que les travaux de transfert d'eau se traduisent par des impacts négatifs sur des populations pauvres, dont les moyens de subsistance dépendent du régime hydrologique existants, tandis qu'ils bénéficient à des zones urbaines ou à des acteurs économiques plus puissants [Molle, 2015]

Les projets de transferts d'eau interbassins sont aussi sujets à des enjeux géopolitiques qui limitent leurs possibilités de réalisations. En effet, la plupart des projets de dérivation réussis se font au sein d'un même pays. Il est rare que les transferts s'effectuent entre bassins de pays voisins [Molle, 2015], et ce, même dans les pays développés. Tel est le cas du transfert avorté

du fleuve Rhône entre Lyon (France) et Barcelone (Catalogne, Espagne) en 1995. De nos jours, les projets avortés se font de plus en plus rares dans la mesure où l'eau est désormais attirée vers le pouvoir et non vers l'aval (la mer). Selon Basson (1994, *in Blanchon, 2006*), les systèmes de dérivations sont conçus pour transporter de l'eau de là où elle est abondante vers là où l'on en a besoin ; par conséquent, l'eau coule habituellement vers l'argent \$. Ce qui veut dire qu'au sein d'une région géographique donnée, les ressources en eau sont contrôlées par les Etats qui possèdent suffisamment de pouvoir pour agir vis-à-vis des autres pays riverains. Ainsi qu'en témoigne les cas des puissances exercées par l'Etat Californien dans le sud-ouest des Etats-Unis, de l'Egypte sur le bassin du Nil, de la Chine sur l'Asie du sud-est et probablement du Tchad sur l'Afrique centrale.

Quelles réglementations sur les cours d'eau transfrontaliers, cas du bassin du Congo ?

La question des conflits relatifs aux barrages aménagés sur des cours d'eau internationaux concerne donc un grand nombre de pays, et pourtant, il existe des conventions internationales qui régissent l'exploitation hydraulique des cours d'eau transfrontaliers. La Convention de Barcelone du 20 Octobre 1921 a par exemple autorisé la liberté de la navigation sur tous les cours d'eau internationaux. En outre, l'instrument précurseur qui régit l'exploitation hydraulique des fleuves internationaux est sans contexte la convention de Genève du 9 décembre 1923. Ainsi l'article 2 de la Convention prévoit que « *dans le cas où la mise en valeur rationnelle de forces hydrauliques comporte une étude internationale, il y sera procédé en commun sur la demande de l'un des Etats contractants, afin de rechercher la solution la plus favorable à l'ensemble de leurs intérêts et compte tenu des ouvrages existants, entrepris ou projetés, d'arrêter si possible un programme d'aménagement* » [Colliard, 1996]. Mais les frontières rattachées aux eaux douces (fleuves et lacs) sont essentiellement conventionnelles. Leurs réglementations n'empêchent pas des rivalités internes entre amont-aval et rives gauches-rives droites. La doctrine majoritaire s'accorde aujourd'hui à penser que les rapports entre Etats riverains reposent avant tout sur la règle du bon voisinage. On considère généralement que l'Etat riverain doit utiliser sa partie du cours d'eau de manière à ne pas causer un préjudice important ou sensible au-delà de son territoire [Mubiala, 1995]. Le concept de l'utilisation équitable et raisonnable signifie que chaque Etat riverain a le droit d'utiliser au maximum les eaux arrosant son territoire, ce droit étant toutefois limité par celui des autres Etats riverains d'utiliser également ces mêmes eaux.

A l'échelle du bassin du Congo, il n'existe pratiquement aucun régime juridique et institutionnel général pour régler l'écoulement fluvial entre les neuf Etats membres. Les accords relatifs aux frontières dans le bassin du Congo ont été conclus par cinq puissances coloniales (Allemagne, Belgique, France, Grande-Bretagne et Portugal), en conformité avec les instruments adoptés au congrès de Berlin de 1884-1885 sur le « partage de l'Afrique ». Ces puissances sont impliquées suivant les grandes divisions géographiques du bassin : cours inférieur ou bief maritime (Belgique et Portugal), cours moyen (Belgique et France) et région des Grands Lacs Africains (Belgique, Allemagne et/ou Grande-Bretagne) [Mubiala, 1995]. Le cours moyen du bassin concerne la rivière Oubangui et la partie amont du fleuve Congo. Ainsi, les rives de l'Oubangui sont partagées entre la France (rive droite) et la Belgique (rive gauche). La rivière Oubangui long de plus de 2 200 km, chemine entre trois pays, Le Centrafrique, le Congo-Brazzaville et le Congo-Démocratique. Ces trois pays ont conclu en 1978 un accord pour la création d'une commission tripartite chargée de l'aménagement de cette partie du fleuve. Mais, le Congo-Démocratique (ex Zaïre) n'avait pas ratifié cet accord, et celui-ci n'est donc pas entré en vigueur et n'est pas opérationnel. La France et la Belgique ont conclu plusieurs accords sur les îles de l'Oubangui et du fleuve Congo. L'instruction n° 1993 du 16 février 1943 interdit à tout particulier, quelle que soit sa nationalité, de s'établir dans les îles des fleuves frontières ; elle prévoit également le refoulement immédiat sur le territoire de l'une et l'autre des deux colonies de ceux de leurs ressortissants qui seraient découverts dans ces îles et prescrit la destruction, par les autorités qualifiées de chacune des deux colonies, des installations appartenant à des particuliers qui seraient trouvées dans les îles lors des visites effectuées [Mubiala, 1995]. Mais depuis 1960, tous les Etats membres du bassin du Congo sont devenus des Etats souverains et sont désormais libres de décider de leur politique d'aménagement régional. Ainsi, un accord bilatéral a été conclu en 1986 pour l'exploitation commune des forces hydrauliques de l'Oubangui entre le Congo-Démocratique, ancienne colonie Belge, et le Centrafrique, ancienne colonie Française. Les deux Etats sont convenus d'ériger un barrage au secteur fonctionnel de Mobaye dont ils sont copropriétaires. A Mobaye, l'Oubangui est contigu entre le Congo-Démocratique (rive gauche) et le Centrafrique (rive droite). Le barrage fut aménagé en 1989 mais n'obstrue que partiellement la largeur du chenal de l'Oubangui dans ce secteur fonctionnel.

3- Les impacts des barrages en rivière

Les aménagements hydrauliques notamment les barrages offrent de nombreux avantages à la société moderne en termes d'irrigation des terres agricoles, d'approvisionnement en hydroélectricité et en eau potable, de navigation fluviale etc. Aucun secteur du génie n'a contribué plus au développement de la civilisation que l'art et la science du contrôle des cours d'eau. C'est également l'un des plus anciens : quatre mille ans avant Jésus-Christ, déjà, des ouvrages assez complexes étaient réalisés en Égypte, en Inde et en Chine [Biswas 1975 ; Baxter & al., 1980]. Les avantages des barrages sont si considérables, évidents et vitaux, que pendant très longtemps, on a négligé la possibilité d'effets nuisibles, sauf en cas de désastres dus à leur *rupture*. Il est à remarquer que *les risques de ruptures* des barrages ont fait l'objet de nombreuses critiques au début, mais avec les grandes avancées dans l'ingénierie hydraulique, ceux-ci sont de plus en plus minimisés.

Depuis les récentes préoccupations environnementales formulées lors du premier *sommet de la Terre de Stockholm en 1972*, on note que les principaux *risques* liés à l'établissement d'un barrage sont plutôt des risques d'ordre *écologique* que technique, et cela concernent surtout les grands barrages qui constituent des obstacles à la « *connectivité longitudinale et latérale* » des hydrosystèmes fluviaux. A partir des années 1980, plusieurs techniques sont proposées pour évaluer l'impact écologique des barrages en rivière, entre autres : le calcul du bilan hydrosédimentaire amont-aval d'un barrage, les observations directes sur le terrain, le recours à la modélisation hydrologique, etc. Nombreux auteurs se sont alors penchés sur les études des enjeux environnementaux des barrages en rivière, entre autres : Schumm (1977) ; Petts (1980) ; Shields (1983) ; Galay (1983) ; Williams & Wolman (1984) ; Dussart (1984) ; Chien (1985) ; Xu (1989) ; Church (1989) ; Sherrard (1991) ; Amoros & Petts (1993) ; Kondolf & Mathews (1993) ; Roux & Copp (1993) ; Ben & Erskine (1994) ; Pourriot & Meybeck (1995) ; Webb & Walling (1996) ; Olive & Olley (1997) ; Knighton ; Wasson (1998) ; Parkinson, Petit, Perpinien & Philippart (1999) ; Brandt (2000) ; Malavoi & Bravard (2000) ; Montgomery & Piegay (2003) ; Savy & Touchart (2003) ; Olley & Wallbrink (2004) ; Gilvear (2004) ; Philipps (2005) ; Gurnell (2005) ; Lévêque (2005) ; Assani, Gravel, Buffin-Bélangier & Roy (2005) ; Magilligan & Nislow (2005) ; Degoutte (2006) ; Gordon & Meetenmeyer (2006) ; Blanchon (2008) ; Maleval (2010) ; Yang, Milliman, Li & Xu (2011) ; Bartout (2012) ; Melun (2012) ; Dickson & Carrick & Brown (2012) ; Martins (2008), etc. La plupart des travaux concernent spécifiquement les grands barrages et les recherches les plus

communes portent sur les impacts de ces ouvrages sur les flux hydrosédimentaires, sur la morphologie fluviale, sur le franchissement des poissons migrateurs, sur l'habitat aquatique, sur la qualité physico-chimique de l'eau et sur les communautés riveraines.

3.1- Impacts des barrages sur les flux liquides

Il existe quelques controverses relatives aux effets des barrages sur les débits en rivière. Selon l'opinion couramment admise, les barrages ne modifient pas les débits, en particulier les *débits moyens annuels* (Q_{ma}), puisque toute la quantité d'eau stockée au cours d'une année hydrologique est intégralement lâchée [Anctil & Coulibaly, 2004]. Cependant, d'autres auteurs, à l'instar de Petts (1984), Williams & Wolman (1984), Church (1995), Ibanez & al. (1996), Graf (1999), Brandt (2000b) et Assani & al. (2007), ont montré que les Q_{ma} en aval des barrages peuvent être modifiés qualitativement et quantitativement. Selon Petts (1984), la régulation d'une rivière affecte toute la gamme des débits (ex : Q_{ma} , Q_{max} , Q_{min}), car les barrages représentent le plus fort secteur d'interférence humaine dans les systèmes fluviaux. Williams & Wolman (1984), ont analysé les changements provoqués par un groupe de 29 retenues sur les rivières Nord-Américaines et ont constaté une réduction du Q_{max} (*débit maximum annuel*) variable entre 3 et 91 % ; Sherrard & Erskine (1991) ont pour leur part constaté une réduction de 94 % des Q_{mj} (*débit moyen journalier*) et des Q_{maxJ} (*pics de crue instantanés*) à l'aval du barrage de *Mangrove Creek*. Après la régulation de la rivière *Missouri*, Simon & al. (2002, cité par Martins, 2008), ont constaté une réduction des Q_{max} , un accroissement des Q_{min} (*débit minimum annuel*) et une redistribution saisonnière des Q_{max} , lesquels sont décalés des mois de printemps et été vers les mois d'hiver. Un même constat a été fait au Canada avec Assani & al. (2005), qui ont observé une *inversion du régime hydrologique* du fleuve *Saint-Laurent*, avec des débits mensuels maximums en hiver et des débits mensuels minimums au printemps au moment de la fonte des neiges. Balland (2004, cité par Melun, 2012), parle alors de « *désaisonnalisation* » des régimes hydrologiques pour qualifier l'influence de l'alternance stockage/éclusées et d'éventuelles vidanges des retenues sur les débits extrêmes en aval des barrages. Magalligan & Nislow (2005), ont longtemps étudié les cours d'eau régulés des différentes régions climatiques Nord-Américaines et ont conclu que la modification hydrologique la plus courante des barrages concerne la *fréquence*, *l'amplitude* et *la durée* des débits extrêmes, *minimum* et *maximum* : les pics de crues sont en général écrêtés, alors que les débits d'étiage peuvent être augmentés.

L'altération des gammes de débits Q_{ma} , Q_{max} et Q_{min} après régulation d'une rivière entraîne des variations du **régime hydrologique**, qui est un facteur essentiel à la *dynamique fluviale*, notamment dans le cycle biologique des communautés aquatiques et dans le renouvellement des habitats aquatiques. Le régime hydrologique d'une rivière est en effet *la variation saisonnière du débit* qui se produit selon un cycle de *crue-décrue*. Ce régime dépend de plusieurs facteurs naturels dont le climat et la nature du substrat. C'est ainsi que Pardé (1933) propose de classifier *les régimes fluviaux* en trois grands types: 1) le *régime simple (monomodal)*, 2) le *régime mixte (bimodal)* et 3) le *régime complexe (multimodal)*. Les travaux de Rollet (2007) ont montré que, les variations du régime hydrologique d'une rivière, notamment du *régime de crues* après sa régulation par un barrage participent à la diminution de la connectivité latérale en aval entre le chenal principal et sa plaine alluviale, cela rend inefficace la dissémination des graines végétales en transit dans la rivière. Il ne faut pas oublier non plus que, le régime de crues en rivière joue aussi un rôle essentiel du point de vue de l'entretien du substrat, en évitant l'apparition du phénomène de colmatage. En outre, la connexion du chenal avec le lit majeur lors des crues débordantes permet d'autres part d'ouvrir des refuges pour les jeunes poissons [Harvey & al., 1999].

Les variations du régime hydrologique après régulation peuvent aussi avoir des effets sur les **paramètres physico-chimiques** essentiels à la survie des peuplements aquatiques en aval d'un barrage. Selon les travaux de Gerster & Rey (1994), *la qualité physico-chimique des eaux en aval d'un barrage dépend grandement de celle des eaux qui sont transmises depuis l'amont, même si elle reste globalement meilleure suite à la réoxygénation des eaux au niveau du ressaut*. Petts (1984), Pourriot, Meybeck & Testard (1995), Webb & Walling (1996), Hade (2002), Touchart & Bartout (2011), et Dickson & al. (2012), ont largement étudié l'influence directe et indirecte des barrages sur la qualité physico-chimique des rivières régulées. La **température de l'eau** qui, naturellement joue un rôle aussi important dans la répartition spatiale des espèces aquatiques est, selon Touchart (2001), « *le paramètre physico-chimique dont la perturbation par un lac se propage le plus loin sur un émissaire fluvial* ». Dickson & al. (2012) ont remarqué une hausse significative de la température de l'eau pendant la fin de l'été et le début de l'hiver sur la rivière *Eisboden* ; il en résulte des discontinuités thermiques longitudinales marquées. Webb & Walling (1996) ont analysé les effets thermiques à long terme d'un barrage sur la rivière *Haddéo* en *Royaume-Uni* : il en découle une augmentation de la température moyenne de l'eau entraînant l'élimination des conditions de congélation et la

réduction des valeurs maximales estivales et des fluctuations diurnes. Savy & Touchart (2003), ont également analysé l'influence thermique du barrage de *Lavaud* sur le fleuve *Charente* et ont constaté en aval, une perturbation du cycle thermique de la rivière sur les vingt premiers kilomètres. Tout d'abord, l'augmentation cumulée de la hauteur d'eau et du temps de séjour provoquée par l'ouvrage est à l'origine d'une modification du régime thermique des cours d'eau, qui se traduit de deux façons en relation avec la hauteur de l'ouvrage : 1) *si la retenue n'a qu'une faible profondeur (7 à 15 m au maximum), sa température globale augmente de manière relativement homogène et 2) si la retenue d'eau est plus épaisse, une stratification de la masse d'eau se met alors en place. Cette stratification est particulièrement prononcée en saison chaude, lorsque les eaux de surface sont rapidement réchauffées alors que les eaux profondes restent froides* [Bravard et Petts, 1993]. Si les eaux restituées en aval d'un ouvrage proviennent du fond de la retenue, on peut assister à une véritable inversion du régime thermique, caractérisée par des eaux plus froides en période estivale et plus chaude en période hivernale.

La modification thermique des écoulements en aval des restitutions se traduit donc généralement par une réduction de la densité des espèces sténothermes, qu'elles soient anadromes (saumon atlantique) ou potamodromes (truite commune, blageon) au profit des espèces moins sensibles aux variations de température [Melun, 2012]. Les chercheurs ont admis que la perturbation thermique en aval d'un barrage dépend du mode de gestion de chaque barrage ou du système de restitution des débits utilisés. Par exemple, un ouvrage déversant restituera une partie de la tranche supérieure de la retenue (*restitution épilimnionne*) différemment d'une vanne de fond (*restitution hypolimnionne*). Dans le premier cas, on note généralement un réchauffement estival des eaux entre l'amont et l'aval d'un ouvrage [...] Inversement, dans le cas d'une restitution hypolimnionne, les eaux restituées en aval sont plus chaudes que la normale en hiver alors qu'en été, leur température est nettement plus fraîche [Melun, 2012]. Leroy & al. (2002) caractérisent cette altération du régime thermique par l'expression « *summer cool, winter warm* » (*été frais, hiver chaud*) [Melun, 2012]. Webb & Walling (1997) pensent que l'importance des effets de ces facteurs thermiques dépend essentiellement des conditions climatiques, de l'utilisation ou non d'équipements de « *déstratification* » et de la rapidité des vidanges des réservoirs.

3.2- *Impacts des barrages sur les flux solides*

Les flux de sédiments peuvent aussi être affectés par la régulation d'un cours d'eau. En formant un réservoir d'eau en amont, un barrage est susceptible par sa présence de constituer une *rupture dans le transit sédimentaire* d'un tronçon fluvial. En fonction de la taille et du type du réservoir, de grandes quantités de sédiments seront plus ou moins piégées, ce qui pourrait réduire le flux total de sédiments à l'exutoire d'un bassin. Phillips & al. (2005) ont montré que « *si les barrages ne sont pas équipés de rampes à sédiments, ils interrompent partiellement ou, dans la plupart des cas, totalement le transfert de cette charge vers l'aval et coupent les connexions entre les cours aval et leur bassin versant* ». Dussart (1966) a ainsi montré que, « *dans les lacs à bilan hydrologique négatif ou nul, la totalité des apports reste dans la cuvette et contribue à son comblement* ». Même constatation chez Maleval (2010), qui affirme que, « *les retenues aménagées sur le cours d'une rivière fonctionnent comme un réceptacle pour l'eau et les produits solides et dissous, provenant d'une part de l'érosion du bassin versant, d'autre part de l'érosion des marges [...] ; toutes les matières qui ne sont pas évacuées se répartissent et s'accumulent dans la cuvette* ». Verstraeten & Poesen (2000) ont souligné que, « *le taux d'accumulation dépend de la granulométrie des sédiments transportés entrant dans la retenue et du temps de séjour de l'eau, lui-même dépendant des caractéristiques de l'écoulement et de la géométrie du chenal* ». Pour les exploitants des barrages, les conséquences du piégeage sédimentaire sont de nature à remettre en cause le caractère durable de l'hydroélectricité. Degoutte (2006) a ainsi montré que c'est le changement du faciès d'écoulement lotique en lentique qui est à l'origine de la décantation des matériaux transportés par le cours d'eau. Un tri granulométrique s'opère alors avec dépôt des éléments les plus grossiers à l'entrée de la retenue, les éléments plus fins se déposent plus à l'aval. Les végétaux et animaux créent de la matière organique qui sédimente également, le tout formant une vase plus ou moins riche en matière organique qui se consolide rapidement.

Du point de vue énergétique, la sédimentation lacustre pose également un véritable problème de gestion des infrastructures hydroélectriques ; elle contribue en effet à diminuer les capacités de stockage d'eau et donc à rendre les structures moins performantes. Un exemple de forte sédimentation a pu être observé au centre de la Belgique, où de petites infrastructures, dont le but était de retarder les crues, avaient totalement perdu leur capacité de rétention trois ans seulement après leur construction [Verstraeten & Poesen, 1999]. Ce mécanisme de rétention des sédiments par une retenue est qualifié « *d'effet de trappe* ». Deux méthodes

empiriques permettent d'estimer le taux de décantation dans un réservoir : il y a d'abord *la méthode de Brune* (1953), basée sur le rapport entre la capacité du réservoir et les apports sédimentaires (*fig. 18*), et ensuite *l'indice de sédimentation* de Churchill (1948), qui s'obtient par le rapport entre la période de rétention à la vitesse moyenne de l'écoulement dans le réservoir. Généralement, les grands barrages aménagés en rivière ont une efficacité de piégeage par rapport aux petits barrages. Brune (1953), dans ses bilans sédimentaires, estime que, les petits barrages présentent un taux de piégeage variable entre 10% et 90 % de la charge sédimentaire entrant, tandis que les grands présentent un taux variable entre 50 et 100%. Selon Brandt (2000b), les effets d'une petite retenue isolée peuvent être peu marqués sur le transport sédimentaire, par contre, la présence d'ouvrages successifs de petite taille peut apporter des effets significatifs sur le cours d'eau, pouvant même dépasser les effets d'une grande retenue.

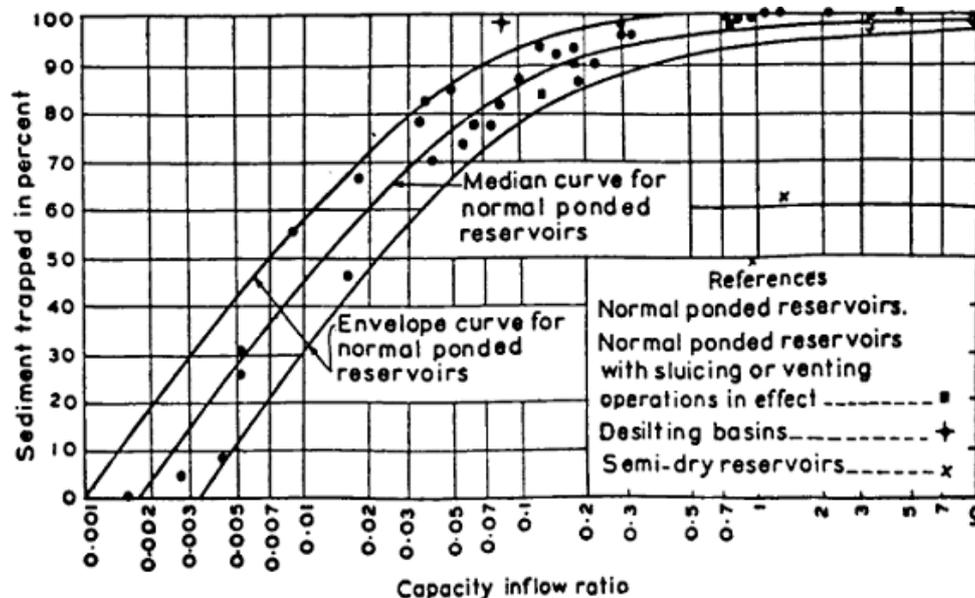


Fig. 18 – Taux de décantation d'une retenue par Brune (1953)
Fig. 18 – Trap Efficiency Curve by Brune (1953)

3.3- Les impacts des barrages sur le franchissement des poissons migrateurs et sur la dissémination des graines végétales

Il est à relever que l'un des effets écologiques des barrages en rivière concerne la rupture de la continuité biologique, notamment l'obstacle au franchissement des poissons migrateurs. Pattee (1988, *in* Lévêque, 2005), a analysé l'impact du barrage hydroélectrique de *Donzère-Mondragon* construit en 1952 sur le *Bas-Rhône* et a montré que l'ouvrage a barré d'emblée

l'accès à 75% du bassin pour la migration des *aloses*. Pour sa part, Croze (2008) a signalé des taux de blocage de plus de 95% *des saumons anadromes* par une succession de barrages sur l'*Aulne* et la *Garonne* ainsi que des retards de 66 à 95 jours dans leur migration. Certains barrages empêchent également la dissémination des graines végétales et des pollens sur les dimensions longitudinales et transversales des rivières régulées. Vannote & al. (1980) a ainsi démontré que, « le principal impact des ouvrages établis en travers des cours est de cloisonner le milieu, limitant de manière significative la circulation et la dissémination des espèces faunistiques (rupture des chaînes de migration) et floristiques, du fait de leur caractère plus ou moins infranchissable ». Brown & Chenoweth (2008), mettent en évidence une réduction de 90% de l'abondance des graines et 84% de réduction de la richesse spécifique en aval du barrage de *Glines* (USA). La rupture de la connectivité longitudinale peut aussi entraîner, selon Petts (1984), la réduction de la turbidité de l'eau ; cela aura des effets sur la production de plancton, sur le processus de la photosynthèse des algues et sur le développement des populations d'invertébrés et de poissons.

3.4- Les impacts sociétaux des barrages

Les barrages, surtout les grands, apportent plusieurs types de changements à l'environnement, en ce qui concerne les modifications du paysage, les déplacements de population, ou encore les modifications de la dynamique fluviale [Martins, 2008]. Sur un échantillon de 1 000 barrages analysés dans 79 pays, la *WCD* (*World Commission on Dam*) a conclu que « si les barrages ont apporté une contribution importante au développement humain, dans de nombreux cas, un prix inacceptable et souvent inutile a été payé pour garantir ces avantages, notamment en termes sociaux et environnementaux, par des personnes déplacées par communautés en aval, par les contribuables et par l'environnement naturel. Par exemple, les barrages ont déplacé physiquement 40 à 80 millions de personnes dans le monde et la plupart de ces personnes n'ont jamais retrouvé leurs anciens moyens de subsistance. Dans de nombreux cas, les barrages ont entraîné une perte importante et irréversible d'espèces et d'écosystèmes, et les efforts visant à atténuer ces impacts n'ont souvent pas réussi ». Après cette étude, la *WCD* recommande alors pour tout projet de barrages : une évaluation équilibrée et complète de toutes les options qui devraient être menées, ce qui donne aux aspects sociaux et environnementaux la même importance que les facteurs techniques,

économiques et financiers. Le projet devrait permettre aux personnes touchées d'améliorer leurs moyens de subsistance et de s'assurer qu'ils reçoivent la part prioritaire des avantages du projet (au-delà de la compensation pour leurs pertes). Les personnes touchées comprennent généralement les communautés vivant en amont-aval des ouvrages et les personnes affectées par des infrastructures liées aux barrages telles que les lignes de transmission et les canaux d'irrigation. La construction du très controversé barrage des *Trois-Gorges* dans la province Centrale de Chine a entraîné de nombreux déplacements des autochtones. Le nombre des déplacés a largement dépassé le nombre prévu [Savoie, 2003].

Conclusion du premier chapitre

*Dans ce premier chapitre nous avons présenté le « Cadre thématique » de la thèse. Premièrement, nous avons présenté les « bases conceptuelles en hydrologie fluviale ». Ainsi, nous avons montré que le **débit** est une notion chère aux hydrologues. Il est la variable clé qui contrôle l'écoulement fluvial. Sa variation saisonnière détermine le **régime hydrologique** d'une rivière à une station donnée. Ce régime est en effet indispensable à la **dynamique fluviale** et à la **subsistance des riverains dont l'économie est tributaire des conditions climatiques**. En contexte d'écoulement naturel, le débit fluvial n'est pas constant dans l'espace-temps. Il fluctue sous l'effet des **perturbations externes** (ex : climatiques, géologiques et anthropiques). Mais les rivières ajustent toujours leurs morphologies afin d'équilibrer leurs capacités de transport solide en adéquation avec leurs charges sédimentaires. **L'ajustement fluvial** aux perturbations externes peut être lent ou rapide, mais celui-ci ne se fait rarement de manière immédiate. Il dépend généralement du degré de perturbation. Il existe toujours un **temps de relaxation** pour que les rivières s'ajustent aux perturbations. Les principales variables d'ajustement fluvial sont la largeur, la profondeur et la granulométrie du chenal.*

*Dans un second temps, nous avons établi un « état de l'art » des études d'impact des barrages en rivières. Ce travail a permis de distinguer deux types d'ouvrages transversaux en rivière, à savoir : **les seuils** et **les barrages**. Les besoins d'irrigation et de production hydroélectrique sont les principales motivations pour l'aménagement de ces ouvrages. Certains barrages sont aménagés sur des cours d'eau « contigus », cela suscite des querelles incessantes de voisinages. Par ailleurs, nous avons synthétisé les **impacts physiques** des barrages en rivière en trois grands types. Le premier concerne l'impact des barrages sur les*

flux liquides (débit). Le deuxième concerne l'impact des barrages sur les flux sédimentaires. Le troisième concerne l'impact des barrages sur le franchissement des espèces migratrices et sur la dissémination des graines végétales. Sur le plan social, l'impact des barrages concerne globalement la difficile reconversion des populations expropriées de leurs terres résidentielles et agricoles.

Dans le chapitre suivant, nous allons faire une petite monographie du bassin de l'Oubangui en faisant recours à quelques notions conceptuelles de la dynamique fluviale décrites précédemment. Ce prochain chapitre est l'occasion de caractériser le bassin de l'Oubangui afin de mieux appréhender sa dynamique hydrologique dans l'espace et temps.

Chapitre 2 – Cadre Physique du bassin de l'Oubangui

Dans ce chapitre, nous allons caractériser le bassin de l'Oubangui. Ainsi, seront présentés successivement les contextes géographique, géomorphologique, géologique et hydroclimatique dudit bassin. Ceux-ci permettront de mieux comprendre les facteurs naturels influençant l'écoulement sur le bassin.

*Le bassin de l'Oubangui a été de fait, l'un des bassins tropicaux les mieux étudiés au cours du 19^{ème} et 20^{ème} siècle par des chercheurs internationaux dont ceux de l'IRD. Mais la fin du 20^{ème} siècle a été marquée par l'arrêt des observations scientifiques sur l'Oubangui du fait des instabilités politico-sociales récurrentes qui ont conduit à la fin des missions de l'IRD en Centrafrique. Afin de mieux caractériser notre zone d'intérêt, nous avons procédé à un **diagnostic hydrologique** en vue de collecter quelques données ponctuelles qui viendront en complément aux données archivées. Des **relevés topo-bathymétriques**, des **échantillonnages sédimentologiques** du lit de l'Oubangui et des **enquêtes** ont été réalisés lors du diagnostic. Des **indices hydrologiques** ont été appliqués sur les données collectées, notamment sur les chroniques de débits en vue d'analyser la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui.*



A- Contexte Géographique

La jonction de deux cours d'eau à savoir le *Mbomou* et l'*Uélé* a donné naissance à la rivière *Oubangui*, principal affluent septentrional du fleuve *Congo* (fig. 19a). L'*Oubangui* est en effet une rivière transfrontalière entre le *Centrafrique* (ancienne colonie Française), le *Congo-Brazzaville* (ancienne colonie Française) et le *Congo-Démocratique* (ancienne colonie Belge). La source de l'*Oubangui* a été longtemps au centre d'une rivalité coloniale *Franco-Belge* lors du « *partage de l'Afrique* ». Ce n'est qu'en 1892 que *Liotard* (envoyé Français) a démontré sur bases de comparaisons des débits que, l'*Uélé* (fig. 19b) est bien la branche-mère de l'*Oubangui* [Boulvert, 1987]. Ainsi, l'*Oubangui* depuis l'*Uélé* est long de plus de 2 200 km jusqu'à son embouchure avec le fleuve *Congo* [Boulvert, 1987]. Il draine en effet une aire quasi-forestière de 643 900 km², soit le un-cinquième du bassin du *Congo* (3,7. 10⁵ km²).

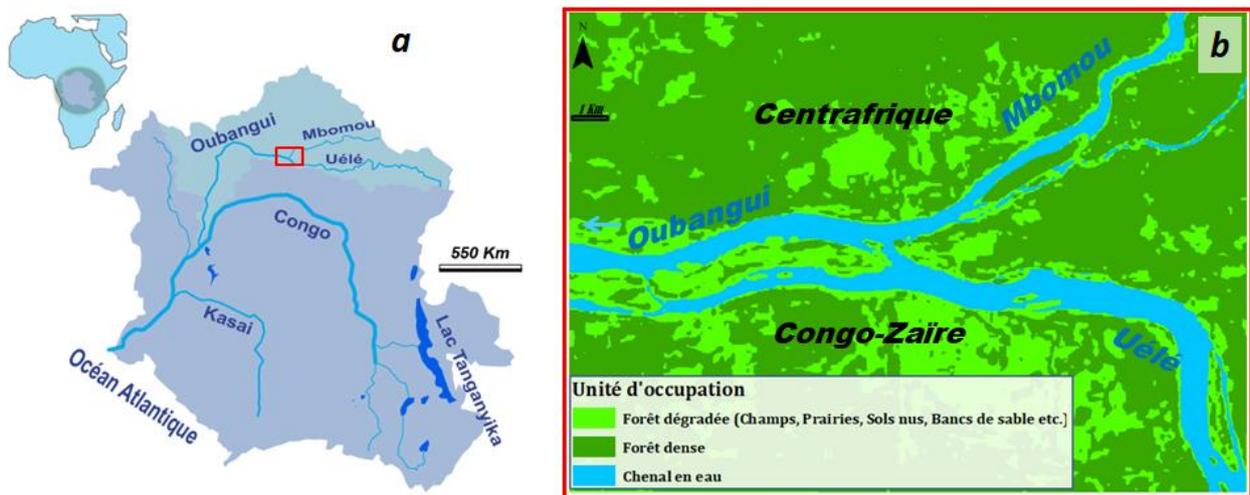


Fig. 19 – Bassin d'étude : a) Le Bassin du Congo-Oubangui ; b) Confluence Uélé-Mbomou, début de l'Oubangui (Image Satellite Sentinel).

Fig. 19 – Study area: a) The Congo-Ubangi basin; b) Uele-Mbomou confluence, beginning of Ubangui (Satellite Sentinel image).

Hétérogénéité spatiale sur l'Oubangui

Le cours longitudinal de l'Oubangui est subdivisé en trois (3) grands tronçons suivant les caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques homogènes (altitude, pente, sinuosité, style fluvial, morphologie...). Ainsi, nous avons le *haut-Oubangui*, le *moyen-Oubangui* et le *bas-Oubangui* [Callède & al., 2010] (fig. 20).

- ✓ ***Le haut-Oubangui*** est représenté par la rivière *Uélé*, de sa source jusqu'à la confluence avec le *Mbomou* dans la localité de *Yakoma*. Sur ce tronçon, l'Oubangui est confiné dans une gorge péri-forestière de moyenne altitude.

- ✓ *Le moyen-Oubangui* commence au confluent de l'Uélé-Mbomou pour finir au confluent Oubangui-Lobaye dans la localité de Zinga ; il s'agit de *l'Oubangui des Rapides*, car l'un de ces prestigieux rapides a donné naissance en 1889 à la ville de *Bangui*, capitale de *Centrafrique*, et c'est à cet endroit que l'Oubangui change complètement sa direction d'Est-Ouest pour s'infléchir vers le sud afin de rentrer dans la cuvette Congolaise (fig. 20). Le changement brutal de direction de l'Oubangui vers le sud fait ressortir plusieurs hypothèses dont celle de *Borgniez* (1935 ; in Boulvert, 1987), qui pense que le réseau hydrographique de l'Oubangui a complètement changé à la suite d'une surrection tectonique. Pour cet auteur, l'Oubangui coulait vers le nord pour alimenter la rivière *Chari* avant de bifurquer de nos jours vers le sud pour alimenter le fleuve *Congo*.
- ✓ *Le bas-Oubangui* commence à Zinga jusqu'à son entrée dans la cuvette Congolaise près du *Lac Toumba*, c'est *l'Oubangui des îles*. Sur ce tronçon de faible altitude (<350 m), la rivière présente de multiples chenaux enserrant des bancs de sables et des îles végétalisées.

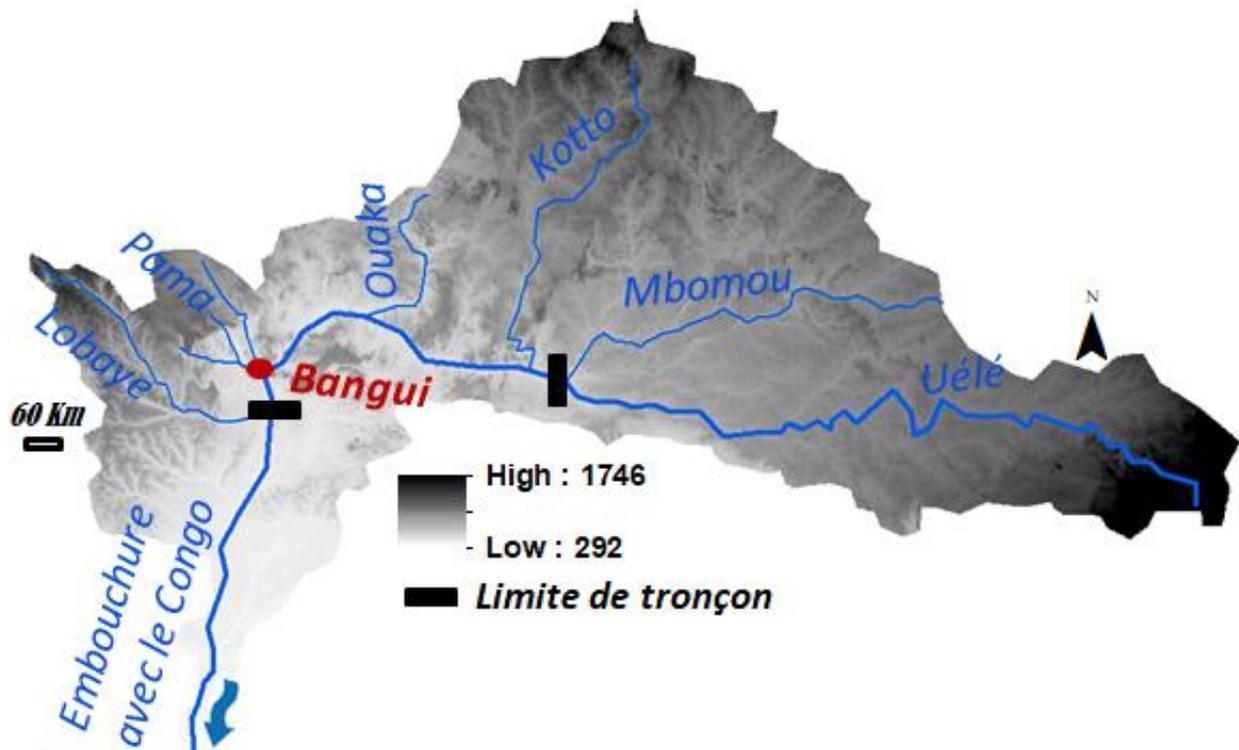


Fig. 20 – Sectorisation du bassin de l'Oubangui. [Callède & al. (2010), adapté]
 Fig. 20 – Sectorization of the Ubangui Basin [Callède & al. (2010), adapted]

B- Contexte Géomorphologique

Variations longitudinales de la largeur de l'Oubangui

Tout le linéaire de l'Oubangui est encombré d'îles et de rapides (fig. 21). Les îles, appelées localement les « *Zoa* », diffluent l'écoulement tout en élargissant la vallée, et les rapides, appelés localement les « *Sorro* », resserrent la vallée et offrent des sites remarquables aux aménagements hydroélectriques, dont les plus représentatifs sont : *les rapides de Satema, de Mobaye, de Palambo, de Bangui et de Zinga*. Bien plus des rapides, nous avons de nombreuses « *chutes d'eau* » sur le bassin de l'Oubangui. Les plus célèbres d'entre elles sont les chutes de *Kémbé* sur la rivière *Kotto* et les chutes de *Boali* sur la rivière *Mbali*. Ces chutes et rapides ont la particularité de complexifier la navigation fluviale sur le réseau.

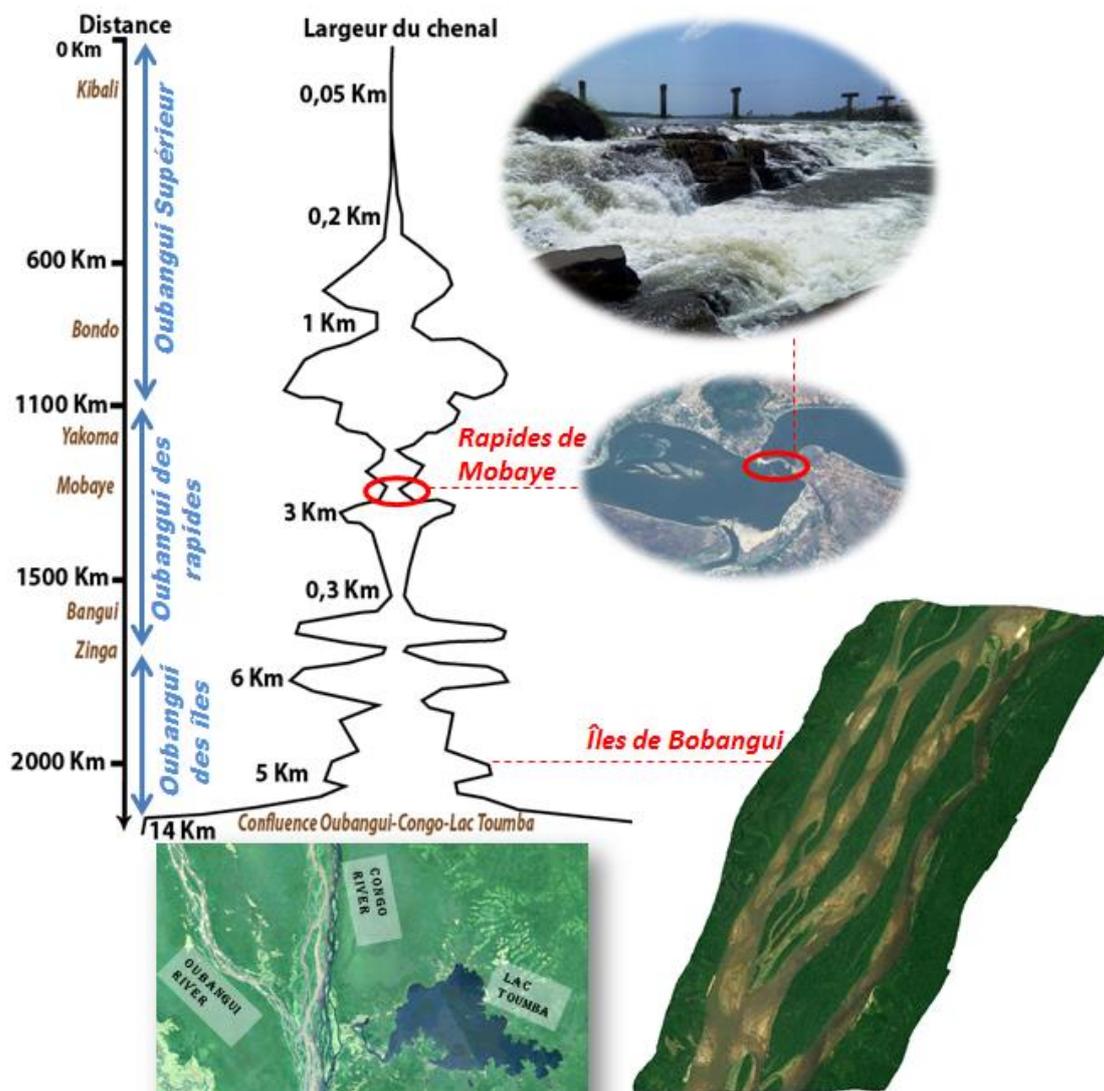


Fig. 21 – Gradient longitudinal de la vallée de l'Oubangui
Fig. 21 – Longitudinal gradient of the Ubangui valley

Le profil en travers de l'Oubangui

La réalisation d'un *profil en travers* permet d'apprécier le degré de liberté latéral d'un chenal et son ajustement vertical (profondeur). Plusieurs facteurs peuvent influencer *l'allure* d'un *profil transversal*, entre autres la présence d'un barrage en amont. Muni d'un **GPS Trimble** et d'un **Echosondeur hummingrid FF570**, nous avons réalisé quelques profils transversaux sur la rivière Oubangui dans les localités de **Mobaye** au Pk 1250 (*fig. 22*) et de **Bangui** au Pk 1600 (*fig. 23*). Ces profils ont été réalisés suivant un protocole bien défini (*annexe 1*). Les sections profilées sont celles situées en aval immédiat des *rapides*.

A **Mobaye**, le profil présente une allure discontinue, marqué par l'alternance des *creux* et des *bosses*. Les creux matérialisent le lit d'écoulement (*talweg*), tandis que les bosses, matérialisent les barres sédimentaires qui sont omniprésentes dans le paysage fluvial de l'Oubangui.

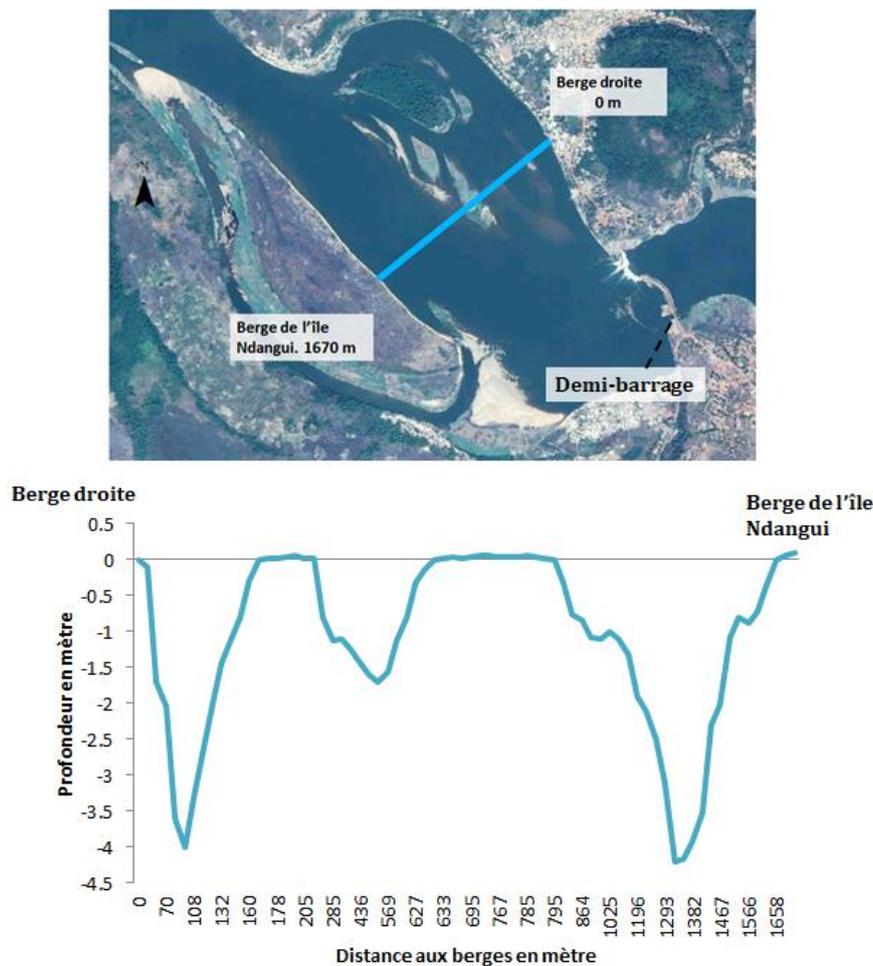


Fig. 22 – Profil en travers de l'Oubangui à Mobaye (aval des rapides de Mobaye)
Fig. 22 – Cross-section of the Ubangui in Mobaye (downstream of the Mobaye rapids)

A Bangui, le profil présente une allure dissymétrique du fait des conditions géomorphologiques locales du chenal. Nous remarquons par ailleurs que, la rive gauche (côté Congolais) est plus profonde que la rive droite (côté Centrafricain). Ceci pourrait s'expliquer par la présence des hauts-fonds rocheux qui obstruent l'écoulement vers la rive droite.

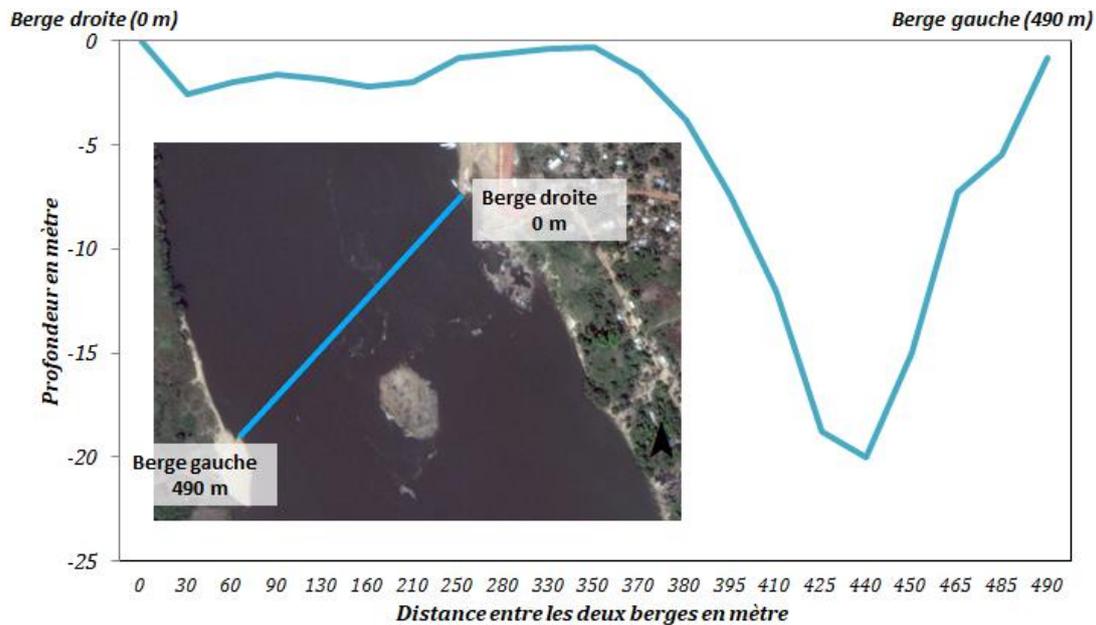


Fig. 23 - Profil en travers de l'Oubangui à Bangui (aval des rapides de Ouango)
 Fig. 23 – Transverse profile of the Ubangui in Bangui (downstream from the Ouango Rapids)

Le profil en long de l'Oubangui

Un profil en long permet de caractériser le talweg ou la pente d'écoulement d'un chenal [Bravard & Petit, 2000]. Les formes actuelles des profils longitudinaux des cours d'eau renseignent sur l'évolution morphodynamique qu'ils ont connue [Duvall & al., 2004 ; Bishop, 2007 ; Goldrick & Bishop, 2007 ; Larue, 2014]. Le profil tend à adopter la forme concave vers le haut la plus apte à permettre le transport de la charge solide et l'incision du lit fluvial [Hack, 1957 ; Larue, 2014]. On parle alors de « *profil d'équilibre* » en rivière lorsqu'il existe un équilibre entre la puissance fluviale, la charge sédimentaire imposée, la pente et la lithologie [Lévêque, 2016]. Mais en contexte d'écoulement naturel, le profil d'équilibre n'est jamais atteint en raison de l'ajustement permanent des rivières aux fluctuations hydrosédimentaires d'origine climatique, géologique ou anthropique. Les géomorphologues utilisent de plus en plus le concept « *d'équilibre dynamique* » pour qualifier cet ajustement permanent du chenal aux oscillations des flux liquides et solides. De nombreux Indices de

Concavité (*IC*) sont proposés pour apprécier l'allure d'un profil en long, dont *l'indice de Langbein* qui est formulé de la sorte : $IC = 2A/H$, où *A* représente la différence d'altitude entre le profil à mi-parcours et une ligne droite joignant les deux extrémités du profil, et *H*, la dénivellation entre la source et l'exutoire du drain [Larue, 2014]. Selon Langbein (1964), le profil tend à être *rectiligne* quand la valeur de *l'indice* est proche de **0** et il devient très *concave* quand la valeur est voisine de **1**. L'application de cet *indice* sur le profil en long de l'Oubangui (*fig. 24*) a permis d'obtenir une valeur de **0,8**. Nous sommes enclin à penser que, la valeur obtenue sur l'Oubangui ne reflète plus ou moins la réalité, car le inéaire de l'Oubangui présente quelques de ruptures de pentes (*Knickzones*) dues à la prédominance des chutes et rapides et même d'un barrage qui pourraient influencer probablement l'allure du profil. Cette incertitude est due au fait que nous avons utilisé un profil en long qui date des années 1980 dont la réalisation a été faite avec des moyens limités. Nous sommes persuadés de fait que, l'apport récent des SIG à l'hydrologie est d'un grand intérêt à la réalisation de nouveaux profils fluviaux sur l'Oubangui avec une certaine précision.

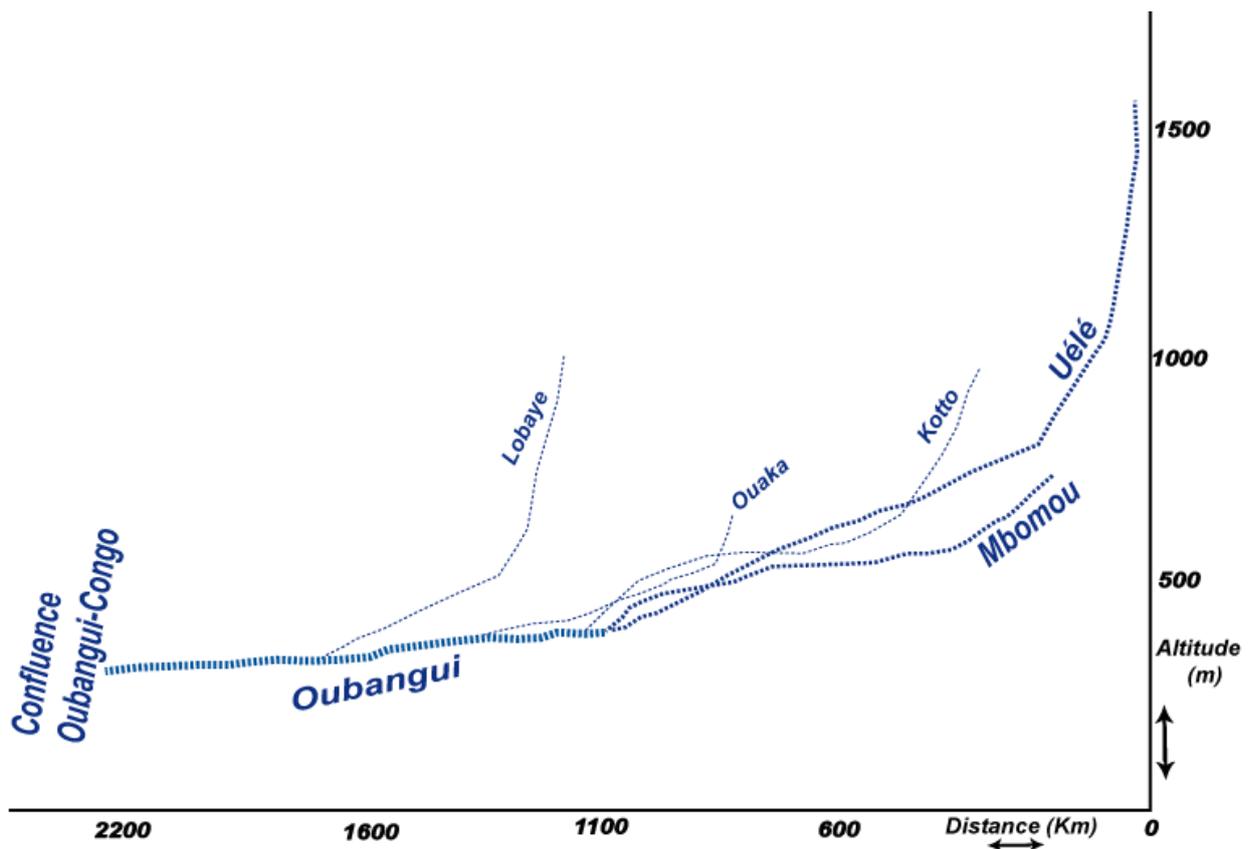


Fig. 24 – Profil en long de l'Oubangui de la source (Uélé) à la confluence avec le fleuve Congo [Boulvert, 1987 ; Callède & al (2010), adapté par Nzango. C].

Fig. 24 – Oubangui's long profile of the source (Uélé) at the confluence with the Congo river [Boulvert, 1987; Callède & al (2010), adapted by Nzango. C].

Le style fluvial de l'Oubangui

Le style fluvial (*channel pattern*) d'un cours d'eau correspond à l'ajustement progressif des formes d'écoulement suivant la variation longitudinale des conditions d'écoulement. Il est généralement la forme résultante des interactions entre *l'hydrologie, la lithologie et la tectonique*. De nombreux modèles de styles fluviaux ont été proposés par des géomorphologues depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle (*Ref. chapitre 1-A-2*), mais tous ces modèles ne sont que des schémas théoriques car il n'existe à ce jour aucun modèle de style fluvial calibré pour chaque type de cours d'eau.

Le linéaire fluvial de l'Oubangui présente une diversité de styles fluviaux. D'amont en aval, on distingue (*fig. 25 ; tab. 1*): le style *méandrique* qui domine les 700 premiers kilomètres, où le lit présente un chenal unique, sinueux, et confiné dans une gorge péri-forestière (*ex : méandre de Kibali*). Puis vient un style *divagant* (*anabranché*) entre 700 et 1 100 km, où la rivière divague en plusieurs bras dans une forêt galerie. Le tracé devient ensuite *rectiligne* et moins sinueux entre 1 100 et 1 600 km avant de redevenir *divagant* (*anastomosé*) à partir de Pk 1 700 jusqu'à la confluence avec le fleuve Congo.

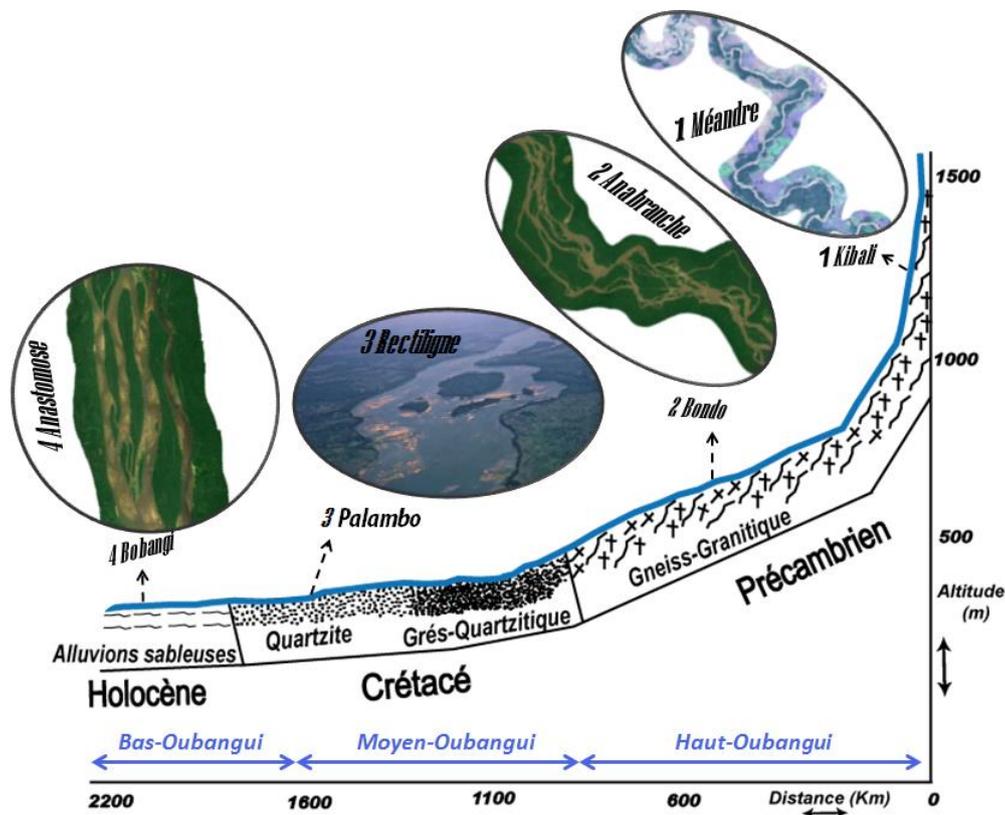


Fig. 25 – Profil en long, Style fluvial et Lithologie de l'Oubangui
Fig. 25 – Long Profile, Channel pattern and Lithology of the Ubangui

Tableau 1 – Classification des styles fluviaux de l’Oubangui*Table 1 – Classification of Ubangui River Styles*

Styles fluviaux	Sinuosité	Végétation	Macro formes	Type de lits	Largeur
1) Méandre Confiné	Forte	Savane péri-forestière			Chenal étroit
2) Anabranché	Moyen	Forêt dense	Iles moyennes	Rapides	Large et Etroit
3) Rectiligne/ Tressage	Faible	Forêt dense	Bancs alternés + îles moyennes	Rapides + chutes	Large et Etroit
4) Anastomose	Moyen	Forêt dense	Bancs alternés + grandes îles	Rapides	Large et Etroit

Capacité de transport sédimentaire de l’Oubangui

L’une des fonctions principales des rivières est d’assurer le transfert des sédiments vers l’aval [Recking & al., 2013]. Pour ce faire, elles doivent disposer d’une certaine compétence nécessaire pour éroder leur lit et leur berge et de véhiculer des matériaux solides vers l’aval. Les mesures en *transport solide* concernent généralement les mesures de transports des *matières en suspension*, en *solution* et du *charriage de fond*. De ces trois *modes de transport*, le charriage de fond est le mode le plus difficile à quantifier, il constitue sans doute pour les hydrologues, la branche la plus difficile de l’hydrologie de surface. De nombreux efforts ont été déployés ces dernières décennies pour améliorer la quantification des flux solides en rivière. Rares sont les cours d’eau qui disposent des données « *continues* » sur les flux solides ; on procède généralement à des mesures ponctuelles en fonction des besoins.

Sur l’Oubangui, les premiers échantillonnages ont été faits entre 1987-1992 lors des missions PEGI-GBF (*Programme d’Etude de l’Environnement de la Géosphère Intertropicale* du volet *Grands Bassins Fluviaux*). Plusieurs hydrologues de l’IRD avaient pris part à cette mission dont Callède, Olivry, Censier, Orange, Bricquet & Thiebaut. On retient principalement deux sites pour cette mission, à savoir les sites de *Yakoma* (Pk 1100) et de *Bangui* (Pk 1600). Les deux sites ont fait uniquement l’objet de mesures en MES (*Matières En Suspension*) et en MD (*Matières dissoutes*). L’échantillonnage a été fait sur un « *pas de temps* » hebdomadaire et mensuel. Les résultats d’analyses se présentent comme suit (*photo 1*) :

- ✓ À *Yakoma*, pour un module interannuel de 1090 m³/s en 1990, l’Oubangui exporte 67% de MD contre 33% de MES sur l’ensemble de ses flux particuliers.
- ✓ À *Bangui*, pour un module interannuel moyen de 2675 m³/s entre 1987-1992, l’Oubangui exporte 58% de MD contre 42% de MES sur l’ensemble de ses flux particuliers exportés.

Que ce soit à *Yakoma* ou à *Bangui*, le transport des *MD* prédomine sur le transport des *MES*. Il s'agit d'un schéma classique qu'on retrouve pratiquement sur tous les cours d'eau tropicaux drainant un massif forestier. Laraque & al. (2009) ont par exemple montré que le fleuve Congo, puissant par son module annuel ($41\,000\text{ m}^3/\text{s}$), n'exporte que 34% de *MES* vers l'océan Atlantique contre 66% de *MD*. Ces auteurs ont montré que, la prédominance du transport des *MD* sur ces rivières résulte de l'action de l'érosion biogéochimique, tandis que le faible apport en *MES* est dû à l'efficacité du couvert végétal contre l'érosion mécanique. Il convient de signaler aussi que sur l'ensemble des *MD* exportées par l'Oubangui vers le Congo, 89% correspondent aux *MOD* (*Matières Organiques Dissoutes*) et 11% aux *TDS* (*Matières Minérales Dissoutes*).

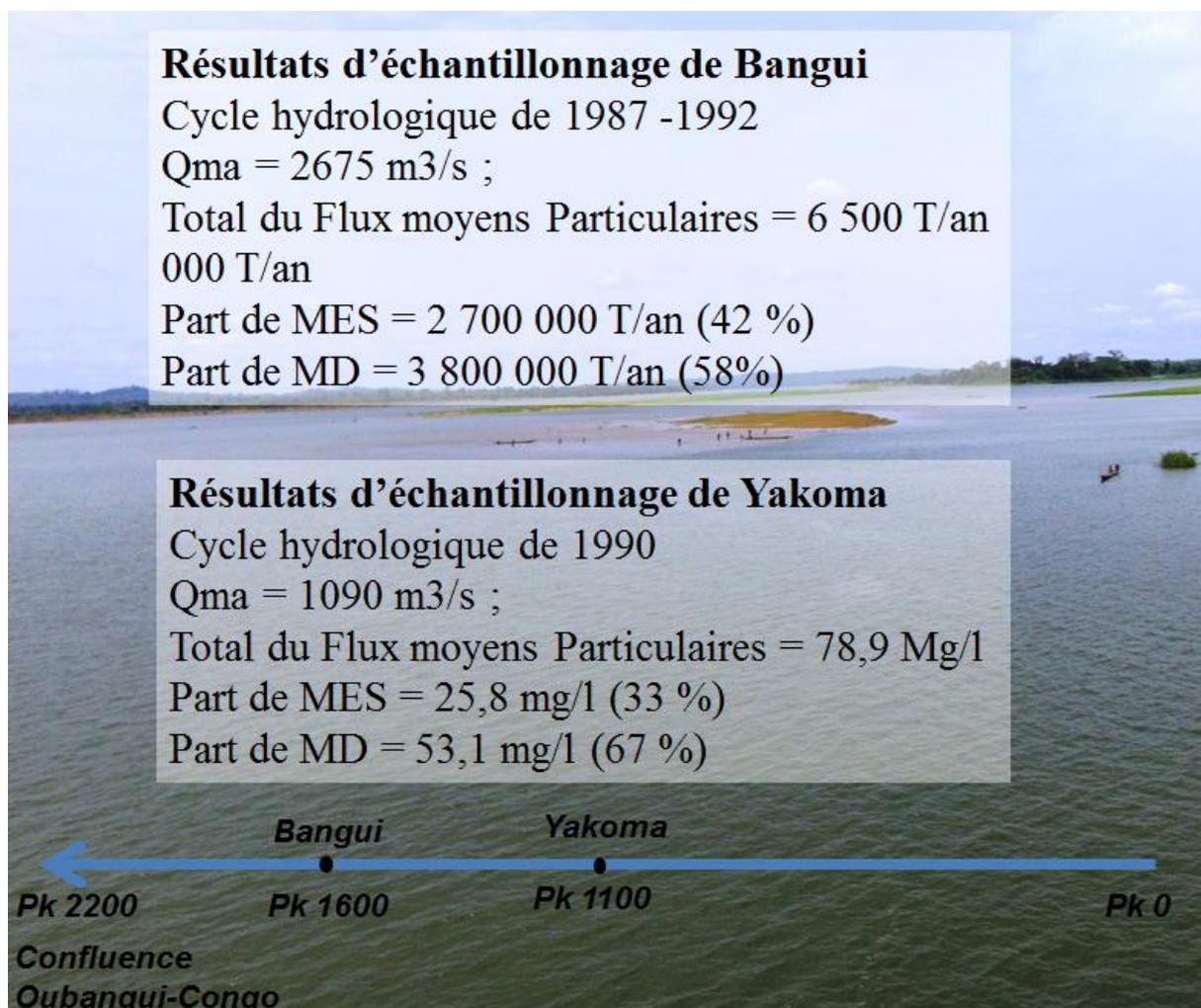


Photo 1 – Résultats d’analyses des flux particulaires exportés par l’Oubangui à Yakoma (Pk 1100) et à Bangui (Pk 1600)

Photo 1 – Results of analyzes of the particulate fluxes exported by the Ubangui in Yakoma (Pk 1100) and Bangui (Pk 1600)

Les analyses effectuées sur les six années ont permis de conclure que, l'Oubangui dispose d'un fonctionnement hydrosédimentaire similaire aux autres rivières du domaine tropical humide, avec très peu de variations interannuelles dans la concentration des matières particulaires. Les périodes de *crues* correspondent globalement aux phases de fortes concentrations particulaires, tandis que les périodes de *décrues* correspondent aux phases d'*alluvionnement*. En 2016, nous avons échantillonné les flux de MES de la rivière Oubangui à l'endroit de Bangui. Les échantillons ont été prélevés dans des flacons et conservés au frais dans une glacière avant d'être analysés au LHL (*laboratoire Hydrosociences Lavoisier*) de Bangui (Centrafrique). Les résultats obtenus après analyses, rejoignent les conclusions obtenues par ces auteurs. Les analyses ont permis de montrer que l'Oubangui concentre en moyenne 36 mg/l de MES en période de hautes eaux et 6 mg/l lors des basses eaux.

Le charriage de fond n'étant pas quantifié lors de la mission PEGI-GBF de 1987-1992 à cause des difficultés d'ordre méthodologique. Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé quelques échantillonnages sédimentologiques afin d'estimer la capacité de charriage de l'Oubangui à travers une *analyse granulométrique* (AG). Les échantillonnages ont porté sur les sédiments du *fond du chenal* (charge de fond) et sur les sédiments des *bancs alluviaux* selon le protocole défini par l'AFNOR (*annexe 2*). Deux sites ont été sujets aux échantillonnages, à savoir le site de Mobaye (Pk 1 250) et le site de Bangui (Pk 1 600). À ce niveau de travail, nous estimons qu'il est utile de ne présenter que les résultats d'analyses effectuées sur le site de Bangui. Les échantillons prélevés ont été analysés au LNBTP (*Laboratoire National des Bâtiments et des Travaux Publics de Centrafrique*). Les analyses ont été faites sur un granulomètre dans lequel, le refus de chaque tamis est pesé et rapporté au poids total de l'échantillon. Une courbe granulométrique (*ex : fig. 26*) est alors réalisée en fonction de la taille des particules et le pourcentage cumulé des refus de tamis. Le **D50** (Diamètre Médian) de chaque échantillon nous a permis d'estimer la capacité du charriage de l'Oubangui ; ce D50 correspond au diamètre au-dessous duquel se trouve 50% de l'effectif de particules total. Lorsque le D50 est supérieur à 2 mm le sédiment est classé en **Rudites** (blocs, galets, graviers), et quand celui-ci est compris entre 2 mm et 0,063 mm, l'échantillon est classé parmi les **Arénites** (domaine des sables fins et grossiers), et quand le D50 est inférieur à 0.063 on est dans le domaine des **Lutites** (limons et Argiles).

À Bangui, les résultats montrent que la taille granulométrique moyenne de la *charge du fond* est de 0,35 mm, et celle des *bancs de sables* est de 0,30 mm. Nous déduisons par-là, que les

sédiments du fond du chenal sont légèrement supérieurs à ceux des bancs de sable. Toutefois, l'ensemble des valeurs obtenues sont nettement inférieures à 2 mm ; cela laisse présager que l'Oubangui est une rivière à charge alluviale fine que grossière. Cette inefficacité du charriage grossier pourrait s'expliquer par la résistivité du substratum du lit à l'abrasion. En effet, le haut et moyen Oubangui coule principalement sur des roches résistantes (granite, quartzite...) qui limitent la possibilité d'érosion linéaire. Plus encore, la *ferruginisation* très prononcée du bassin accroît considérablement la résistivité du substrat vis-à-vis de l'érosion linéaire. Le processus de ferruginisation s'opère par imprégnation, cimentation et concrétion des roches métamorphiques en place [Demangeot, 1999]. Il s'agit d'un processus pédogénétique fondamental dans les bassins fluviaux à saisons contrastées [Faure, 1985]. La richesse en « fer » du territoire Centrafricain est manifestement le facteur essentiel à la mise en place des « cuirasses ferrugineuses ».

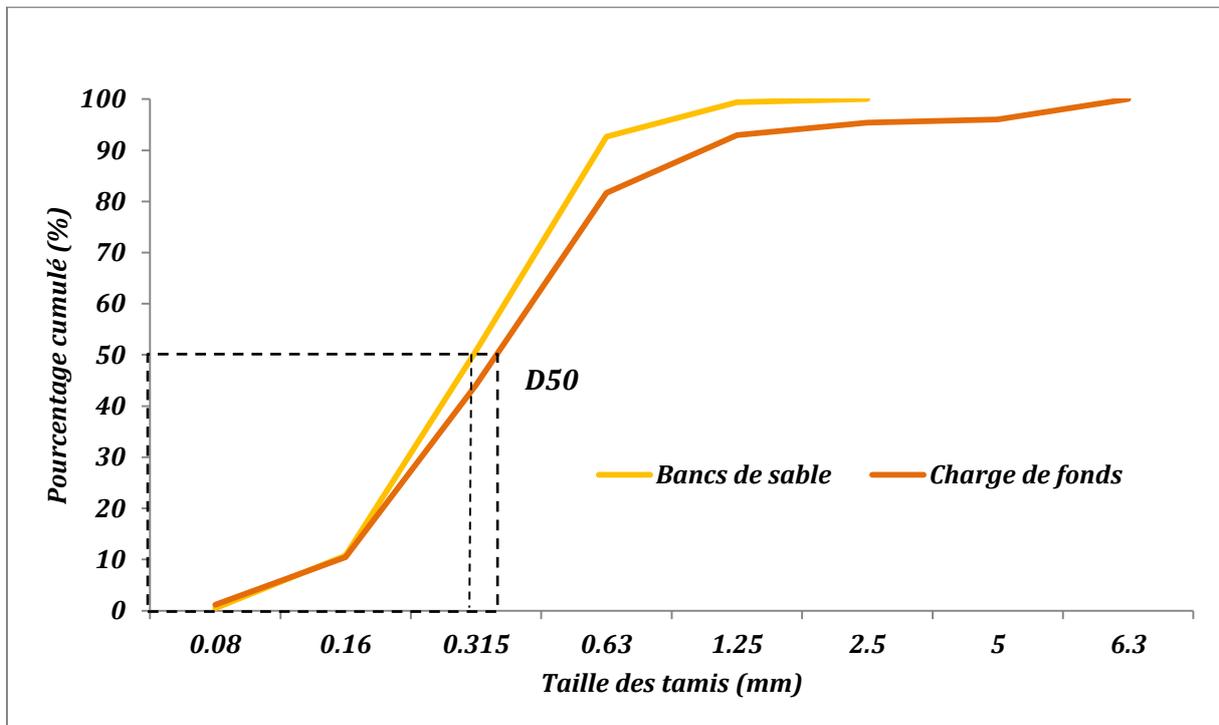


Fig. 26 – Courbe granulométrique de l'Oubangui à Bangui
Fig. 26 – Granulometric curve of the Ubangui in Bangui

C- Contexte Géologique

La composante géologique est un facteur essentiel pour caractériser l'écoulement sur un bassin versant. Non seulement qu'elle permet de connaître la nature et l'origine des sédiments véhiculés par une rivière, l'étude géologique permet également de rendre compte de la perméabilité du substratum d'un bassin versant nécessaire à la régulation de l'écoulement. A l'échelle du bassin de l'Oubangui, la connaissance de la structure géologique ne remonte qu'au 20^{ème} siècle [Callède & al., 2010], avec des travaux de Lacoïn (1903), Foureau (1905), Courtet (1907), Cornet (1909), Fourmarier (1932), Lepersonne (1951), Mestraud (1963 ; 1982), Poidevin (1977), UNESCO, (1982), BRGM (1983), Cornacchia & al. (1986), Censier (1989 ; 1991). Ces travaux restent approximatifs et ont donné lieu à de nombreux documents de synthèses cartographiques dont ceux de l'UNESCO (*fig. 27*). Trois grandes formations géologiques sont à distinguer sur le bassin de l'Oubangui :

- 1) **Les formations précambriennes** qui couvrent le *haut-Oubangui*. Elles sont constituées des roches *granitiques* et *gneissiques*, qui sont communément des roches dures et résistantes.
- 2) **Les formations secondaires** qui prédominent sur le *moyen-Oubangui*, sont constituées des roches imperméables à dominantes *crystallophylliennes*, telles que les *grés-quartzites* et les *schistes*. Ces roches aussi dures qu'imperméables présentent une certaine résistance à l'érosion linéaire. A ce titre, Laraque & al. (2001) ont montré que, les roches imperméables qui constituent le substrat géologique de l'Oubangui, accroissent les variations hydrologiques sur le bassin dans des proportions considérables.
- 3) **Les formations quaternaires** qui couvrent le *bas-Oubangui*, sont composées essentiellement des *alluvions holocènes* de la cuvette Congolaise. Censier (1995) s'est intéressé à déterminer l'âge et l'origine des alluvions du bas-Oubangui à travers des analyses granulométriques et minéralogiques. Ses résultats ont montré que les alluvions du *bas-Oubangui* correspondent pour l'essentiel aux sables d'âge holocène issus de l'érosion du versant du *haut-Oubangui* auxquels s'ajoutent des sables issus principalement de l'érosion des formations sableuses de la *cuvette Congolaise* par l'Oubangui et, à un degré moindre, par ses affluents comme la *Pama* ou la *Mpoko*. L'auteur a détecté les apports en sable des affluents à travers des perturbations dans la granulométrie et dans le cortège minéralogique.

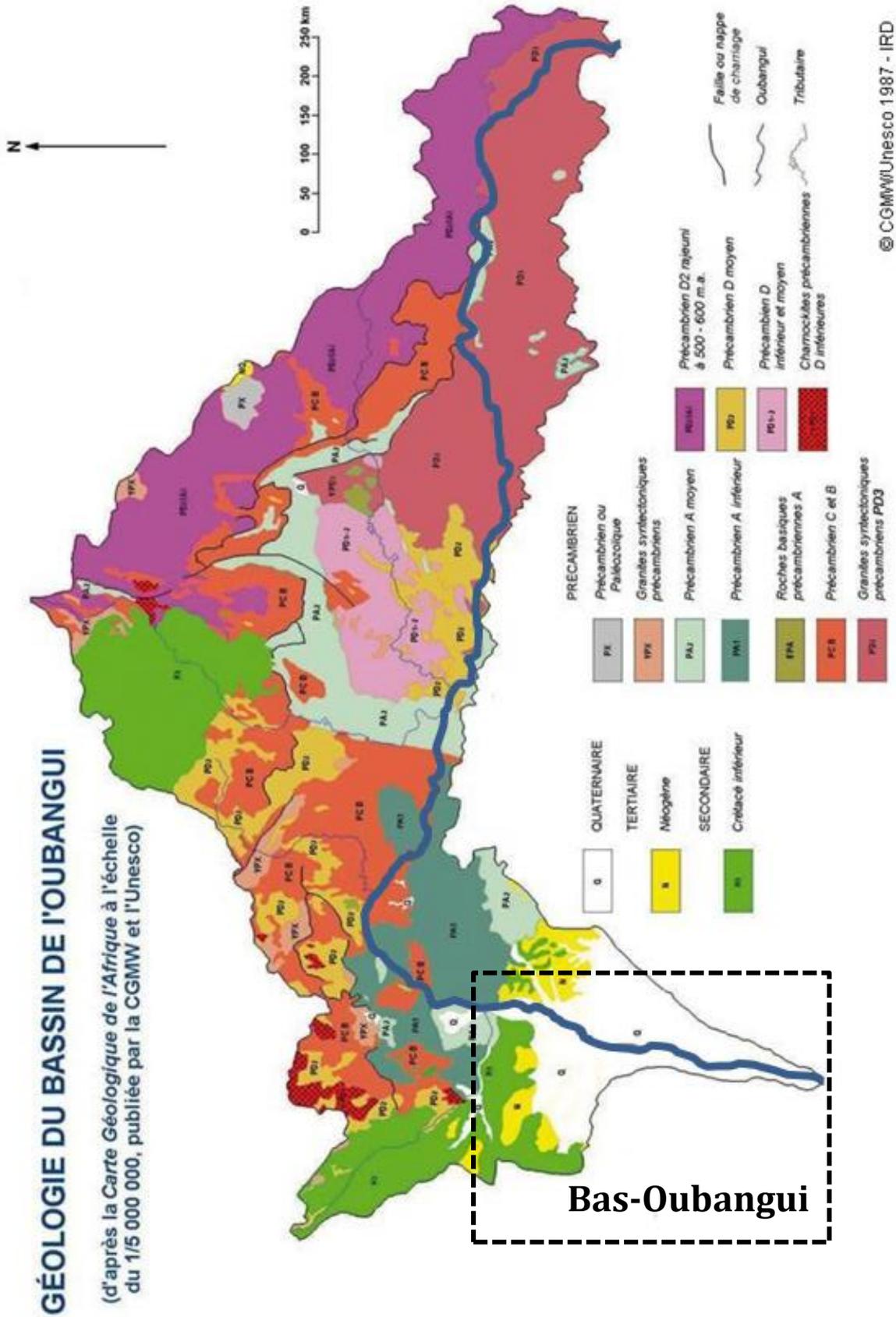


Fig. 27 – Carte Géologique du bassin de l'Oubangui. (UNESCO, 1987)
 Fig. 27 – Geological map of the Ubangui basin. (UNESCO, 1987).

Les alluvions quaternaires du bas-Oubangui seraient des vestiges d'une intense manifestation hydrogéomorphologique révolue. Mais cette hypothèse est à considérer avec prudence car la *paléohydrologie* de l'Oubangui est encore méconnue. Sur les rivières tempérées par exemple, on recourt généralement à la *géochronologie* pour reconstituer la paléohydrologie des chenaux mobiles. La reconstitution se fait le plus souvent par des analyses isotopiques ou par cartographie sur fond de documents historiques. L'apport récent de la *télétection* en hydrologie a également permis de reconstituer les trajectoires historiques des rivières sur bases des données *LIDAR* [Castanet & al., 2016 ; Steinmann & al., 2017]. L'intérêt de la reconstitution est de retracer la dynamique fluviale ancienne afin de comprendre les processus morphodynamiques actuels. Faire l'impasse du passé hydrologique d'une rivière peut conduire à un diagnostic incorrect et à des propositions d'interventions inadaptées en matière de gestion du lit et des sédiments [Liebault, & al., 2013].

Les travaux précurseurs sur la paléohydrologie de l'Oubangui sont ceux de *Lafranchi & Schwartz* (1991) et de *Roche* (1991), auxquels les auteurs ont pu reconstituer la dynamique paysagère au cours des derniers millénaires. Leurs travaux abordaient globalement la *paléoclimatologie* que la *paléohydrologie*. À ceux-ci s'ajoutent les travaux de Runge (2002 ; 2007) sur la paléo-environnement de l'Afrique Centrale.

Les auteurs ont mis en évidence une alternance des phases climatiques sèches et humides d'intensité variable due à la crise hydroclimatique de l'holocène :

- ✓ Pendant les phases climatiques plus sèches : On constate une progression de la savane au détriment de la forêt et de la Mangrove [Roche, 1991]. Les rivières du bassin sont deviennent alors moins compétents pour charrier les alluvions.
- ✓ Pendant les phases climatiques humides : les forêts regagnent du terrain, l'érosion linéaire reprend [Roche, 1991] et les cours d'eau incisent les dépôts alluviaux. Le maximum de cette humidité est constaté entre [- 8000, - 6000 ans]. Cette incision provoque un abaissement du niveau de base des rivières, et les dépôts se trouvent ainsi surélevés. C'est ainsi que se forment les terrasses alluviales, qui recèlent parfois des substances minérales exploitables : gisements de diamant en Centrafrique, dépôts aurifères du Gabon ou du Congo [Lanfranchi & Schwartz, 1991].

- ✓ Pendant les phases climatiques sèches : [- 5000, - 3000 ans] : les savanes recolonisent les forêts ; le paysage devient plus instable et les chenaux sont divagants et évoluent vers leur stade actuel.

A défaut de disposer des documents historiques et des données LIDAR sur notre zone d'intérêt, nous avons pu identifier des paléobras sur l'Oubangui et ses affluents grâce à l'application *Google Earth* (ex : photo 2 & 3). Ces paléobras seraient en fait des vestiges d'une paléohydrologie qui est non adaptée de nos jours. Ne sont plus alimentés par les crues de l'Oubangui, les paléobras de l'Oubangui se seraient progressivement voire totalement déconnecter du chenal principal pour former des bras morts ou des terrasses alluviales.

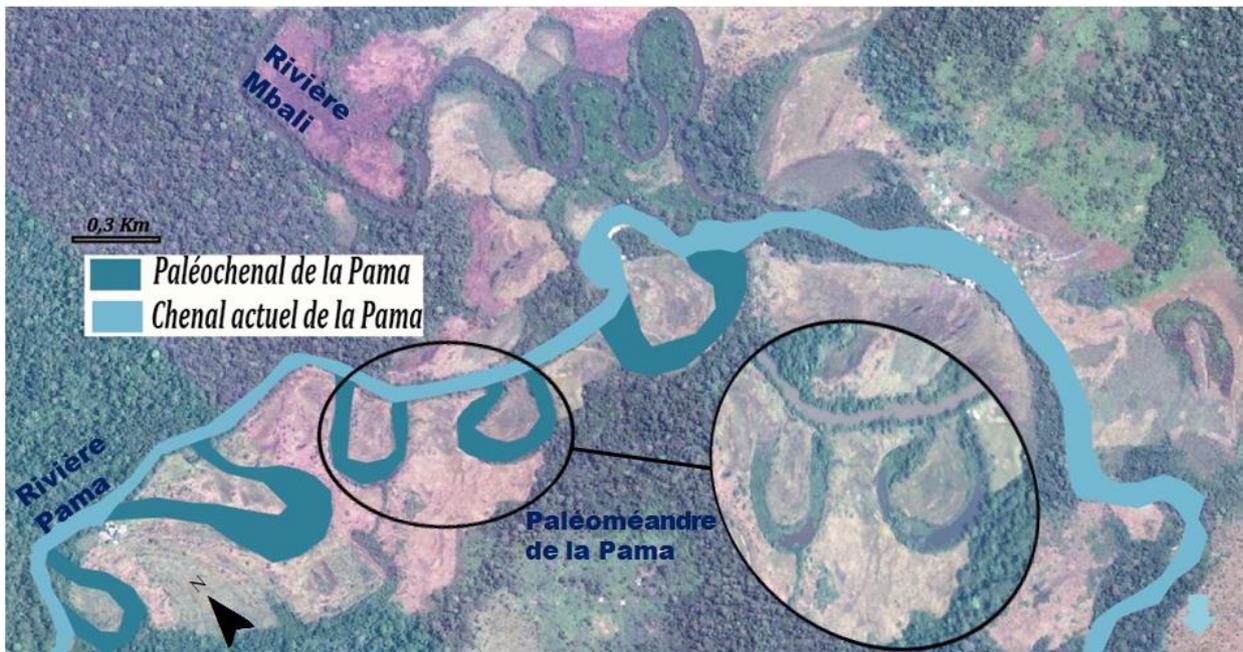


Photo 2 – Paléochenal sur la rivière Pama, affluent du moyen-Oubangui (18°19'18.66"E et 4°27'54.00"N). Source: Google Earth.

Photo 2 – Paleochenal on the Pama river, tributary of the middle-Ubangui (18°19'18.66"E and 4°27'54.00"N). Source: Google Earth.

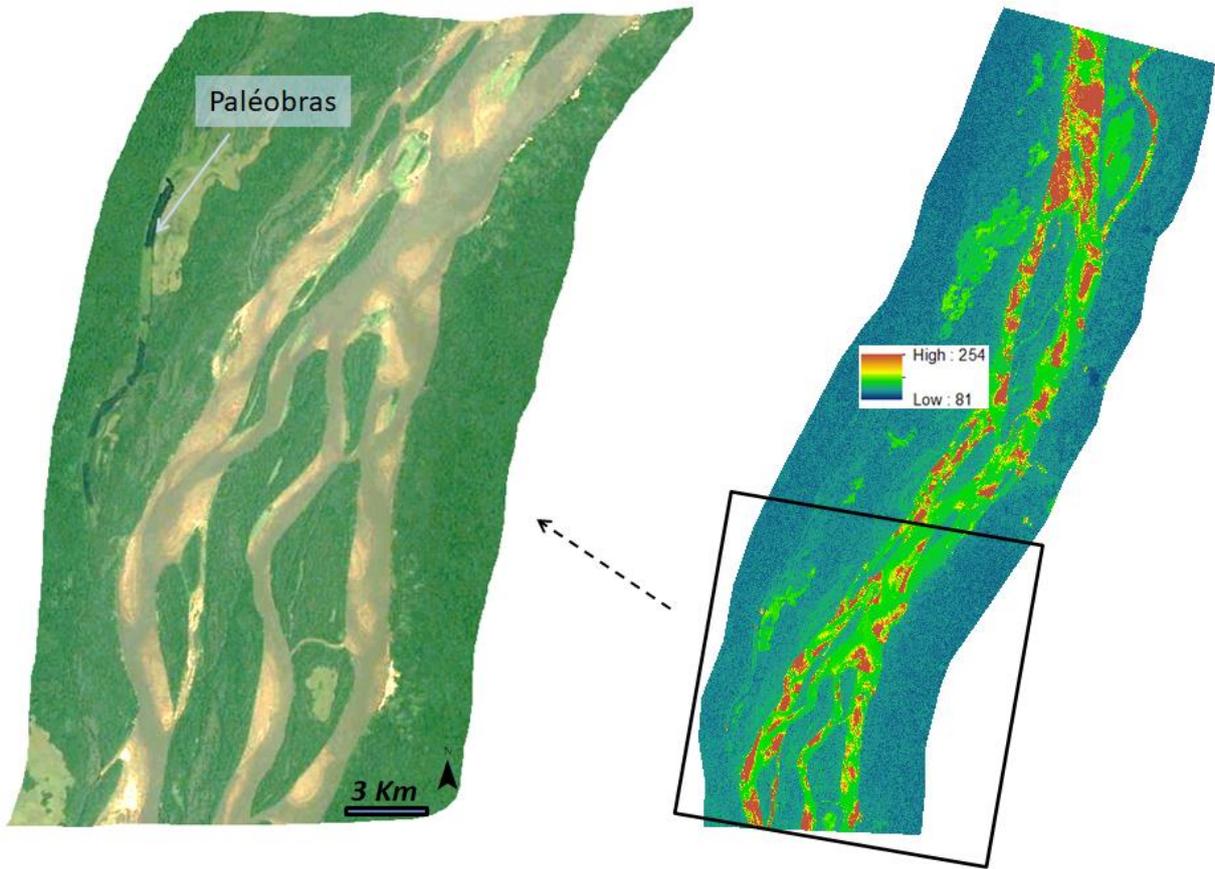


Photo 3– Paléochenal sur la rivière Oubangui dans la localité de Boburu (17°49'50.00"E et 1°1'49.02"N). Source: Google Earth.

Photo 3 – Paleochenal on the Ubangui River in the locality of Boburu (17°49'50.00"E and 1°1'49.02"N). Source: Google Earth.

D- Contexte Hydroclimatique

Aperçu sur le régime hydrologique de l'Oubangui

Les régimes fluviaux sont conditionnés par le climat (régime pluviométrique), la nature du bassin versant, et la nature du sol (perméabilité) etc. Ils sont indispensables au cycle vital des communautés aquatiques. Les activités humaines liées à l'eau telle que la pêche, l'agriculture, et l'extraction de granulats, dépendent également du régime hydrologique. Il convient de mentionner que les régimes fluviaux tropicaux sont très simples dans leur principe: ils sont « *pluviaux* », ce qui signifie que les *débites* sont directement commandés par la *pluie* [Demangeot, 1999]. Sur l'Oubangui, le régime fluvial est caractérisé par l'alternance de deux saisons : une saison sèche et une saison humide. La saison humide dure en moyenne plus longtemps que la saison sèche à cause de la pluie qui s'étale sur majeure partie de l'année. La saison hydrologique sur l'Oubangui est répartie entre *avril-mars*. Ainsi, le mois d'*avril* correspond à la montée des eaux, et le mois de *mars* correspond à la fin de décrue (*ex : fig. 28*). La montée des eaux correspond à la saison de reproduction des espèces halieutiques et de la navigabilité. Le *mode* d'écoulement lors des hautes eaux apparaît généralement au mois d'*octobre*. Tandis que la décrue (basses eaux) correspond à la saison idéale pour l'extraction des sables. Bien qu'elle soit effectuée sur toute l'année en fonction des espèces piscicoles, la pêche sur l'Oubangui s'effectue de préférences lors des hautes eaux.

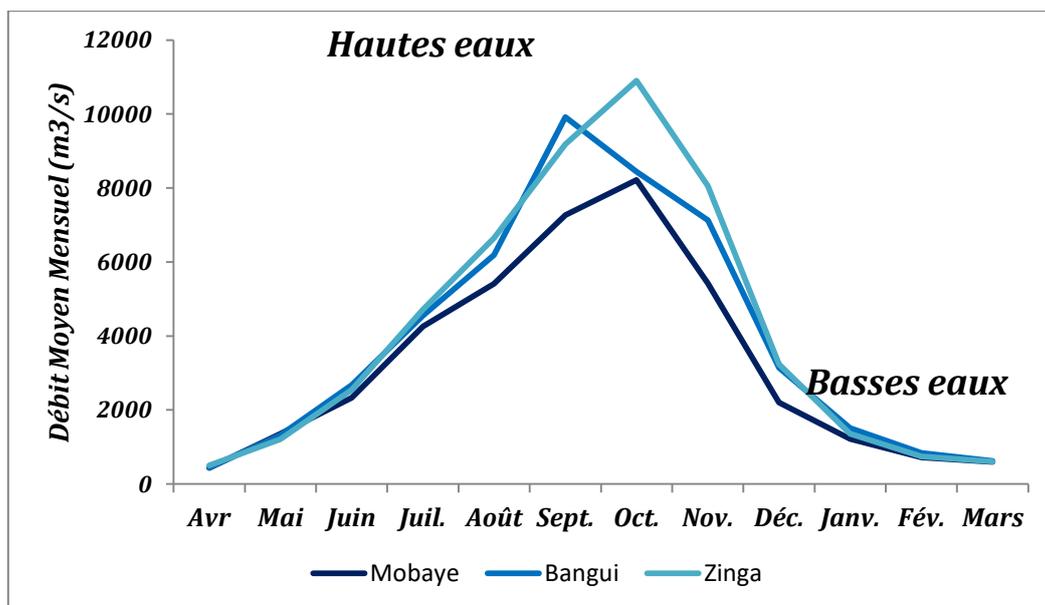


Fig. 28 – Régime hydrologique de l'Oubangui pour l'année hydrologique 1974-1975
Fig. 28 – Ubangui hydrological regime for the hydrological year 1974-1975

Aperçu sur le module hydrologique de l'Oubangui

Le *module* d'une rivière à une station donnée correspond à la *moyenne* de son *débit annuel*, et s'obtient en effectuant la *moyenne arithmétique et pondérée* des débits moyens mensuels :

$$Q_{ma} = \frac{Q_{m\text{janvier}}.31 + Q_{m\text{février}}.28 + Q_{m\text{décembre}}.31}{365}$$

Avec : Q_{ma} = le Module annuel et Q_m = le débit moyen mensuel et 365 (ou 366), le nombre de jours par an.

L'analyse du *module* permet de voir les fluctuations interannuelles du débit et d'en rechercher les causes. Nous avons utilisé trois stations hydrométriques pour présenter l'évolution temporelle du module de l'Oubangui et ses affluents. Celles-ci concernent les stations de l'Oubangui à Bangui, de l'Oubangui à Mobaye et de la Mbali à Boali.

La station de *Bangui* (code *HYDROM* = 1060700105) est l'une des mieux observées en Afrique [Callède & al, 2010], elle jauge le débit de l'Oubangui depuis 1890 sur un « *pas de temps journalier* », mais c'est depuis 1935 (fig. 29) que les enregistrements sont faits de manière continue sur une aire de 488 500 km². Le jaugeage se faisait au début par un « *cercle hydrologique* » avant d'être remplacé par une échelle limnimétrique.

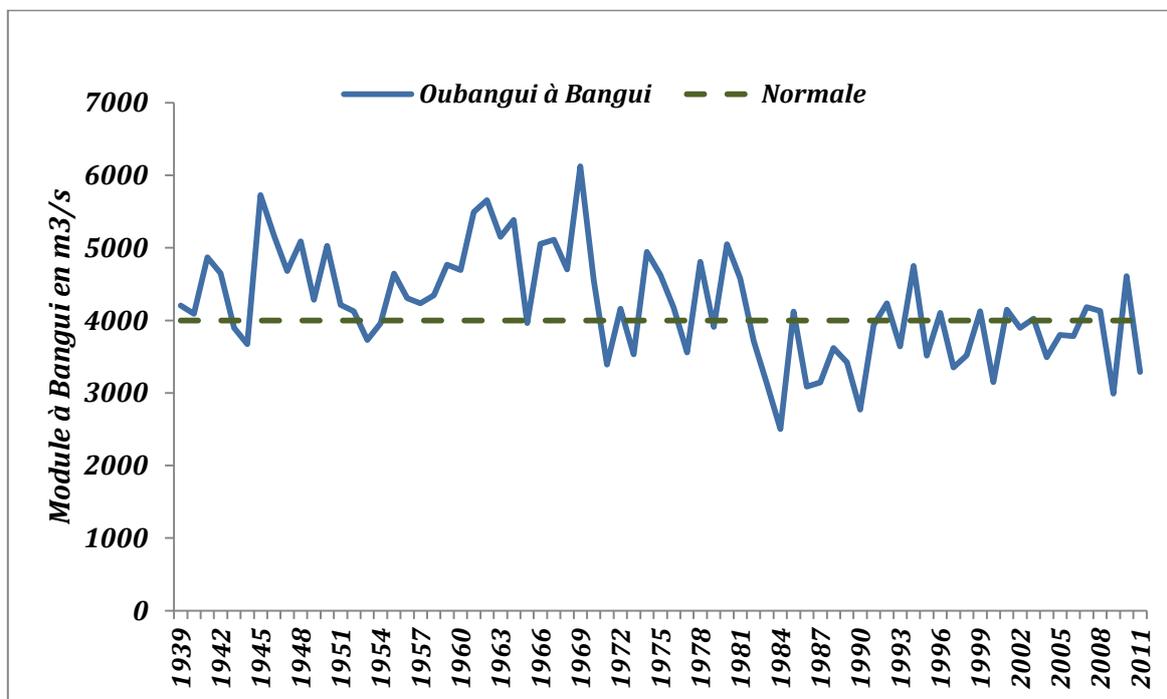


Fig. 29 – Module interannuel de l'Oubangui à la station de Bangui en année civile (1939-2011).
Fig. 29 – Ubangui interannual module at the Bangui station in a calendar year (1939-2011).

La station de *Mobaye* (code *HYDROM* = 1060700115) quant à elle, jauge l'Oubangui depuis 1939 sur une aire de 403 800 km². Les données recueillies auprès des services hydrologiques nationaux sur cette station sont à « *pas de temps* » mensuel et ne contiennent que 55 années d'observations (1939-1993). Un travail de prétraitement a été effectué sur la courte série temporelle de *Mobaye* (1939-1993) pour fins d'extension. De ce fait, la méthode de « *proportionnalité hydrologique* » a été appliquée afin d'extrapoler la courte série temporelle de *Mobaye* en fonction de la série temporelle étendue de *Bangui*. Le choix de la station de *Bangui* comme « *station de référence* » pour l'extrapolation est fait, non seulement en fonction de la disponibilité de données, mais également de la proximité qui existe entre ces stations. Le résultat du « *test de corrélation croisée* » permet de souligner une forte dépendance temporelle entre les deux stations. Avec *R*, le coefficient de corrélation linéaire, qui est égal **0,87** (fig. 30).

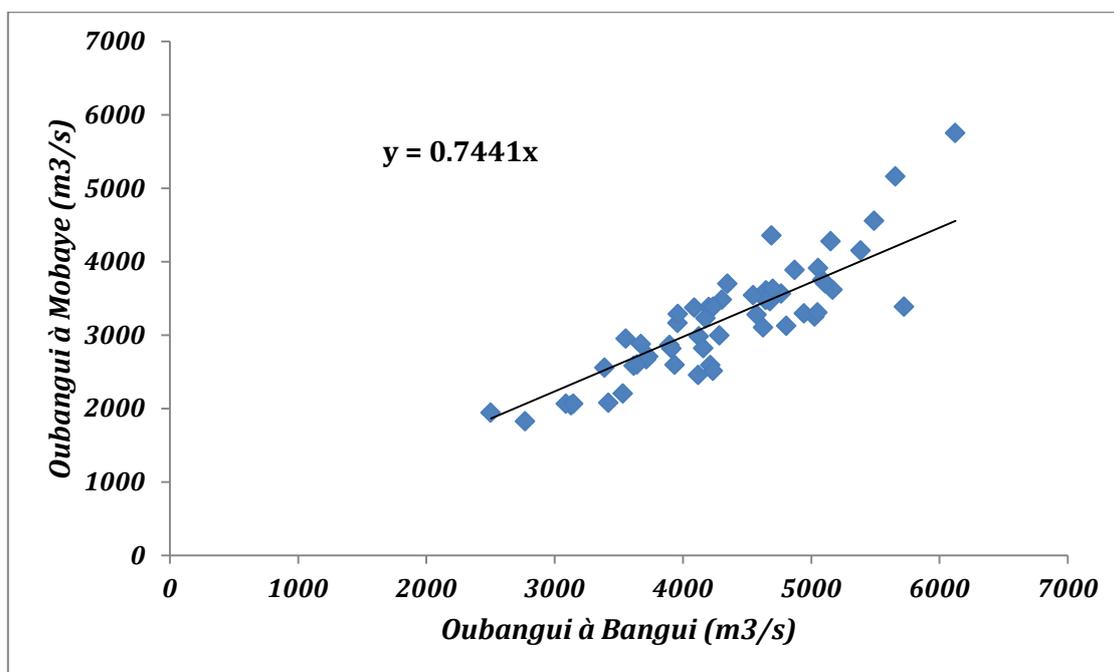


Fig. 30 – Corrélation croisée entre les débits de l'Oubangui à Bangui et à Mobaye sur la période de 1939 à 1993

Fig. 30 – Cross-correlation between Ubangui flows in Bangui and Mobaye over the period 1939 to 1993

Dubreuil (1974) a ainsi montré que, « *si les deux stations considérées sont situées dans la même (grande) région climatique, et à une distance relativement faible à l'échelle d'un continent, il existe une liaison positive significative entre les totaux annuels pluviométriques, c'est-à-dire qu'il y a seulement 5% de chances, par exemple, pour que les séries soient*

complètement indépendantes, ou présentent des variations de sens contraires ». En effet, l'Oubangui à la station de Bangui (Pk 1 600) dispose des caractéristiques hydroclimatiques, géomorphologiques et physiographiques proches de l'Oubangui à la station de Mobaye (Pk 1250). La méthode de *proportionnalité hydrologique* est couramment utilisée par des hydrologues tropicaux pour reconstituer le débit de nombreuses rivières en arrêt d'observations. Sur l'Oubangui, Callède & al. (2010), l'ont utilisée pour reconstituer les débits maximums et minimums de l'Oubangui à Mobaye en fonction de ceux de l'Oubangui à Bangui.

Une fois homogénéiser et tester la corrélation entre les deux stations, il ne reste plus qu'à étendre la série temporelle de Mobaye (1939-1993) en fonction de celle de Bangui (fig. 31).

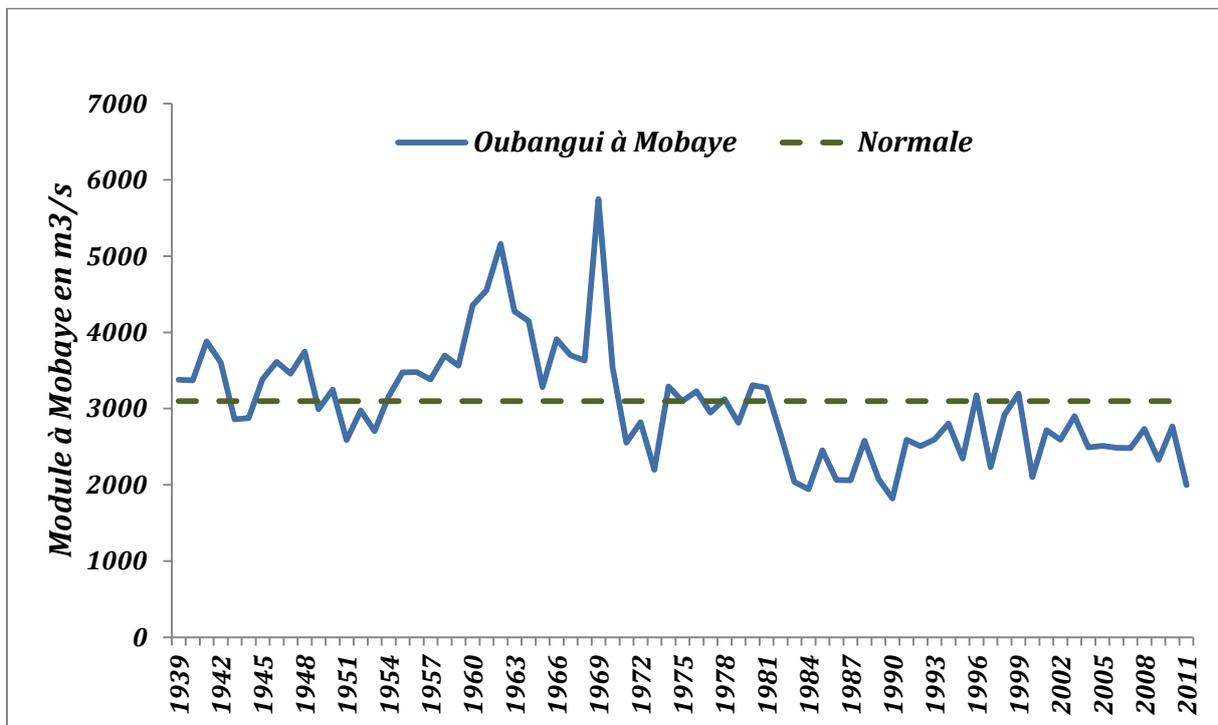


Fig. 31 – Module interannuel de l'Oubangui à la station de Mobaye en année civile (1939-2011).
Fig. 31 - Ubangui interannual module at the Mobaye station in a calendar year (1939-2011).

Enfin, la station de Boali (code HYDROM = 1060704604) jauge la rivière Mbali depuis le début des années 1950 sur une aire de 4 410 km². Nous ne disposons que des données continues sur 42 années d'observations (1951-1993).

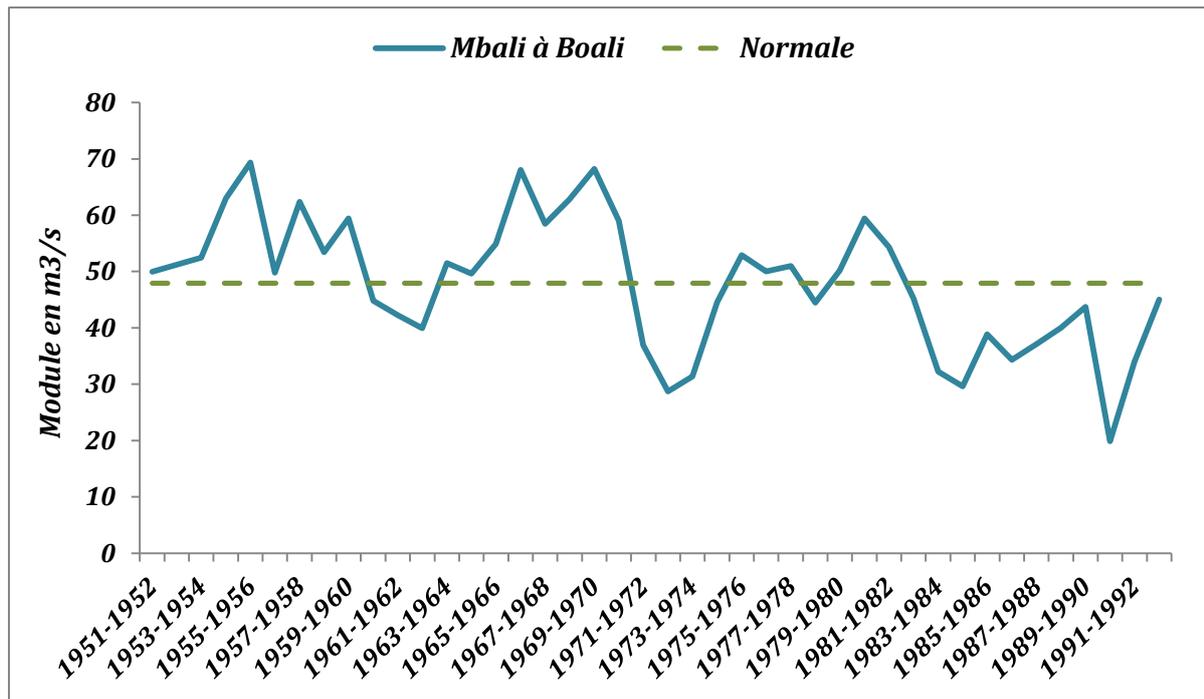


Fig. 32 – Module interannuel de la Mbali à Boali en année hydrologique (1951-1993).
 Fig. 32 – Mbali interannual module at the Boali station in hydrologic year (1951-1993).

Etudes des variations interannuelles du module de l'Oubangui

Un indice d'écoulement a été appliqué afin de caractériser les variations interannuelles du *Module* de l'Oubangui, il s'agit de ***l'Indice de Standardisation (IS)*** connu aussi sous le nom de ***l'Indice de Nicholson*** ; celui-ci permet de caractériser la sévérité des débits d'étiage ou de crue par rapport à la normale en différentes classes. Il a été employé par de nombreux auteurs pour mettre en évidence des fluctuations pluviométriques dans diverses régions climatiques du globe [Ardoin-Bardin, 2004 ; Giddings & al., 2005 ; Wu & Al., 2001 ; Sönmez & al., 2005 ; Bodian, 2014 ; Faye & al., 2015]. En hydrologie, il est appliqué pour mesurer l'écart d'un écoulement annuel par rapport à la normale interannuelle selon l'équation suivante :

$$IS = \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma}$$

Avec : ***IS*** = *Indice de Standardisation* ; ***Y_i*** = *Module pour l'année i* et ***Ȳ*** = *Module interannuel sur la période étudiée* ; ***σ*** = *Ecart Type du module sur la période étudiée*

L'indice ***IS*** a été appliqué sur le module interannuel de l'Oubangui à la station de Bangui et les résultats se présentent comme suit (fig. 33 : tab. 2) : sur les 73 années d'observations, on compte 4 années d'extrême humidité, 13 années d'humidité forte, 27 d'humidité modérée, 22 de sécheresse modérée, 6 de sécheresse forte et 1 année de sécheresse extrême.

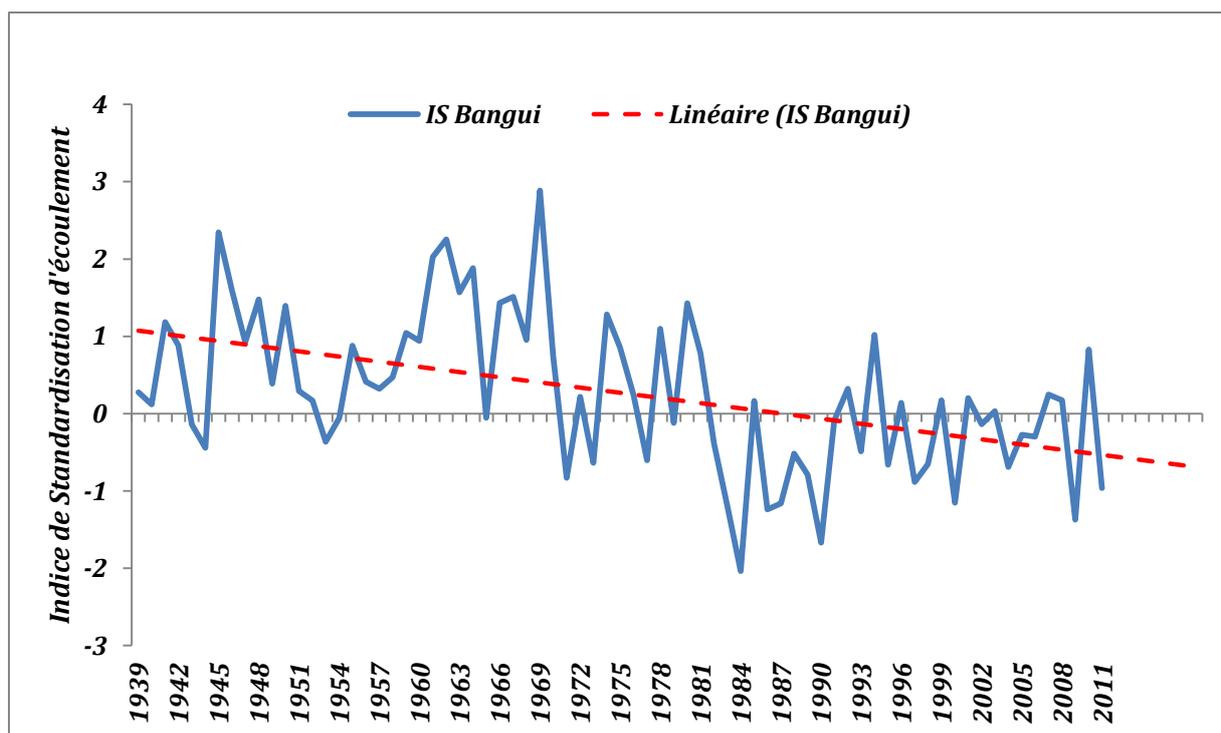


Fig. 33 – Indice de standardisation d'écoulement de l'Oubangui à la station de Bangui
Fig. 33 – Ubangui Flow Standardization Index at Bangui Station

Tableau 2 – Classification de l'Indice Standardisé (IS) sur l'Oubangui à Bangui
Table 2 – Classification of the Standardized Index (IS) on Ubangui in Bangui

Valeur de l'Indice	Signification	Période référente
$IS > 2$	Humidité extrême	1945 ; 1961 ; 1962 ; 1969.
$1 < IS < 2$	Humidité forte	1941 ; 1946 ; 1948 ; 1950 ; 1959 ; 1963 ; 1964 ; 1966 ; 1967 ; 1974 ; 1978 ; 1980 ; 1994.
$0 < IS < 1$	Humidité modérée	1939 ; 1940 ; 1942 ; 1947 ; 1949 ; 1951 ; 1952 ; 1955 ; 1956 ; 1957 ; 1958 ; 1960 ; 1968 ; 1970 ; 1972 ; 1975 ; 1976 ; 1981 ; 1985 ; 1992 ; 1996 ; 1999 ; 2001 ; 2003 ; 2007 ; 2008 ; 2010.
$-1 < IS < 0$	Sècheresse modérée	1943 ; 1944 ; 1953 ; 1954 ; 1965 ; 1971 ; 1973 ; 1977 ; 1979 ; 1982 ; 1988 ; 1989 ; 1991 ; 1993 ; 1995 ; 1997 ; 1998 ; 2002 ; 2004 ; 2005 ; 2006 ; 2011
$-2 < IS < -1$	Sècheresse forte	1983 ; 1986 ; 1987 ; 1990 ; 2000 ; 2009.
$IS < -2$	Sècheresse extrême	1984

Aperçu sur les extrêmes hydrologiques de l'Oubangui

Le système fluvial fonctionne par pulsation hydrologique (*flood pulse*) qui entraîne à l'échelle interannuelle des événements extrêmes, rares et de fortes magnitudes qui conditionnent la dynamique fluviale. Les extrêmes hydrologiques en rivière, intègrent les *crues* et les *étiages*, avec leurs degrés variés de sévérité [Nguimalet, 2017].

Les crues sont une augmentation plus ou moins brutale du débit d'un cours d'eau qui se traduit généralement par une augmentation très visible du niveau d'eau. D'un point de vue d'aménagement, la connaissance des débits maximums de crues d'une rivière permet aux ingénieurs et aux gestionnaires de bien calibrer leurs ouvrages hydrauliques (digues, barrages, canaux) afin d'optimiser leurs rendements. Sur la base de chroniques de débits journaliers recueillis auprès des services hydrologiques du Centrafrique, nous avons dressé la courbe des *débits maximums de l'Oubangui* à la station de Bangui entre 1936 à 2011 (*fig. 34*). L'Oubangui a enregistré une crue exceptionnelle le 02 Novembre 1961 avec un pic avoisinant les 14 460 m³/s ; cet épisode exceptionnel est survenu au lendemain de l'indépendance de la République Centrafricaine. Les crues ayant une forte magnitude, lorsqu'elles se produisent, entraînent de nombreux dégâts matériels et des pertes humaines, mais cela ne signifie pas pour autant que les crues ne sont pas bénéfiques pour les habitants et pour les hydrosystèmes fluviaux.

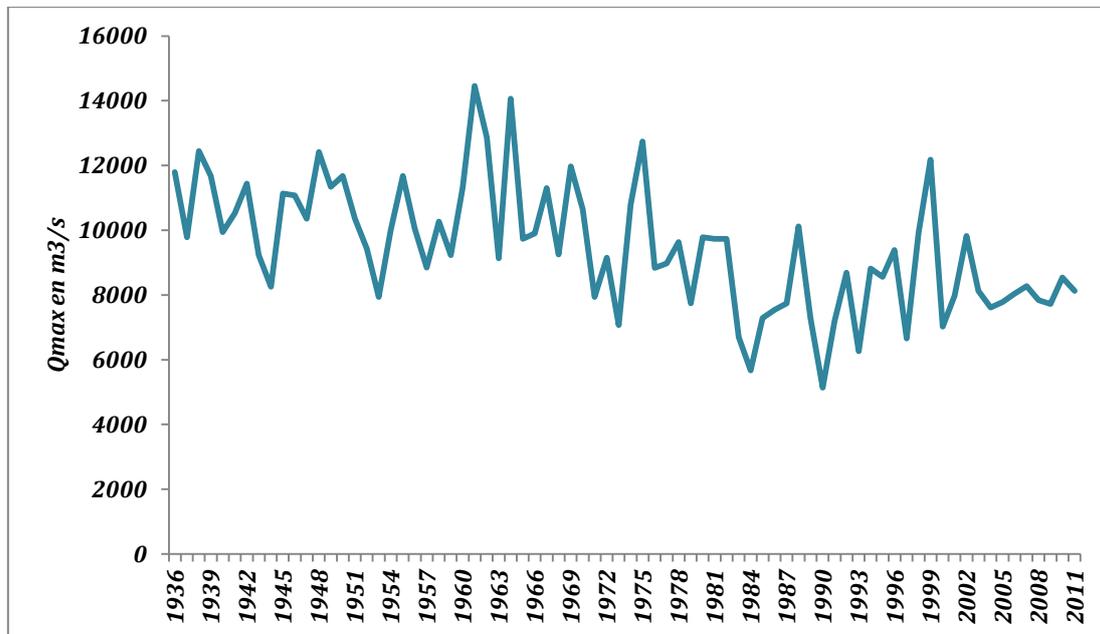


Fig. 34 – Les débits maximums de crues de l'Oubangui à Bangui en année civile
Fig. 34 – Peak Ubangui flood flows at the Bangui station in calendar year

Pour de nombreux hydro-écologues, une *crue* n'est guère synonyme d'une *perturbation* en rivière. Lévêque (2016) a ainsi montré qu'une crue, même si elle est brutale, fait partie du fonctionnement normal d'un système fluvial. On s'aperçoit que dans les rivières mobiles et peu cloisonnées, c'est à l'occasion des crues de débordement que différents processus essentiels se réalisent : régénération du substrat, redistribution des accumulations de matière organique, dilution des particules fines minérales et organiques au sein de toute la plaine d'inondation. Ces épisodes sont mis à profit par les poissons pour accomplir certaines phases essentielles de leur cycle vital : migrations de montaison ou d'avalaison en fonction de la saison, reproduction dans les annexes fluviales, nutrition active dans un espace et avec une disponibilité trophique augmentée [Malavoi & Souchon, 1996]. Durant un événement de crue, la sédimentation dans la plaine est maximale en phase de décrue, alors que l'érosion est plus importante en montée de crue. Notons que chaque forme fluviale enregistre une phase maximale de sédimentation qui dépend de sa position dans le corridor et de sa microtopographie [Zwolinski, 1992 ; Durfour, 2005]. Les débits de crues maximums jouent aussi un rôle essentiel du point de vue de l'entretien du substrat, en évitant l'apparition du phénomène de colmatage [Navratil, 2005]. Les crues se définissent par *leur genèse, leur puissance, leur durée, et leur fréquence*. Les crues fréquentes sur l'Oubangui sont générées principalement par les *pluies de mousson* et dans certaines mesures, par les pluies *thermoconvectives*. En termes de puissance, Nguimalet (2017) a ainsi montré que la crue exceptionnelle de 1961 sur l'Oubangui à Bangui dispose d'un *coefficient A* de **20,39**. Mais, en raison de l'imperméabilité du substratum géologique de l'Oubangui, l'onde de crue se propage très rapidement d'amont vers l'aval. À cet effet, Yayer a montré dès 1951 que l'onde de crue de l'Oubangui se propage comme une onde de marée, sa vitesse de propagation est à 100 Km/jour.

Selon leurs *fréquences*, on distingue des *crues modestes* et des *crues rares* ou *exceptionnelles*. **Les crues modestes** sont les crues les plus fréquentes à l'image des crues morphogènes qui ont une période de retour oscillant entre 8 mois et 2 ans en fonction de la perméabilité du substrat, et représentent selon Léopold & al. (1964), le point optimum d'efficacité pour les modifications géomorphologiques au sein du lit mineur. Tandis que **les crues rares** ont un potentiel supérieur en matière d'érosion et de transport sédimentaire, mais ce sont des épisodes peu fréquents et brefs. La *réurrence* des crues rares est souvent estimée à partir de certaines lois statistiques, comme la *loi de Gumbel*, qui est l'exemple le plus commun de la

loi statistique utilisée en analyse fréquentielle. Elle permet de déterminer le **temps de retour** des crues exceptionnelles à une station donnée. Sa mise en place nécessite de disposer d'une longue série de la distribution des débits maximums journaliers à la station étudiée ; sa fonction de répartition s'écrit ainsi :

$$F(x) = \exp[-\exp(-u)] \quad \text{avec } u = \ln [-\ln (f(x))] \text{ sa variable réduite.}$$

Les deux tableaux suivants présentent les *débits fréquents des crues rares* de l'Oubangui pour un temps de retour allant du biennal à centennal aux stations de Bangui (Pk I 600) et de Mobaye (Pk I 250).

Tableau 3 – Résultats de l'analyse des débits fréquents des crues de l'Oubangui à Bangui
Table 3 – Results of the frequency flow analysis of Ubangui floods in Bangui

	Temps de retour (ans)						
	2	5	10	20	50	100	
Loi de Gumbel (m^3/s)	9164	10844	11956	13022	14403	15438	Auteur: Nzango C.
Loi de Pearson 3 (m^3/s)	9820	11600	12400	13000	13600	14900	Auteur: Callède & al.

Tableau 4 – Résultats de l'analyse du Temps de retour des crues de l'Oubangui à Mobaye
Table 4 – Results of the analysis of the return time of the Ubangui floods in Mobaye

	Temps de retour (ans)						
	2	5	10	20	50	100	
Loi de Gumbel (m^3/s)	7824	8954	9702	10420	11349	12046	Auteur: Nzango, C
Loi de Pearson 3 (m^3/s)	8500	9770	10500	11100	11800	12500	Auteur: Callède & al.

Les étiages sont synonymes de «*pénurie hydrique*» [Bravard & Petit, 1997], ils correspondent généralement au plus bas niveau atteint par le débit d'un cours d'eau ou d'un lac en une station donnée. La courbe des *débits minimums de l'Oubangui* (fig. 35) à la station de Bangui nous révèle que l'année 1985 correspond à l'année d'étiage critique soit un débit minimum journalier avoisinant les 234 m^3/s . Le débit d'étiage critique correspond au débit d'étiage au-dessous duquel l'alimentation en eau potable pour les besoins indispensables à la vie humaine et animale, ainsi qu'à la survie des espèces présentes dans le milieu sont mises en péril. Lors des débits d'étiages, tous les bancs de sables de l'Oubangui sont à découvert, et tous les rochers des rapides sont exhumés. L'origine de cet étiage sévère se trouve dans la sécheresse exceptionnelle qui a affecté le bassin de l'Oubangui durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Nous revenons très rapidement et de manière détaillée sur cet aspect dans le chapitre suivant.

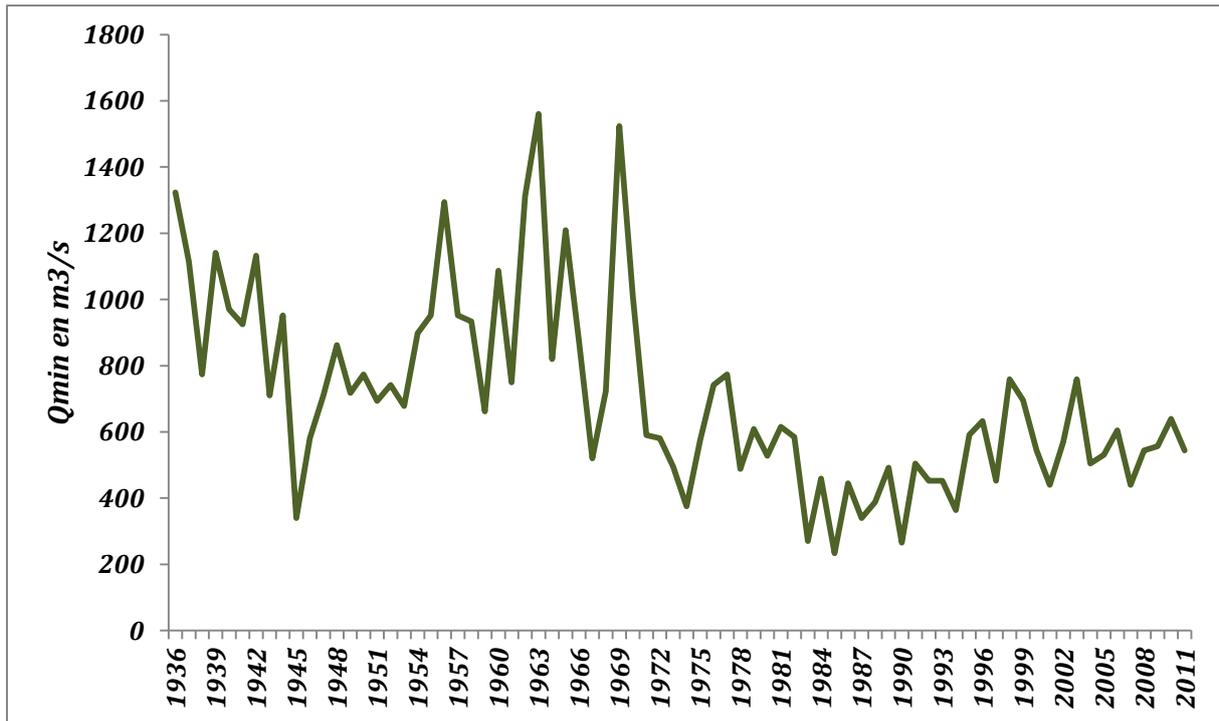


Fig. 35 – Les débits minimums d’étéages de l’Oubangui à Bangui en année civile
Fig. 35 - The minimum flow of Ubangui low flows at the Bangui station in calendar year

E- Cadre réglementaire du bassin de l'Oubangui

N'étant pas un fleuve, l'Oubangui dispose d'une longueur similaire à certains grands fleuves continentaux (ex : Rio Grande, Zambèze ; Danube, Orange et Colorado...). Avec ses 2 200 Km, il est seulement partagé entre trois Etats à savoir, la République Démocratique du Congo, la République Centrafricaine et la République du Congo Brazzaville. Jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle, la rivière Oubangui ne disposait pas encore d'un régime juridique et institutionnel général pour la gestion de ses ressources en eau, en raison des rivalités coloniales Franco-Belges. Les trois pays partageant l'Oubangui ont conclu un accord en 1978 pour la création d'une commission tripartite chargée de l'aménagement de cette partie du fleuve. Mais, le Congo-Démocratique ne l'ayant pas ratifié, l'Accord n'est pas encore entré en vigueur et n'est donc pas opérationnel [Mubiala, 1995]. Par un accord conclu en 1970, le Congo-Brazzaville et la République Centrafricaine ont créé une commission mixte pour l'aménagement du bief navigable entre l'Oubangui et le fleuve Congo. Cet Accord a conduit à la mise en place du **SCEVN** (Service Commun d'Entretien, des Voies Navigables). Sa principale mission consiste à améliorer les conditions de navigabilité pour désenclaver le Centrafrique et une partie des territoires Congolais. Le SCEVN intervient principalement aux périodes de basses eaux, au moment où la navigation est la plus difficile, voire impossible. Les interventions concernent dans la plupart du temps aux opérations de dragage des sables alluviaux qui obstruent les passes navigables, et également le dérochement au niveau des seuils rocheux. L'ensemble des opérations permet de baliser les voies navigables pour limiter les échouages des bateaux à l'endroit des seuils sableux et rocheux.

Un autre Accord a été conclu en 1986 entre le Centrafrique et le Congo-Démocratique sur l'exploitation commune des forces hydrauliques de l'Oubangui au site de Mobaye, où l'Oubangui est contigu entre les deux Etats. Le Congo-Brazzaville a refusé de se joindre à ce projet. Le barrage a été finalement inauguré en 1989 et continue toujours à produire de l'hydroélectricité pour les deux Etats.

Ce n'est qu'en 1999 que les trois Etats ont conclu un Accord instituant un régime fluvial uniforme en créant la **CICOS** (*Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha*). L'avènement de la **CICOS** comme organe intergouvernemental apporte ainsi une solution durable aux limites des mécanismes de coopération initiés par le passé [Mubiala, 1995]. Depuis 2015, la CICOS compte six (6) Etats membres, le Cameroun, le Centrafrique,

le Gabon, l'Angola, le Congo-Démocratique et le Congo-Brazzaville. Ces principales missions sont : la promotion de la navigation intérieure et la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (**GIRE**). Depuis sa création, la CICOS bénéficie d'appuis de nombreux organismes internationaux, dont celui de l'AERM (Agence de l'Eau Rhin Meuse) en 2012, qui l'appuie dans le renforcement des capacités pour l'élaboration du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau). Le SDAGE du bassin du Congo est élaboré entre 2014 et 2015 en fonction des besoins exprimés par les états, sur la base d'une compréhension commune des enjeux. Il s'agit d'un document d'orientation stratégique visant à fournir un guide de planification pour la mise en place d'une gestion durable des ressources en eaux à l'échelle du bassin. Dans le cadre de sa stratégie de gestion des ressources en eau du bassin du Congo, la CICOS a bénéficié des soutiens techniques et financiers de nombreux partenaires dont le GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), l'AFD (l'Agence Française de Développement), l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), et la BM (Banque Mondiale), etc.

Conclusion du deuxième chapitre

*Dans ce deuxième chapitre nous avons caractérisé le bassin de l'Oubangui dans ses cadres géographique, géomorphologique, géologique, hydroclimatique et réglementaire. L'Oubangui est en effet une rivière tropicale dont la source s'appelle Uélé. En fonction de son hétérogénéité, le bassin de l'Oubangui a été sectorisé en **trois tronçons homogènes** (le haut, le moyen et le bas-Oubangui). D'amont en aval, la rivière présente un style fluvial très diversifié. La rivière coule principalement sur des formations précambriennes et quaternaires. Sa capacité de transport solide est faible ($D_{50} = 0,3 \text{ mm}$) malgré son module annuel très élevé ($37\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$). La rivière exporte plus de **Matières Dissoutes** que de **Matières en Suspension**. La rivière charrie seulement des **alluvions fines** à cause de son substratum dur et résistant à l'érosion linéaire. Son régime fluvial est du type « simple » monomodal, avec un pic d'écoulement au mois d'octobre. La rivière est connue pour son irrégularité interannuelle. Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, l'Oubangui rentre dans une phase de **sécheresse hydrologique** qui influence son module d'écoulement interannuel. La gestion des ressources en eau de l'Oubangui, de la Sangha et du fleuve Congo, est l'œuvre de la **CICOS**, cette commission qui regroupe les six Etats membres dont le but principal est de promouvoir la navigation sur les principaux axes fluviaux du bassin du Congo.*

Chapitre 3 – Les enjeux environnementaux contemporains sur l'Oubangui

La problématique environnementale est au cœur des préoccupations majeures du 21^{ème} siècle. Dans ce troisième chapitre, nous abordons les enjeux environnementaux sur le bassin de l'Oubangui. Nous présentons dans un premier temps les enjeux liés aux changements climatiques, et dans un second temps, les enjeux liés aux aménagements fluviaux.



A- Les enjeux liés aux Changements Climatiques

1- Les effets des forçages hydroclimatiques sur l'Oubangui

A l'instar des grands bassins tropicaux, le bassin du Congo est considéré comme l'un des *hotspots* du changement climatique dont les effets se traduisent par une variabilité dans le régime d'écoulement interannuel. Le pic de ces variations est atteint dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, où une sécheresse s'est installée depuis, avec comme conséquence, une réduction de l'écoulement de décennie en décennie [Laraque & al., 1997 ; Laraque, 2013].

Origine de la sécheresse hydrologique dans le bassin du Congo

Nombreux, sont les auteurs qui attribuent la cause « climatique » aux variations hydrologiques du dernier siècle. Tardy & Probst (1992) ont par exemple montré que l'origine de cet aléa se trouve dans des anomalies dans la position de la *ZCIT* (*Zone de Convergence Inter-Tropicale*), qui est de fait le régulateur du régime pluviométrique en domaine intertropical. La *ZCIT* (ITCZ en anglais) est cette ceinture intertropicale où se convergent les masses d'air (alizés) venant des deux hémisphères. Le front entre les alizés nord et sud entraînent des oscillations périodiques de la *ZCIT* autour de l'équateur (*fig. 36*).

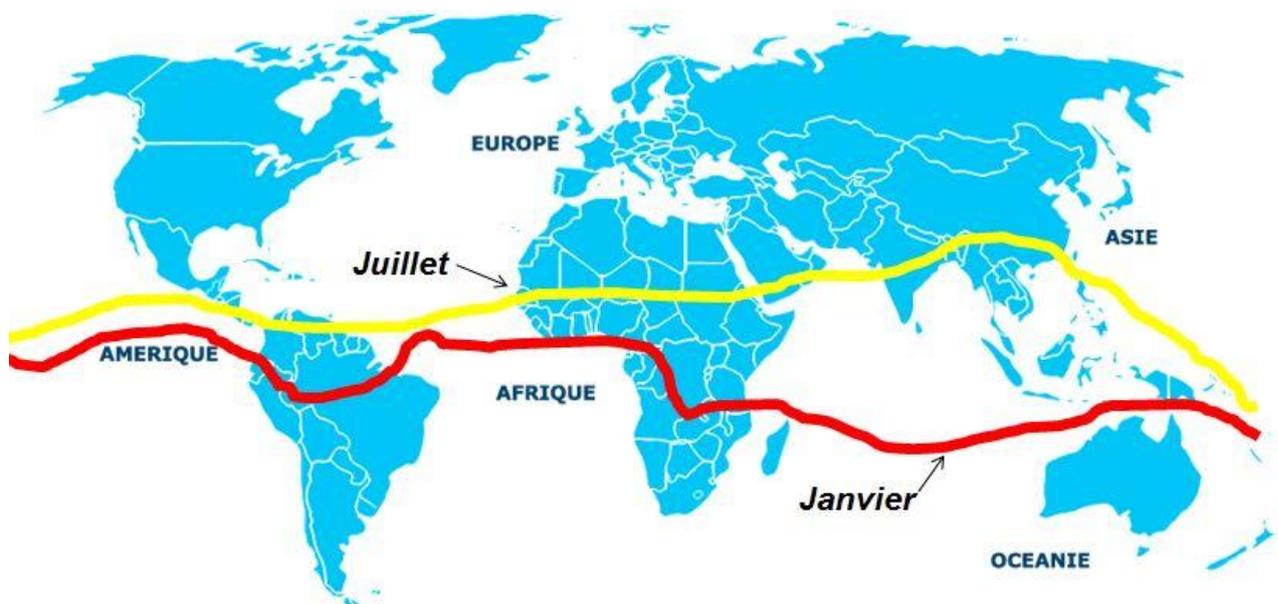


Fig. 36 – Position annuelle de la ZCIT. Source NASA
Fig. 36 – Annual position of the ITCZ. Source NASA

Il convient de remarquer que, c'est au mois de *juillet* que la *ZCIT* migre vers le nord de l'équateur et cela se traduit par un excès pluviométrique (pluie de mousson) ; puis elle

redescend en *janvier* pour installer la saison sèche. La migration latitudinale de la ZCIT est conditionnée par la position des cellules anticycloniques situées au nord et au sud de l'équateur. Pour l'Afrique intertropicale, ces cellules anticycloniques sont: *au nord, l'anticyclone des Açores, qui est plus ou moins associé à l'anticyclone continental ; et au sud, l'anticyclone de Sainte-Hélène* [Callède & al., 2010]. Des anomalies dans leurs positions peuvent conduire cependant à des événements extrêmes (crues ou étiages) dans les bassins tropicaux. L'exemple du Pacifique, où des anomalies dans la position de la ZCIT se traduisent par des oscillations australes dénommées *ENSO (El Niño Southern Oscillation)*.

Oubangui, rivière la plus affectée dans tout le bassin du Congo ?

Dans ce contexte de variabilités hydrologiques (sécheresse généralisée), l'Oubangui semble être la rivière la plus affectée par le déficit d'écoulement sur l'ensemble du bassin du Congo ; et pour cause, l'imperméabilité de son substratum géologique qui accentue les variabilités. Selon Laraque & al (2001), l'Oubangui coule sur un substrat géologique imperméable, composé majoritairement des cuirasses ferrugineuses qui réduisent l'infiltration et accentuent l'écoulement superficiel. Contrairement à l'Oubangui, les chercheurs ont montré que les rivières coulant sur un substrat perméable, composé de grés poreux, à l'image du *Kouilou*³, sont capables de stocker un excès d'eau afin de réguler leur débit d'étiage.

Comparativement à *l'Oubangui*, le fleuve *Congo* est moins sensible aux effets des variabilités hydrologiques comme l'est aussi le *Kouilou*. Les récents travaux de Laraque & al. (2013) ont souligné une sorte « *d'inertie* » du fleuve Congo face aux effets des sécheresses de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Une inertie résultant de la diversité des affluents du fleuve Congo à soutenir son écoulement lors des phases critiques. En effet, le fleuve Congo peut se réjouir de sa situation équatoriale (*fig. 2*) qui lui permet de collecter les *crues boréales de l'Oubangui* dans l'hémisphère nord, et les *crues australes* de la rivière *Kasaï* dans l'hémisphère sud. Ce mélange des eaux boréales et australes est un atout remarquable pour le fleuve Congo à faire face aux effets des variabilités hydrologiques.

Force est de constater que la variabilité du régime d'écoulement de l'Oubangui a suscité l'intérêt de nombreuses recherches auprès des hydrologues tropicaux tels que : Olivry,

³ *Le Kouilou est un court fleuve drainant le plateau du Mayombe en République Démocratique du Congo. À l'image du fleuve Congo, le Kouilou se déverse dans l'océan Atlantique.*

Orange, Feizouré, Wesselink, Callede, Laraque, Mahé, Briquet, Runge et Nguimalet. Les recherches les plus communes concernent la détermination de la période de perturbation du régime d'écoulement de l'Oubangui. Ainsi, Laraque & al. (2013) et Nzango & al. (2017) ont utilisé un test statistique de « rupture », notamment le *test non paramétrique de Pettitt*, pour rechercher des discontinuités dans le régime interannuel de l'Oubangui à la station de Bangui. Ce test statistique est dérivé du *test de Mann-Whitney*, et permet de détecter « une rupture unique » à date inconnue. Il est particulièrement plus sensible à un changement de moyenne et, si l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série est rejetée, il propose une estimation de la date de rupture [Faye, 2015]. L'application du *test de Pettitt* a permis de détecter une rupture commune en **1970** ; celle-ci repartit l'écoulement interannuel en deux (2) grandes phases hydrologiques majeures [Pandi & al., 2009] :

- ✓ **Une phase humide antérieure à 1970**, avec un module interannuel de **4415 m³/s** dont le maximum moyen se trouve en 1969 (5361 m³/s) (*fig. 37*);
- ✓ **Une phase sèche Post 70**, avec un module interannuel de **3149 m³/s** dont le minimum se trouve en 1990 (2285 m³/s). Depuis 1970, l'Oubangui enregistre un déficit d'écoulement de **30%** à la station de Bangui.

L'année 1970 semble marquer à la fois pour l'Afrique occidentale comme pour l'Afrique centrale, l'accident hydroclimatique majeur du 20^{ème} siècle annonçant sa principale période d'écoulement déficitaire [Laraque & al., 2012]. La rupture de 1970 a été constatée sur la plupart des chenaux Africains dont le *Niger* à *Niamey* (Servat, 1998), le *Logone* à *Laï* (Servat, 1998), la *Sangha* à *Ouéssou* (Laraque & al., 2012), la *Sanaga* à *Edéa* (Kpoumié, 2016).

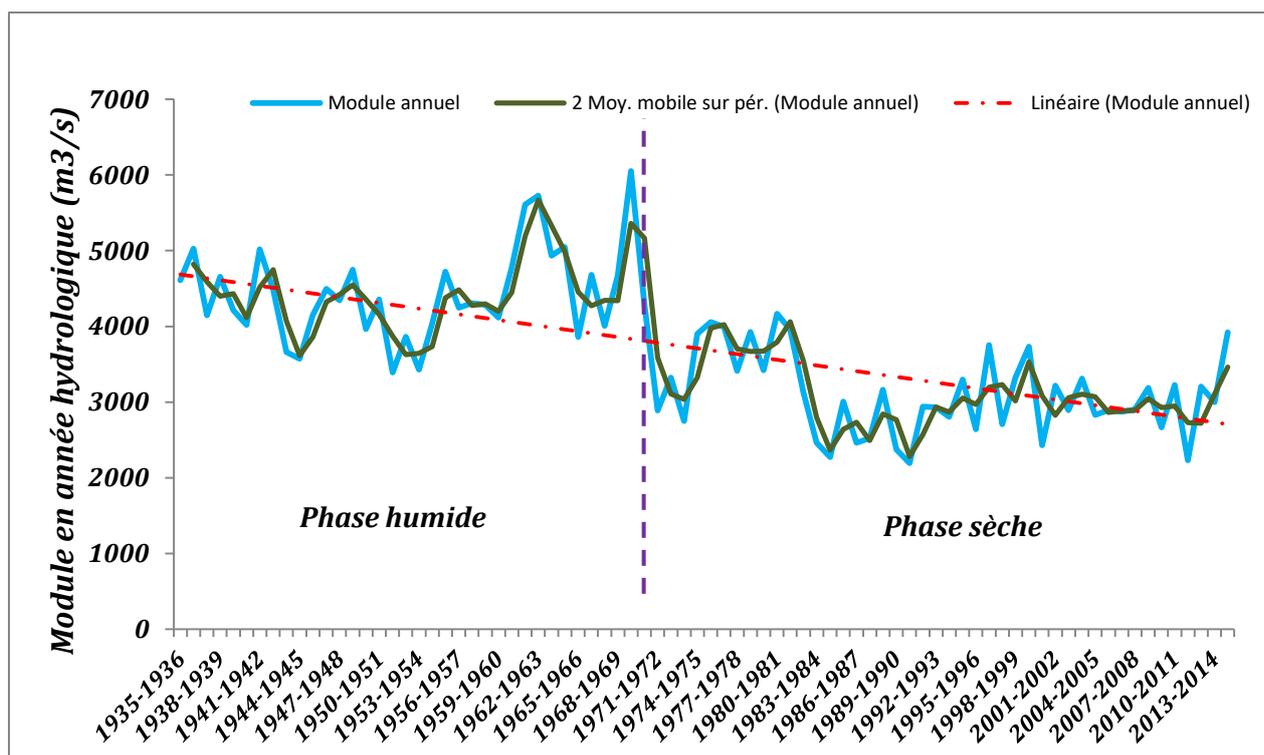


Fig. 37 – Tendence d’écoulement de part et d’autre de 1970
Fig. 37 - Trend of flow on both sides of 1970

2- Déficit d’écoulement et impact sur la navigabilité de l’Oubangui

Le point précédent a permis de montrer que l’Oubangui est entré dans une phase sèche depuis le début des années 1970, et cela a entraîné un déficit d’écoulement de 30% à la station de Bangui. Ce déficit d’écoulement, et son corollaire, *l’ensablement*, a aussi eu des effets sur la navigabilité sur l’axe fluvial **Oubangui-Congo**, qui est un axe historique de transport de gros tonnage entre les villes de Bangui (Centrafrique) et de Brazzaville (Congo-Brazzaville). Cet axe représente également la principale artère du « désenclavement » de la République Centrafricaine via le port de Brazzaville en République du Congo. Les archives recueillies auprès des services hydrologiques nationaux et internationaux ont permis d’appréhender le recul de la navigabilité sur l’Oubangui durant ces dernières décennies. Il serait étonnant de constater que l’Oubangui était navigable sur plus de 1 000 km dans les années 1930 (*fig. 38*). À fortiori, quelques portions de ses affluents étaient aussi navigables par des petits vapeurs.

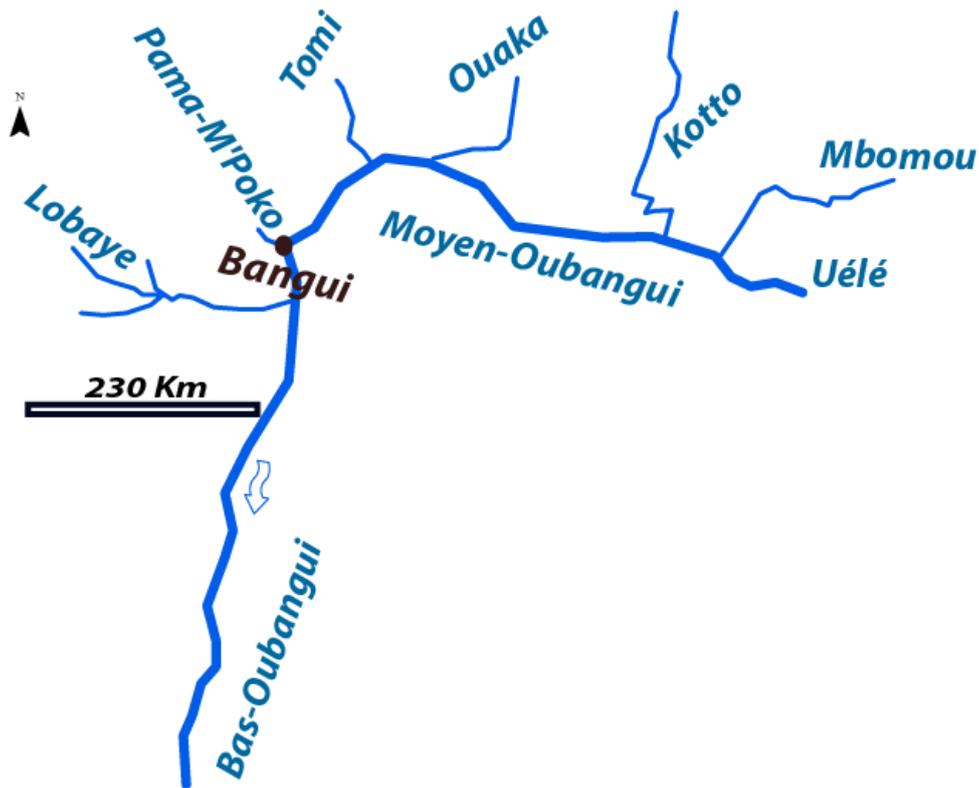


Fig. 38 – Portions navigables sur le bassin de l’Oubangui en 1931. Source : Archives de l’Institut Cartographique de Paris. Adapté.

Fig. 38 - Navigable networks on the Oubangui basin in 1931. Source: Archives of the Cartographic Institute of Paris. Adapted.

Cependant, la navigabilité ne s’effectue plus de manière permanente sur l’Oubangui depuis 1970 du fait de la réduction d’écoulement et de l’ensablement du chenal. La rivière est de nos jours navigable seulement sur une longueur d’environ 600 km en aval de Bangui, et cela ne s’effectue qu’en saison de hautes eaux suite à des travaux d’entretiens réalisés par le SCEVN pour garantir un tirant d’eau nécessaire à la navigation. Selon la CICOS, le nombre de jours non navigable sur le bief Bangui-Brazzaville passe de 4 jours par an entre 1935-1971, à 40 jours/an entre 1972-1982, à 107 jours/an entre 1983-1989, et à plus de 200 jours/an depuis 2002. La situation n’est pas sans préjudice économique pour les gestionnaires de la Société Centrafricaine de Transport Fluvial (**SOCATRAF**). Les habitants de la ville de Bangui payent aussi les frais de ces irrégularités à travers la hausse des produits manufacturés et du carburant qui sont importés depuis le port de Brazzaville en République du Congo. Un barrage devrait naître sur l’Oubangui à hauteur de Palambo dont l’un des fonctions sera de réguler le débit de cette rivière pour soutenir la navigabilité entre Bangui-Brazzaville. En attendant, le ravitaillement du Centrafrique se fait de manière intermittente par la voie fluviale, et depuis

quelques années par la voie routière depuis Douala au Cameroun. Ce nouveau corridor routier s'avère plus rapide que le corridor fluvial en termes de durée de livraison. Un camion-remorque met en moyenne 3 jours pour atteindre Bangui depuis le port de Douala, contrairement à un bateau qui met en moyenne 10 jours pour accoster à Bangui depuis le port de Brazzaville. Malgré son délai de livraison express, le transport routier reste le mode de transport le moins efficace en termes d'échanges de gros tonnage comparativement au transport fluvial.

3- Les ajustements morphologiques de l'Oubangui aux forçages hydroclimatiques

Des *ajustements morphologiques* ont été enregistrés sur le chenal de l'Oubangui à la suite des variabilités hydrologiques observées depuis cinquante (50) ans. L'analyse d'une série de photographies aériennes prises sur l'Oubangui au secteur de *Bangui* (Pk 1600) a permis de suivre de *manière diachronique* les réponses fluviales de la rivière suivant les fluctuations interannuelles du module (*fig. 39*). Les photographies utilisées ont une échelle de 1/50 000^{ème}, et correspondent aux images prises lors des missions historiques de l'IGN en Centrafrique. Une analyse diachronique a été faite sur un SIG, en l'occurrence, sur ArcGIS, et cela a permis de mettre en évidence deux grandes phases majeures d'ajustements morphologiques (*fig. 39*) : en premier lieu, *une phase humide* regroupant les années 1946 et 1960, dont la tendance d'écoulement est relativement excédentaire ; et en second lieu, *une phase sèche*, regroupant les années 1982 et 2011, dont la tendance d'écoulement est relativement déficitaire, et cela se traduit spatialement par un processus *d'ensablement* et de *végétalisation* du chenal. L'ensablement est très prononcé en 1982 avec un taux de sédimentation avoisinant les 30%, alors que ce taux n'est que de 27% en 2011, 22% en 1946 et 21% en 1960. La végétalisation du lit s'opère par la colonisation des bancs alluviaux non remaniés par des espèces herbacées (*ex : Imperata cylindrica, Hyparrhenia, Pennisetum purpureum*), puis arbustives (*ex : acajous, acacia, manguiers*), et enfin ligneuses. L'ensablement et la végétalisation de certains tronçons de l'Oubangui ont pour effet de rétrécir la largeur du chenal et de réduire la profondeur du lit ainsi que des passes navigables. La part des aménagements hydrauliques, notamment des barrages sur l'Oubangui dans ce processus d'ajustement morphosédimentaire de l'Oubangui est encore méconnue. C'est pourquoi nous allons analyser dans la deuxième partie de ce travail, l'influence des barrages de l'Oubangui, notamment le barrage de *Mobaye* sur la continuité sédimentaire de l'Oubangui.

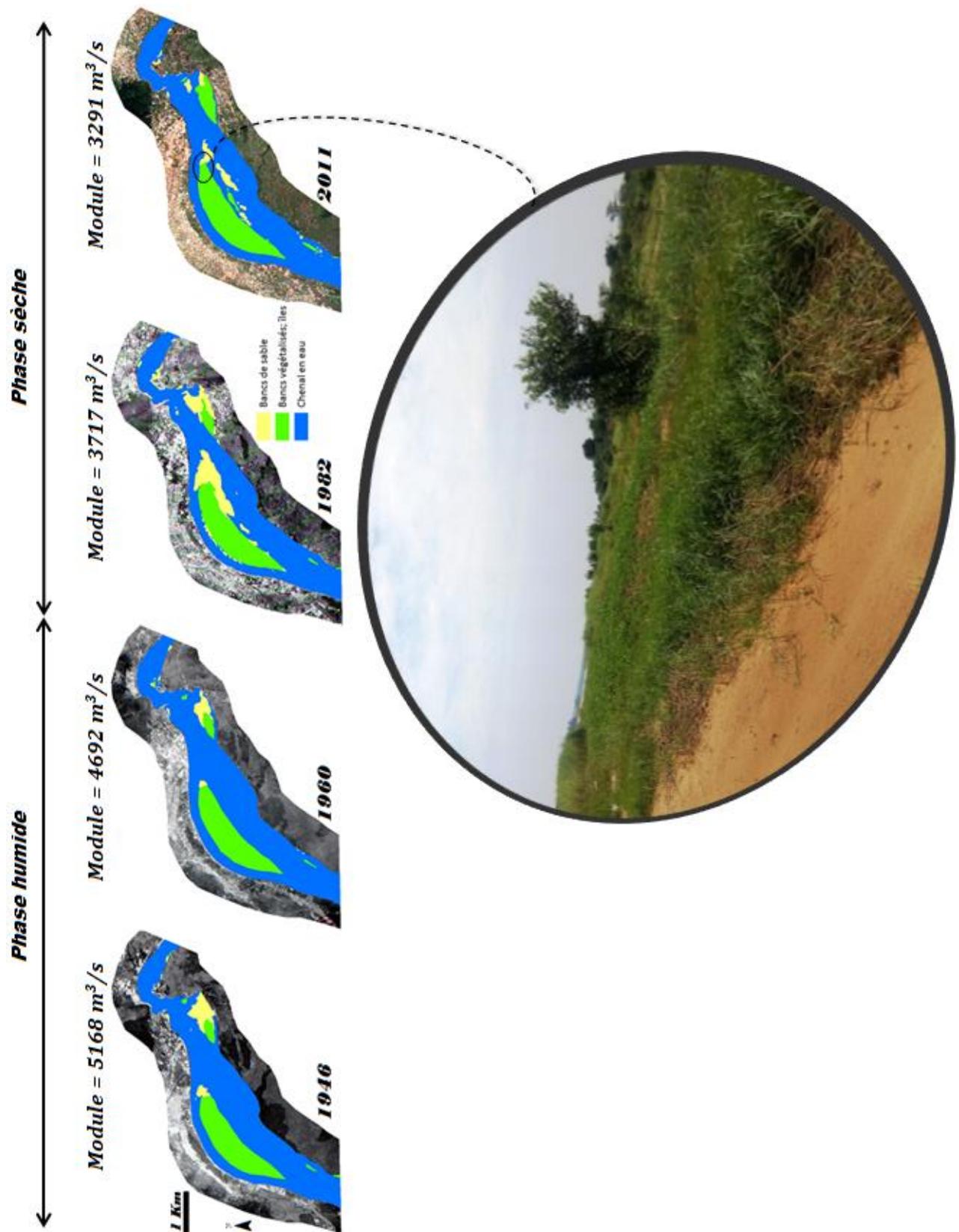


Fig. 39 – Suivi diachronique du lit de l’Oubangui au secteur fonctionnel de Bangui
Fig. 39 – Diachronic monitoring of the Oubangui bed in the functional area of Bangui

B- Les enjeux liés aux aménagements fluviaux

1- Les aménagements pour l'amélioration des conditions navigables

Il fut un temps, avant la concurrence des voies ferroviaires, routières et aériennes, où la voie fluviale assumait l'essentiel du transport des marchandises. C'est pour cette raison que la ville d'Orléans fut le premier port fluvial français au 19^{ème} siècle, car la Loire, le fleuve royal, fut un axe vital pour l'économie française des 18^{ème} et 19^{ème} siècles [Grivel, 2008]. Alors, d'importants travaux d'aménagements ont été réalisés sur le cours de la *Loire moyenne* afin de le rendre navigable et économique viable. Ce savoir-faire fluvial réalisé sur la Loire sera d'ailleurs exporté dans les nouvelles colonies [Grivel, 2008]. Sur l'Oubangui, les premiers aménagements ont aussi servi à améliorer les conditions navigables à l'endroit des zones de ruptures de pentes (chutes, rapides, cascades etc.) qui entravaient la remontée du cours de l'Oubangui par les bateaux de faible puissance. Rappelons que l'Oubangui a été un itinéraire d'exploration et une voie de pénétration historique au centre de *l'Afrique Equatoriale Française* de [Yayer, 1951]. Des projets d'écluses ont été élaborés pour dompter les rapides de l'Oubangui, notamment les rapides de Zinga, de Bangui et de Mobaye etc. Ensuite l'utilisation en nombre des vapeurs équipés de puissants moteurs a mis fin à plusieurs projets d'écluses, y compris celui de **l'écluse** de Mobaye.

En revanche, à partir de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, l'obstacle majeur à la navigabilité sur l'Oubangui devient « *l'ensablement* ». Ce phénomène concerne aussi certains tronçons du fleuve Congo (y compris le port de Brazzaville). Le SCEVN, organe d'entretien des voies navigables, opère régulièrement à des travaux de *dragages* sur le bief *Bangui-Brazzaville* (Oubangui-Congo) (*photo 4*). Le SCEVN commercialise une partie du sable dragué auprès des entreprises de génie civil, et le reste est souvent réinjecté dans les secteurs moins alluvionnés afin de rééquilibrer la dynamique sédimentaire.



Photo 4 – Baliseur Oubangui à quai au siège du SCEVN de Bangui. Cliché: Nzango C. 2015
Photo 4 – The Ubangui Balliser on the wharf at the headoffice of the Bangui SCEVN. Photo: Nzango

Hormis les travaux d’entretien effectué par le SCEVN, la CICOS, en partenariat avec l’Union Européenne et l’Union Africaine, a mis en place en 2009 un système « *d’alerte d’étiage* » permettant d’optimiser le trafic fluvial sur l’Oubangui-Congo. Il s’agit du fameux programme **AMESD** (*African Monitoring of the Environment for Sustainable Development*) qui a été suivi par **MESA** (*Monitoring for Environment and Security in Africa*). Le système permet de mesurer la hauteur d’eau en amont via des capteurs satellitaires (**EUMETcast**) afin de prévoir le passage des bateaux au niveau des seuils sableux et rocheux.

Le principal seuil d’obstacle à la navigation entre Oubangui-Congo est le seuil de *Zinga* au Pk 1 670, qui est un seuil à la fois sableux et rocheux. À *Zinga*, l’Oubangui présente un tronçon à la fois large (maximum 5,5 km) et étroit au niveau des rapides (*fig. 40*), mais la « passe navigable » sur ce tronçon est moins large et moins profonde, cela nécessite d’importants travaux d’entretiens (dragage et dérochement) de la part du SCEVN pour élargir et approfondir la passe navigable en vue d’obtenir un tirant d’eau supérieur ou égal à 0,90 m.

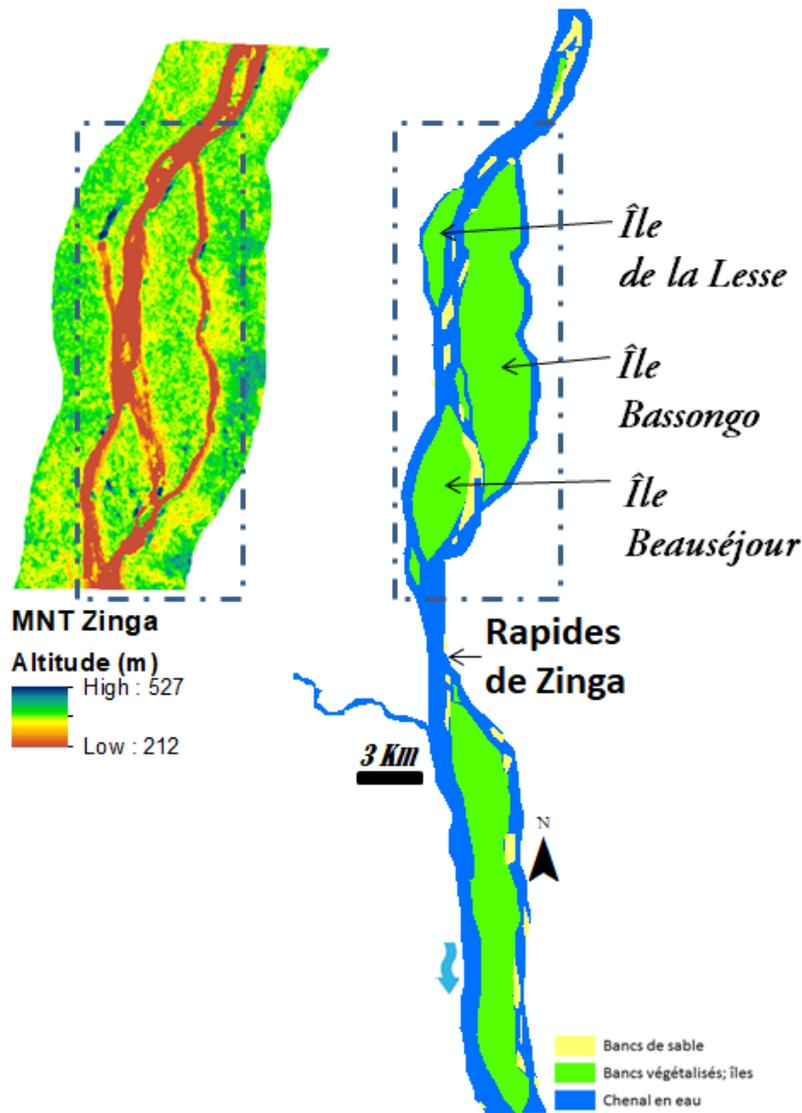


Fig. 40 – Seuil de Zinga, principal obstacle à la navigation sur l’Oubangui-Congo
Fig. 40 – Limit of Zinga, main obstacle to navigation on Oubangui-Congo

Selon Censier (1995), l’ensablement est l’une des caractéristiques sédimentologiques principales du chenal de l’Oubangui. Il obstrue l’écoulement en limitant les possibilités de navigation durant la période des décrues, mais structurent également la morphologie fluviale de l’Oubangui (*photo 5*). Yayer (1951), a de ce fait montré que, « *c’est lors des décrues que les bancs de sable affleurent en surface sous forme de « chapelets de bancs de sable » dérivant doucement vers l’aval en se déformant, s’effilochant, se divisant et se soudant comme font les nuages dans le ciel [...] Leur vitesse moyenne de progression est variable suivant les lieux ; elle est généralement de 100 à 200 mètres par an* ». Le trop-plein de sables sur l’Oubangui est principalement extrait de manière artisanale par les riverains pour fins de commercialisation.

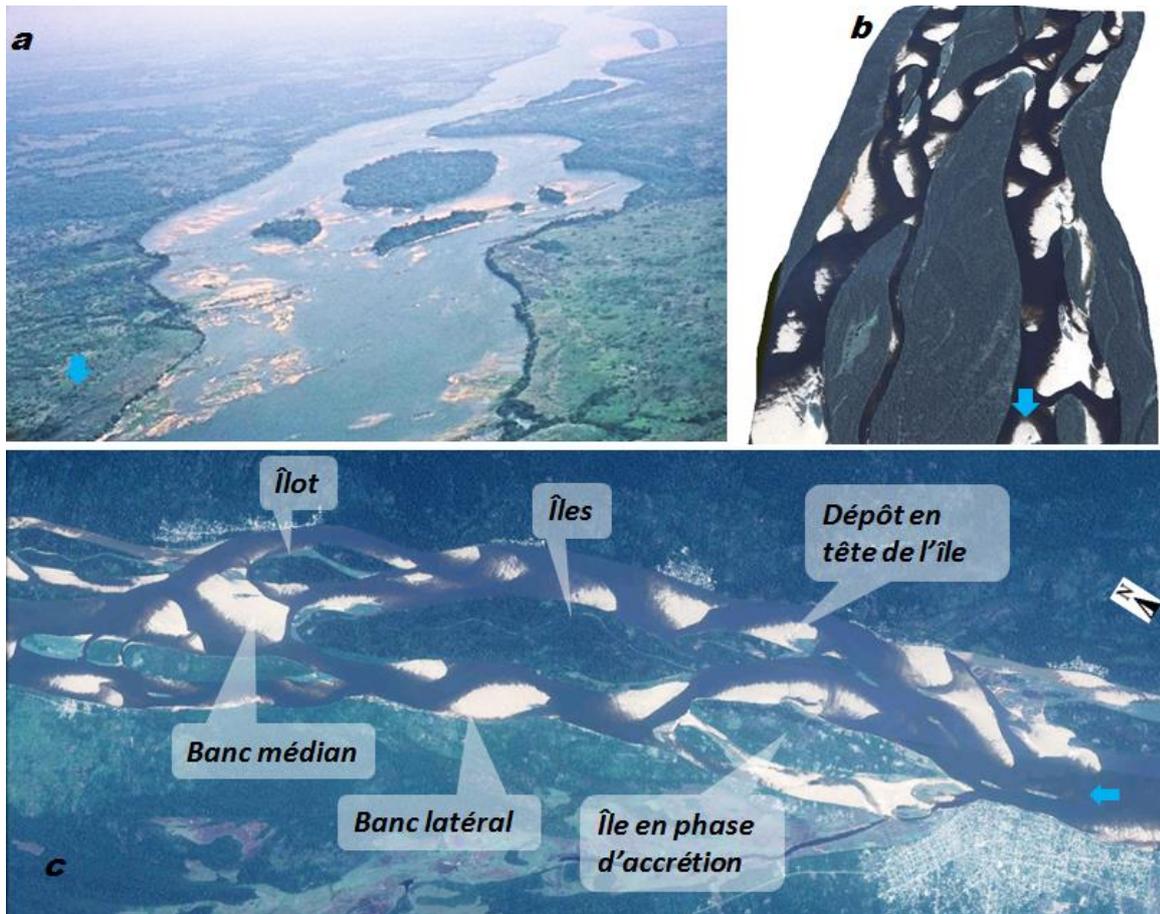


Photo. 5 – Ensablement de l’Oubangui : a) Oubangui à Palambo au Pk 1540; b) Oubangui à Bobangui au Pk 2100; c) Oubangui à Impfondo au Pk 1950.

Photo. 5 – Siltation of the Ubangui : a) Ubangui at Palambo; (b) Ubangui at Bobangui; c) Ubangui at Impfondo

Au secteur fonctionnel de Bangui par exemple, l’extraction du trop-plein de sables se fait le plus souvent lors des décrues, soit dans le fond du chenal, soit en tête de l’île Mbongo (photo 6). Les sables extraits sont tamisés avant d’être vendus, les plus grossiers sont les plus chers, et sont généralement vendus aux entreprises de génie civil pour des travaux en bâtiments et travaux publics. L’industrie artisanale de sable au secteur de Bangui concentre des centaines à des milliers de personnes. Au même titre que la pêche, les rémunérations pour les activités autour de sable se font de façon journalière et non mensuelle. C’est au crépuscule que le patron rémunère en espèce les préleveurs et les chargeurs de sables. Les préleveurs sont les ouvriers qui s’occupent d’extraire le sable dans la rivière ou sur les bancs alluviaux. Ces derniers sont dotés de ce secret ancestral. Tandis que les chargeurs ne sont personne d’autres que les ouvriers qui s’occupent de charger manuellement les tas de sables dans une camionnette lorsque ceux-ci ont été déjà achetés par un client.

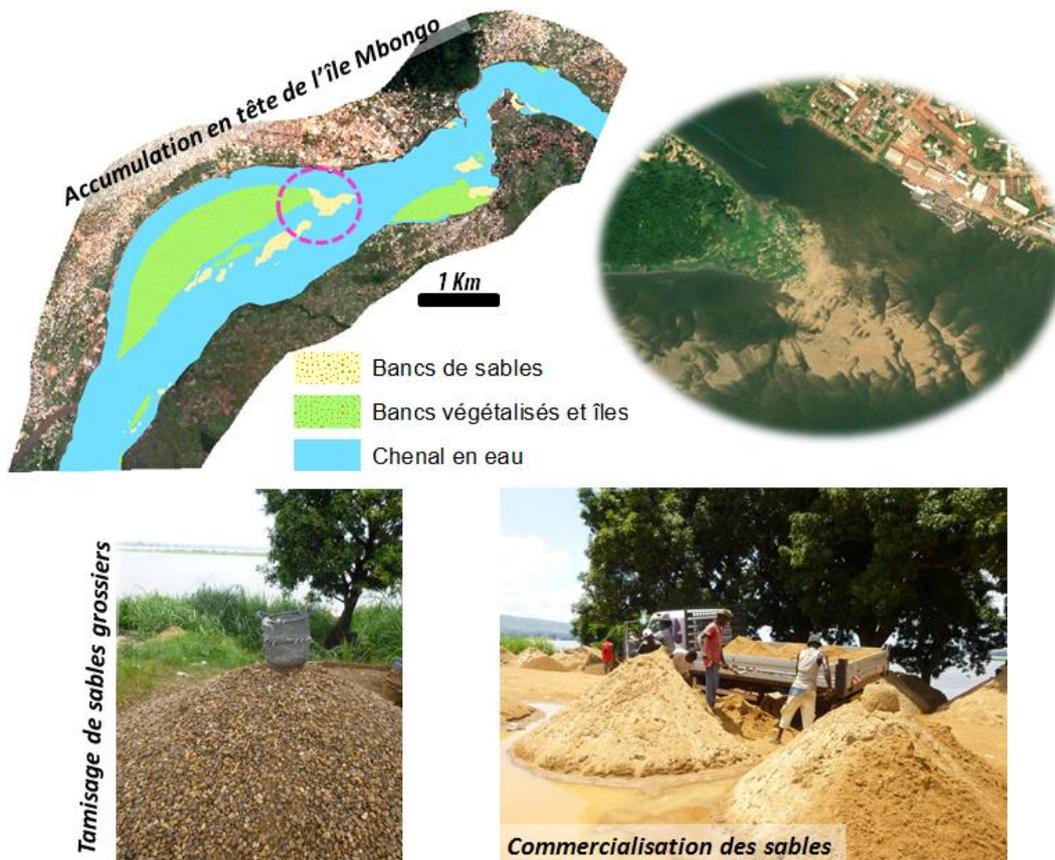


Photo 6 – Extraction et commercialisation de sables sur l’Oubangui à la tête de l’île Mbongo

Photo 6 – Extraction and marketing of sands on the Ubangui at the head of Mbongo Island

Les activités de commercialisations de sables sont très dépendent du régime hydrologique, alors qu’un barrage-réservoir multifonctionnel est projeté sur l’Oubangui dans la localité de Palambo. On sait très peu de chose sur les effets prévisibles de cet ouvrage sur les activités d’extraction de sable sur l’Oubangui. Il a été démontré ailleurs que les variations du régime hydrologique est le premier impact observé dès la fermeture d’un barrage. Nous vérifierons le fondement de cette hypothèse dans la troisième partie de notre travail qui traite de « l’impact des barrages planifiés sur le régime hydrosédimentaire l’Oubangui »

Bien qu’elles se fassent de manière artisanale, les activités d’extraction de sables peuvent toutefois perturber l’équilibre sédimentaire de l’Oubangui et engendrer un enfoncement du chenal dans les secteurs d’extraction. A l’heure actuelle, aucune étude d’impact n’a été réalisée en vue de déterminer les effets réels de cette activité sur le bilan morphosédimentaire de l’Oubangui. Notons que les perturbations morphosédimentaires liées aux extractions de granulats ont fait l’objet de plusieurs études à partir des années 1980 [Maire & Gobert, 1981 ; Beck & Corbonnois, 2016]. Sur le Rhône par exemple, les extractions de granulats ont été faites pour deux objectifs majeurs [Bravard, 2016] : 1) pour gérer l’excès de la charge de fond

du Rhône qui posait des problèmes à la production hydroélectrique du barrage de Génissiat au 20^{ème} siècle ; 2) pour satisfaire la demande régionale en granulat d'après-guerre. Il en résulte après, une incision du fleuve par endroit. De même, Beck & Corbonnois (2016), ont constaté une diminution de la bande active du chenal de la Moselle et une colonisation végétale dans les fosses d'extractions après extraction massive de granulats. Enfin, sur l'un des fleuves nourriciers d'Afrique tropicale, le Niger, Ferry & al. (2012), ont observé une tendance à l'incision du chenal dans son tronçon supérieur suite aux extractions massives de sables dans les années 1980. Ce qui précède montre qu'il serait intéressant de procéder à un diagnostic à l'endroit des sites d'extractions de sables afin de quantifier l'influence de ces activités sur le processus sédimentaire de l'Oubangui.

Il convient de remarquer aussi que, l'une des raisons pouvant expliquer l'ensablement de l'Oubangui est l'anthropisation de son bassin. La déforestation semble vraiment contribuer à injecter des sédiments dans la rivière. À travers des *images satellites Landsat*, nous avons pu mettre en évidence les changements d'occupation du sol au secteur de Bangui (*fig. 41*). Sur l'emprise spatiale étudiée, nous constatons que la forêt dense a perdu près de 18% de sa surface végétale entre 1986 et 2010, cela contribuerait indirectement à accroître le ruissellement et le drainage des *colluvions* vers la rivière.

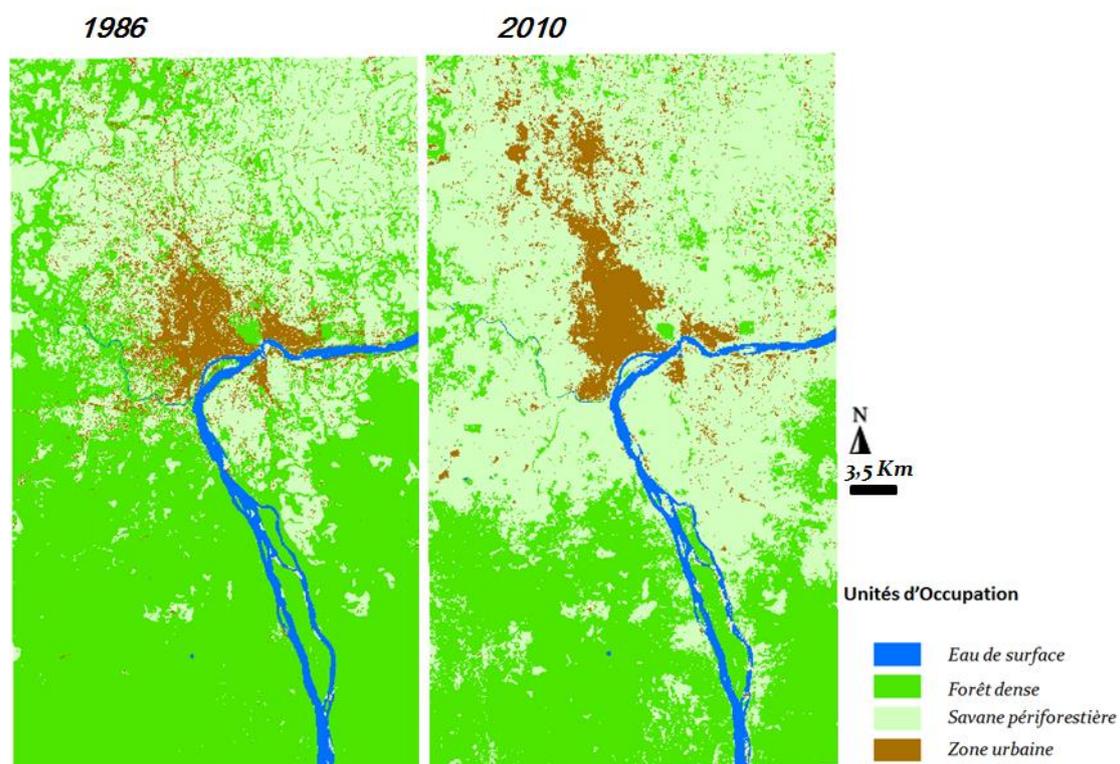


Fig. 41 – Carte d'occupation du sol à Bangui
Fig. 41 – Landuse map in Bangui

2- Les aménagements pour la production hydroélectrique

On l'a vu, le bassin de l'Oubangui est doté d'immenses potentialités hydrauliques et navigables grâce à son réseau hydrographique dense et bien arrosé. En outre, le bassin regorge de nombreux rapides et cascades qui offrent des sites remarquables aux aménagements hydroélectriques. Tout laisse croire que ce bassin représente un « scandale hydrologique » à l'égard de ces voisins, notamment les bassins sahéliens. Près de cinquante ans aujourd'hui, les pays membres de la CBLT continuent toujours à militer pour un transfert d'eau de l'Oubangui vers le sahel (lac Tchad). Seulement, le bassin de l'Oubangui demeure parmi les bassins fluviaux les moins aménagés du globe malgré ses énormes potentialités. La rivière Oubangui et ses affluents n'ont connu que très peu d'aménagements hydrauliques. Hormis la petite centrale hydraulique de *Nzoro*, notre bassin n'a connu que deux constructions hydroélectriques, à savoir : *le barrage de Mobaye* sur l'Oubangui (*Pk 1 250*), et *le complexe hydroélectrique de Boali* sur la rivière Mbali (sous-affluent de l'Oubangui). Ajoutons à ces deux établissements hydroélectriques existants, deux autres barrages projetés, à savoir : le barrage de *Palambo* sur la rivière *Oubangui* et celui de *Bria* sur la rivière *Kotto* (affluent de l'Oubangui). Les deuxième et troisième parties de cette thèse étudieront l'impact négatif de toutes les infrastructures hydrauliques sur l'Oubangui. Mais avant cela, nous allons présenter succinctement chacune de ces structures dans les paragraphes suivants.

2.1- Le barrage sur l'Oubangui à Mobaye

La rivière Oubangui a été court-circuitée en 1989 à l'échelle des rapides de ***Mobaye*** par un barrage hydroélectrique. Nous rappelons encore que l'Oubangui est une rivière transfrontalière et contiguë entre le Centrafrique (ancienne colonie Française) et le Congo-Démocratique (ancienne colonie belge). Cette frontière naturelle s'étend sur plus de 600 kilomètres. C'est à hauteur de Mobaye (*photo 7*) que le barrage a été érigé dans le but d'approvisionner les villes de ***Mobaye-Mbanga*** en rive droite (République Centrafricaine) et ***Mobaye-Mbongo*** en rive gauche (République du Congo-Démocratique), ainsi que leurs environs. La propriété du barrage revient à l'Etat Congolais. Le porteur du projet de barrage fut le ***Maréchal Mobutu***, ancien dirigeant Congolais. Son idée de départ consistait à construire un « *pont-barrage* » à hauteur de Mobaye. Le pont devrait servir de trait d'union entre les deux pays, surtout de rapprocher les peuples *Ngbandi* situés en rive gauche et rive droite. Quant au barrage, il devrait servir à alimenter en électricité la commune de *Gbadolité* situé en rive gauche, dans lequel se trouve l'un des palais de Mobutu. La maîtrise d'œuvre du

Le pont-barrage était attribué au Cabinet Tractionel Électrobel Engineering de Bruxelles, assisté de l'Institut de Génie-civil de l'Université de Liège et du célèbre Bureau d'Études Coyne & Bellier de Paris [Callède & al, 2010]. Pour des raisons géopolitiques, le pont-barrage n'a pas été finalisé, celui-ci a été érigé finalement en « *demi-lit* » (photo 7). Très contesté avant sa construction, l'avènement du barrage a contribué ainsi à améliorer certaines conditions sociales de vies des autochtones des villes de Mobaye-Mbongo et Mobaye-Mbanga et leurs environs. *Mais qu'en est-il des effets hydrologiques de cet aménagement sur l'hydrosystème de l'Oubangui à Mobaye? Sachant que l'ouvrage hydraulique de Mobaye est inachevé, il n'obstrue que partiellement la largeur du lit de l'Oubangui sur ce secteur, n'exerce-t-il pas une demi-influence de cet ouvrage sur la dynamique fluviale de l'Oubangui ?*

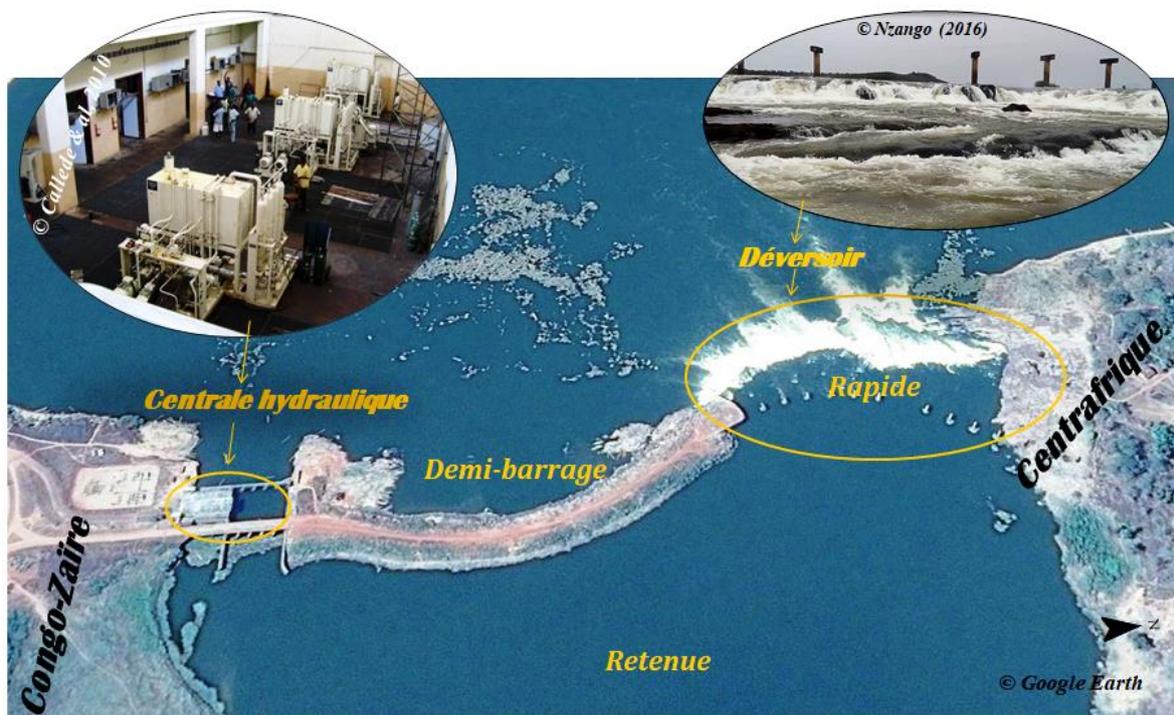


Photo 7 – Le demi-barrage de Mobaye sur l'Oubangui
Photo 7 – The half dam of Mobaye on Oubangui

2.2- Le barrage sur la rivière Mbali à Boali

Dans la localité de **Boali** ($18^{\circ} 00' 05'' E$, $4^{\circ} 55' 10'' N$), la rivière *Mbali* a subi un bon nombre d'aménagements depuis le début des années 1950 contrairement à la rivière Oubangui où son aménagement hydroélectrique ne remonte qu'en 1989. Les ouvrages hydroélectriques de *Boali* sont destinés principalement à produire de l'énergie pour alimenter la ville de *Bangui* distant de 90 km du site d'aménagement. La ville de *Bangui* est fondée en 1889 pour abriter

en effet la capitale de Centrafrique (ancien Oubangui-Chari). Jusqu'en 1951, l'unique source d'approvisionnement en électricité de la ville de Bangui demeurait la *centrale thermique* qui dispose d'une capacité de production de 22 MW. Or, la période de l'après-guerre mondiale est marquée par une croissance urbaine rapide dans les Territoires d'Outre-Mer (TOM), et cela a pour corollaire, d'accroître les besoins en énergie dans les grandes agglomérations. Dans cette course à la mondialisation post-conflit, les quatre pays membres de l'AEF (Afrique Equatoriale Française), dont le Centrafrique faisait partie, se sont lancés dans un défi d'aménagement hydraulique. Le premier des quatre à construire un barrage est la République du Congo-Brazzaville, avec l'édification en 1953 du barrage hydroélectrique de *Brazzaville* sur la rivière *Djoue*, affluent du fleuve *Congo* [Mehyong & Ndong, 2011]. En réponse, le Centrafrique a érigé en 1954 la centrale hydraulique de *Boali 1* sur la rivière *Mbali* afin de satisfaire les besoins énergétiques de la ville de Bangui en pleine extension (*fig. 42*). Puis, une deuxième centrale hydraulique (*centrale de Boali 2*) a été installée en 1976 sur la même rivière. Les deux centrales sont aménagées « au fil de l'eau » et produisent une capacité totale de 18,65 MW d'énergie. Enfin, un barrage réservoir a été aménagé en 1991 pour réguler le débit instable de la rivière Mbali (*fig. 32*) en vue d'optimiser la production hydroélectrique des deux centrales préexistantes. Le barrage devrait produire 10 MW d'énergies supplémentaires à travers une nouvelle centrale hydraulique (*centrale de Boali 3*) qui alimentera la capitale Centrafricaine.

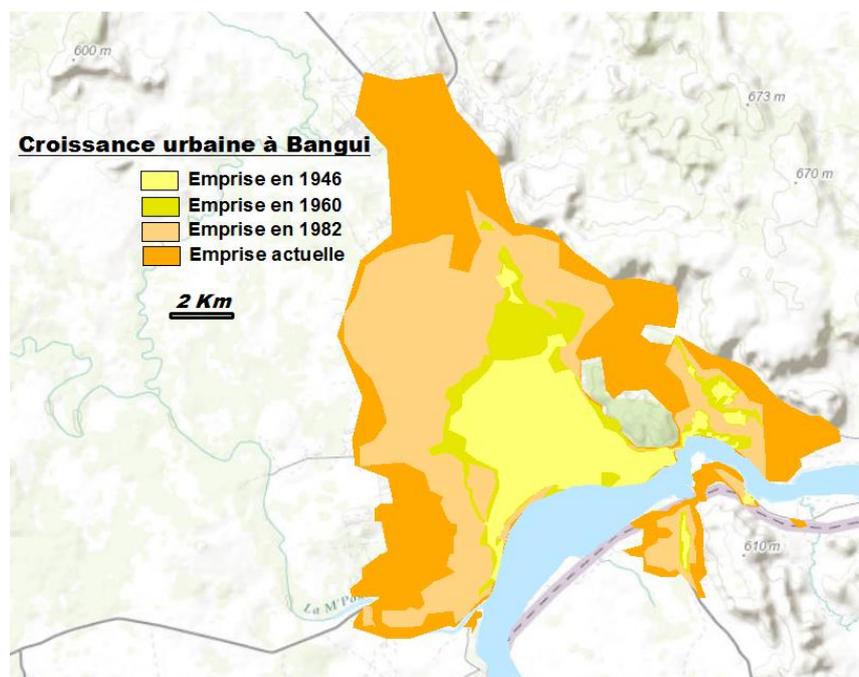


Fig. 42 – Croissance urbaine de la ville de Bangui
Fig. 42 – Urban growth of the city of Bangui

D'un volume de réservoir de $250. 10^6 \text{ m}^3$; le barrage de Boali 3 a coûté environ 14 millions d'Euro, et a été financé respectivement par la Banque Mondiale (27%), la Banque Africaine de Développement (50%) et le Fonds Koweïtien (23%). La Maîtrise d'ouvrage est assurée par la Société **ENERCA** (*Energie Centrafricaine*), et les prestations d'études de conception et d'ingénierie ont été assurées par le célèbre bureau d'Ingénieur-Conseil **COYNE & BELLIER** entre 1989 et 1991. Ensemble, les trois ouvrages implantés sur la rivière Mbali forment un complexe hydraulique d'une longueur de 10 Km (30 Km avec lac de barrage inclus) (*fig. 43*).

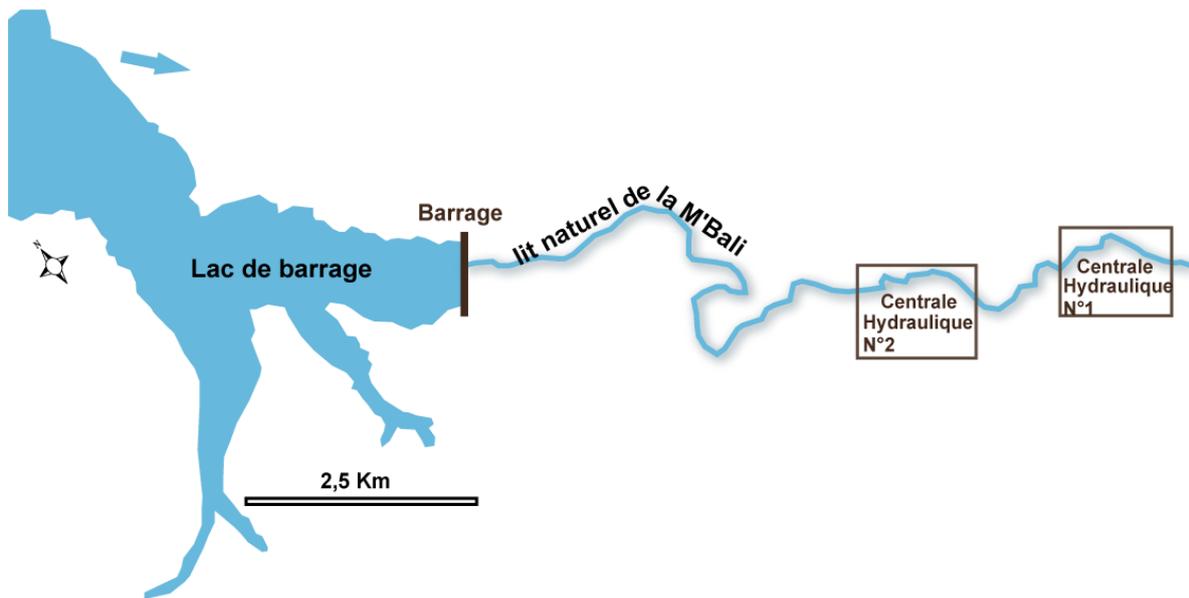


Fig. 43 – L'aménagement hydroélectrique de Boali sur la rivière Mbali
Fig. 43 - Boali hydroelectric development on the Mbali River

2.3- Le projet d'aménagement du barrage de Palambo sur l'Oubangui

Dans le bassin de l'Oubangui, de nombreux sites ont déjà fait l'objet d'études de faisabilité hydrauliques en vue de mettre en valeur leurs potentialités hydrauliques. Parmi eux, nous avons le site de **Palambo** (*Pk 1540*) qui a été expertisé par **ARTELLIA** en 1990 et **CIMA+ International** en 2010. Les deux cabinets d'études ont tous souligné les potentialités hydrologiques, géologiques et topographiques que présente ce site en termes d'exploitations hydrauliques. Pour clarifier, à Palambo, l'Oubangui est long de plus de 1 540 Km pour un module annuel de $3\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur ce secteur, la rivière coule sur un substrat grésos-quartzitique (résistant) et présente une vallée très étroite mais profonde ($\sim 30 \text{ m}$) (*photo 8*).

Le principal projet d'aménagement à Palambo concerne la construction d'un **barrage multifonctionnel**. L'ouvrage hydraulique prévu est un barrage de type « *enrochement* »,

comportant une *centrale hydroélectrique* et un *évacuateur de crues*. La cote maximale du barrage sera à l'altitude 370 m et le réservoir s'étendra sur près de 200 km en amont et pourrait atteindre lors des crues majeures le pied du barrage de Mobaye au Pk 1 250 (CIMA+, 2011). Le coût de l'aménagement est estimé à environ 6,7 milliards de dollars (inclut les frais d'études, de génie civil, des équipements, de la main d'œuvre et de dédommagement des expropriés). Ce méga-barrage aura trois fonctions principales selon ses promoteurs :

1) La dérivation de l'Oubangui vers le lac Tchad via des canaux atteignant la rivière Chari.

2) La production d'énergie hydroélectrique (~360 MW estimés) dont une partie sera vendu aux villes environnantes telles que la vielle de Bangui.

3) L'amélioration des conditions navigables complexes sur le bief Bangui-Brazzaville à travers la régulation du débit de l'Oubangui.

On n'oubliera pas que ce barrage aura aussi pour fonctions de promouvoir la sécurité et la navigabilité intérieure en Afrique centrale. La faisabilité technique de ce mégaprojet a été approuvée dans le rapport proposé en décembre 2010 par le cabinet Canadien **CIMA+ International**. Toutefois, ce rapport ne comporte pratiquement pas de volet environnemental, si bien qu'on ignore encore les impacts prévisibles de cette mégastructure sur l'écosystème aquatique de l'Oubangui et de celui du lac Tchad.



Photo 8 – Site de l'Oubangui à Palambo lors des basses eaux. Cliché : Boulvert (1987).
Photo 8 – Ubangui site in Palambo during low water.. Boulvert (1987).

2.4- Le projet d'aménagement du barrage de Bria sur la rivière Kotto

La commune de Bria située dans le département de la Haute-Kotto en Centrafrique est l'un des sites proposés pour aménager un deuxième barrage relatif au projet de transfert d'eau interbassin que nous avons de décrit précédemment. L'étude de faisabilité technique du projet a aussi été réalisée en 2010 par CIMA+ et les conclusions sont tout de même satisfaisantes. Le barrage sera établi sur la rivière *Kotto* à hauteur de Bria. Long de près de 882 km, la *Kotto* est un affluent majeur du moyen Oubangui (*fig. 20*), elle coule principalement sur un substrat gréso-quartzitique. À l'image de nombreux tributaires de rive droite de l'Oubangui, le cours de la *Kotto* s'oriente du nord vers le sud et présente de nombreuses zones de ruptures de pentes, dont les chutes de *Kémbé* (~20 m de dénivellation) qui sont propices aux aménagements hydroélectriques qu'à la navigation [Boulvert, 1987]. Le module interannuel de la Kotto à Bria serait de 252 m³/s d'après les archives, car la rivière n'a pas été jaugée depuis quelques décennies. Les premiers enregistrements effectués à la station hydrométrique de Bria (*code HYDROM = 1060701804*) datent de 1953. Mais la station n'est plus jaugée depuis 1993, ce qui réduit notre possibilité à faire des analyses hydrologiques approfondies. Néanmoins, les données limnimétriques recueillies à cette station pour l'année 1993 nous renseignent un peu sur le régime d'écoulement de la Kotto (*fig. 44*).

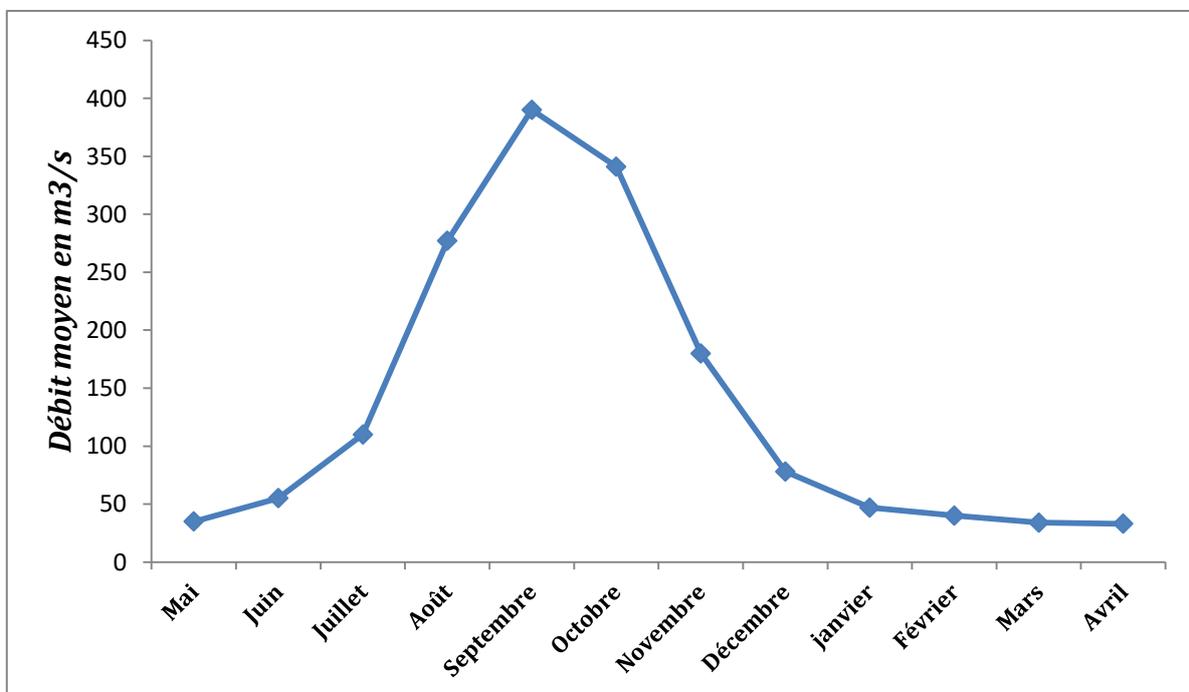


Fig. 44 – Le régime d'écoulement de la rivière Kotto à la station de Bria
Fig. 44 - The flow regime of the Kotto River at the Bria station

Par ailleurs, l'arrêt des observations hydrométriques sur cette station résulte en partie des instabilités politico-sociales récurrentes dans la sous-région. Bria est l'une commune de la République Centrafricaine dont l'instabilité spatiale est très caractéristique. La commune est victime de l'exploitation illégale de ses nombreuses ressources minières. Celle-ci est réputée mondialement pour ses plus beaux diamants alluviaux. L'exploitation diamantifère se fait toujours de manière artisanale dans cette région, car ce minerai est éparpillé sur toute l'étendue du territoire. Par conséquent, nous redoutons les effets du réservoir planifié sur l'exploitation diamantifère à Bria.

Conclusion du troisième chapitre

Le dernier chapitre de la première partie présente les enjeux environnementaux sur le bassin de l'Oubangui, dont les principaux sont les enjeux liés aux changements climatiques et les enjeux liés aux aménagements fluviaux.

*Les enjeux liés aux **changements climatiques** concernent la sécheresse hydrologique observée sur l'Oubangui dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle. **L'année 1970** marque alors une cassure notoire dans la distribution interannuelle du module de l'Oubangui entraînant un **déficit d'écoulement de 30%** à la station limnimétrique de Bangui. Ce déficit d'écoulement a considérablement impacté sur la **navigabilité sur le bief Bangui-Brazzaville**. De nos jours, l'Oubangui n'est que navigable en période de hautes sur environ 600 km, et ce malgré de nombreux entretiens effectués par les voies navigables. Or en 1931, la rivière était navigable en toute saison sur une distance de plus de 1100 Km. Cette sécheresse hydrologique a aussi impacté sur la **morphologie fluviale** de l'Oubangui à travers **l'ensablement du chenal**. Les bancs de sables qui affleurent en surface sont végétalisés par endroit, cela contribue à réduire la largeur et la profondeur des passes navigables.*

*Les enjeux liés aux **aménagements fluviaux** concernent la construction des barrages pour l'exploitation hydroélectrique. Le bassin de l'Oubangui est doté d'une potentialité hydroélectrique remarquable qui, malheureusement n'est pas exploitée. Plus de 2 000 MW de potentiel hydroélectrique non exhaustif estimé. Les rares exploitations hydroélectriques répertoriées sont le **barrage de Mobaye** et le **complexe hydraulique de Boali**. Ajoutons aux deux structures actives, les barrages planifiés de **Palambo** et de **Bria relatifs au projet PTEIB**. La partie suivante sera consacrée aux études de cas sur les impacts hydrauliques des barrages de Mobaye et de Boali.*

Conclusion Partielle

La première partie de cette thèse permet d'appréhender principalement le fonctionnement hydrologique de l'Oubangui. Elle a permis de revisiter la dynamique fluviale récente de l'Oubangui (*chapitre 2*) et d'identifier les enjeux environnementaux actuels sur son bassin (*chapitre 3*). La dynamique fluviale de l'Oubangui est en effet sous la double influence climatique et anthropique. L'influence climatique sur le bassin a été relativement bien documentée. L'année 1970 semble être l'année de « rupture » générale dans l'écoulement interannuel de l'Oubangui. En revanche, il existe encore un réel besoin de connaissances quant aux effets d'anthropisation sur le bassin, car peu de travaux ont été dédiés sur cet aspect. Certes, le bassin de l'Oubangui a subi très peu d'aménagements fluviaux, mais ses deux aménagements hydrauliques majeurs n'ont jamais fait l'objet d'études d'impact afin d'évaluer leurs effets environnementaux. La synthèse des publications scientifiques sur les effets hydro-écologiques des barrages (*chapitre 1*) a permis de montrer que l'établissement des barrages en rivière ne s'effectue rarement sans dommages environnementaux. Les retours d'expériences sur les travaux de constructions des grands barrages en rivière font défaut. A ce titre, nous avons évalué dans la *partie suivante*, les effets hydro-écologiques de tous les barrages fonctionnels du bassin de l'Oubangui, notamment les barrages de *Mobaye* et de *Boali*. Les résultats sont d'apports considérables dans la compréhension de l'influence des aménagements hydrauliques sur le bassin de l'Oubangui.

Partie 2

Etudes d'impact hydraulique des barrages sur le bassin de l'Oubangui

Chapitre 1 – Etudes de cas du demi-barrage de Mobaye

- A- Les spécificités du demi-barrage de Mobaye
- B- Méthodologie de l'étude d'impact du barrage de Mobaye
- C- Résultats

Chapitre 2 – Etudes de cas du barrage-réservoir de Boali

- A- Le complexe hydraulique de Boali
- B- Méthodologie de l'étude d'impact du barrage de Boali
- C- Résultats

Introduction de la Partie 2

La première partie de ce travail étudie exclusivement les barrages fonctionnels sur l'Oubangui dont les impacts sur la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui est jusque-là mal connu alors ce bassin est fragilisé par un déficit d'écoulement depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

Deux barrages fonctionnels ont été diagnostiqués à savoir, le barrage de Mobaye et celui de Boali. Le diagnostic a permis d'évaluer l'impact de ces ouvrages sur le fonctionnement hydrosédimentaire du bassin de l'Oubangui. Connaitre les effets des barrages fonctionnels sur l'Oubangui permet dans une certaine mesure de prospecter les effets potentiels des barrages planifiés, en l'occurrence, le barrage planifié à Palambo dans le cadre du projet de transfert d'eau interbassin.

Chapitre 1 – Etudes de cas du demi-barrage de Mobaye

Le premier chapitre de cette partie s'intéresse aux effets du barrage de Mobaye sur le régime d'écoulement de l'Oubangui. On l'a déjà démontré dans la première partie que le régime hydrologique est un déterminant indispensable à la diversité écologique et aux activités humaines dans les pays les moins avancés. L'altération du régime par un ouvrage hydraulique pourrait avoir des conséquences drastiques sur le cycle vital des communautés riveraines et leurs moyens de subsistance. Dans ce chapitre, on rappellera dans un premier temps les spécificités du barrage de Mobaye, puis on présentera la méthodologie adoptée pour évaluer l'impact de cet ouvrage, et enfin les résultats obtenus.

1) Données hydroclimatiques

- Test statistique
- Indice d'écoulement
- Modèle fréquentiel

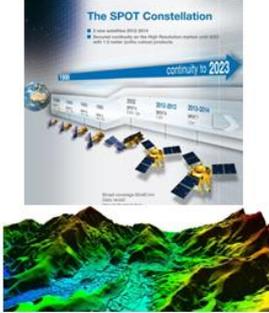


$$I_s = \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma}$$

$$f(Q) = e^{-\alpha(Q-Q_0)}$$

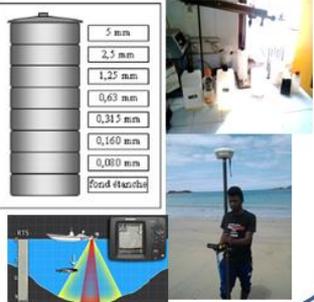
2) Données planimétriques

- Image satellite
- Photo aérienne
- Scan IGN ; MNT



3) Données sur le transport solide et la topo-bathymétrie

- MES, Charriage
- Granulométrie
- Profil en travers



$$I_s = \frac{a}{\lambda I - \delta}$$

$$f(\delta) = e^{-\alpha(\delta - \delta_0)}$$

A- Les spécificités du demi-barrage de Mobaye

1- Structure hydraulique de l'ouvrage

Le barrage de Mobaye est un ouvrage hydroélectrique aménagé entre 1987 et 1989 sur la rivière Oubangui dans la localité de Mobaye, où la rivière forme une frontière naturelle entre le *Centrafrique* et le *Congo-Démocratique*. Il s'agit d'un barrage atypique, car l'ouvrage n'obstrue que partiellement la largeur de l'Oubangui dans ce secteur fonctionnel. Le barrage est la propriété de l'Etat Congolais, sa gestion est confiée à la *SNEL (Société Nationale d'Electricité Congolaise)*. Le Centrafrique était réticent au début du lancement du projet à cause des effets socio-économiques que peuvent entraîner l'établissement du barrage, notamment des effets liés aux risques d'inondations et des modifications des conditions de navigations sur l'Oubangui [Mubiala, 1995]. Ce dernier a finalement accepté de conclure un accord en 1986 avec le Congo-Démocratique en vue d'exploiter communément les forces hydrauliques de l'Oubangui à Mobaye. « *Les deux Etats sont convenus d'ériger un barrage dont ils sont copropriétaires [...] En ce qui concerne la répartition de la production hydroélectrique, les deux Etats conviennent, aux termes du principe 3, de fixer, chacun, la puissance qui lui sera réservée au cours des cinq premières années d'exploitation, soit de 1990 à 1995. Cependant, s'il s'avère, au cours de cette période, qu'un Etat a besoin d'énergie supplémentaire par rapport au quota qu'il s'était lui-même fixé auparavant, il demandera à l'autre Etat de lui vendre une partie de son excédent* » [Mubiala, 1995].

Le projet initial tel que l'imaginé par l'Etat Congolais prévoyait de construire un **pont-barrage** qui fera un « trait d'union » entre la rive droite (Centrafrique) et la rive gauche (Congo-Démocratique). Le pont relierait en effet les deux Etats et le barrage produirait de l'énergie hydroélectrique pour alimenter *Mobaye-Mbanga* (rive droite), *Mobaye-Mbongo* (rive gauche) et ses environs (*ex : Kawelé, Gbadolité*). Cependant, l'intérêt économique du pont-barrage a été mis en doute par les experts d'organismes de financement international, car cet ouvrage servira quasiment à alimenter en électricité la ville de Gbadolité, qui est la ville natale de l'ancien dirigeant Congolais, le Maréchal Mobutu. Mais l'Etat Congolais parvenait à financer la construction de l'ouvrage. La maîtrise d'œuvre était attribuée au Cabinet **Tractionel Electrobél Engeneering** de Bruxelles assisté par **Coyne et Bellier**. Trente (30) ans après sa mise en service, le barrage continue de produire de l'électricité, en revanche, le pont qui devrait assurer la continuité du barrage de la rive gauche vers la rive droite n'est pas encore finalisé (*photo 9*), la liaison entre les deux pays se fait toujours avec des moyens

rudimentaires tels que les pirogues, appelés localement les « *Ngoh* ». En outre, ce barrage ne comporte point d'écluse permettant de réguler la navigation entre le moyen et le haut-Oubangui, depuis lors, la navigation sur l'Oubangui en amont de Mobaye n'est plus possible.

Considéré comme « *une erreur d'aménagement* » par certains, ou un « *barrage inachevé* » pour d'autres, ou encore un « *demi-barrage* » par Nzango & al. (2017). L'ouvrage hydroélectrique de Mobaye est seulement long de 384 mètre sur les 610 mètres de la largeur totale du chenal (*photo 9*). Selon sa capacité de production, la centrale hydraulique peut turbiner neuf (9) groupes *Kaplan*, mais seulement trois (3) ont été installés, et produisent une capacité totale de 11 Mégawatt [Callède & al., 2010]. D'après les données recueillies, ce demi-barrage a été aménagé au fil de l'eau. La crête de l'ouvrage dispose d'une hauteur de 32 mètre, et sa retenue inonde près de 1 000 Ha de surface, soit 10 km².

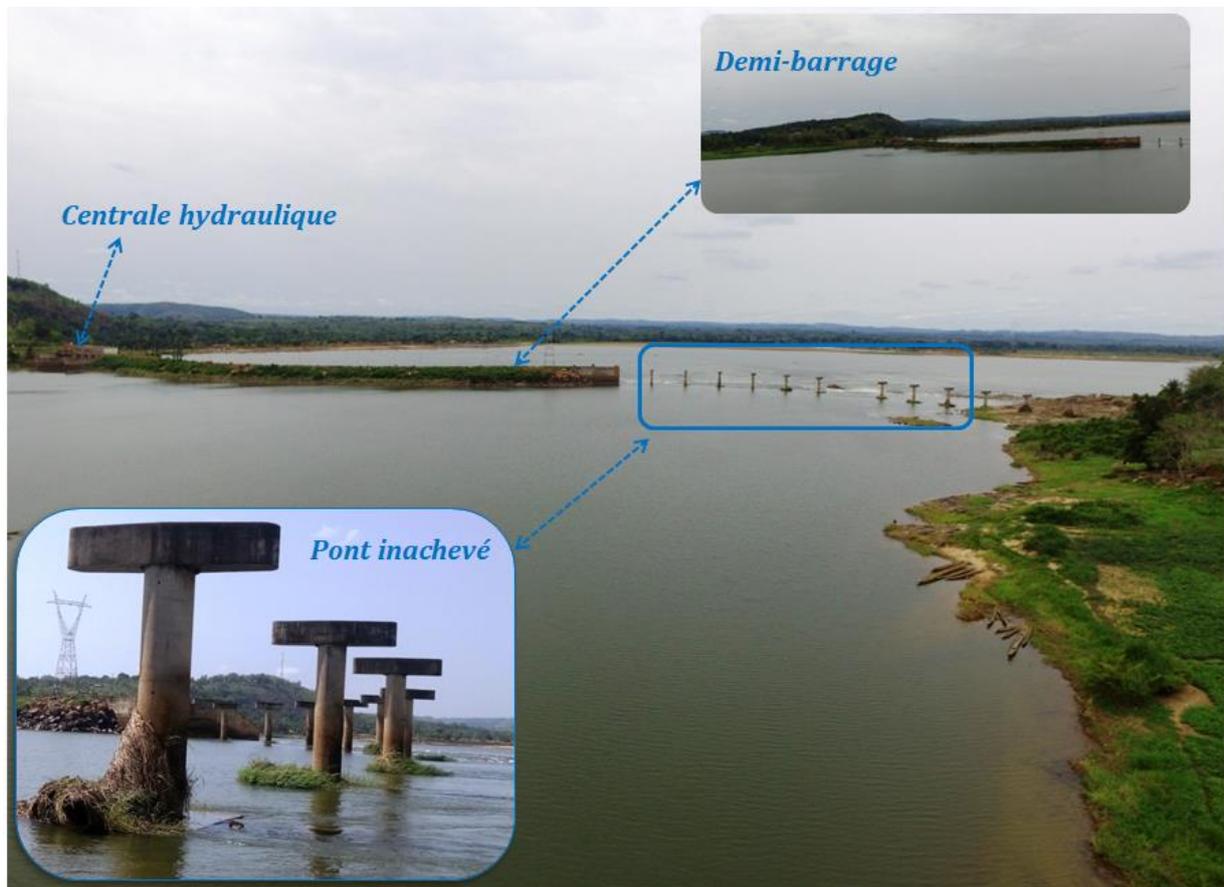


Photo 9 – Pont inachevé sur l'Oubangui à Mobaye. Cliché : Nzango, 2016.
Photo 9 – Unfinished Bridge over Ubangui at Mobaye. Cliché: Nzango, 2016.

Selon ses complexités, il est difficile de définir avec exactitude la taille et le type de cet ouvrage. En outre, nous ne disposons pas des chiffres officiels du volume d'eau formé par la

retenue. Pour autant, nous pouvons classer cet ouvrage parmi les *petits barrages* en rivière, car celui-ci ne forme pas une grande retenue d'eau en amont, et son ouvrage en travers n'obstrue que partiellement le lit de l'Oubangui à Mobaye.

Ajoutons que d'ailleurs, l'ouvrage de Mobaye est érigé sur l'un des *rapides* de l'Oubangui à Mobaye. Ces rapides se caractérisent par des affleurements rocheux qui resserrent la largeur du chenal (*fig. 21*). Ils ont la particularité de freiner la remontée des bateaux vers l'amont du fait de la turbulence. Tixier (1954) a montré que, jusqu'en 1954, seul le bateau « *Poumeyrac* » équipé d'un puissant moteur pouvait franchir les *rapides* de Mobaye dont la vitesse d'écoulement était estimée à 17 km/h pour une cote de 4,3 mètre, et 20 km/h pour une cote de 6 à 7 mètre (*annexe 3*). Par conséquent, il a été envisagé de mettre en place une écluse afin de rendre franchissable ces rapides par des bateaux. Le projet était piloté par Tixier entre 1953 et 1954, le sas de l'écluse était prévu pour une longueur de 56 m, d'une largeur de 10 m et d'un tirant d'eau de 2 mètre. Au terme de son étude, Tixier concluait sur l'inutilité de la construction d'une écluse à l'endroit du rapide de Mobaye, celui-ci préconise la construction en grand nombre des bateaux équipés de puissants moteurs capable de franchir une vitesse de 19 km/h avec une barge chargée.

2- Quelles contributions sociales de l'ouvrage hydroélectrique de Mobaye ?

Sur le plan social, l'établissement du barrage a contribué à l'amélioration du niveau de vie de la population locale en matière d'éducation, de commerce (boutique, moulin à café ...), de la santé, des services publics et de télécommunication (réseau de téléphonie). Mais ce sont les communes de rive gauche de l'Oubangui qui ont nettement tiré profit des avantages sus-évoqués. Sur la rive droite en Centrafrique, l'avantage avéré du barrage concerne l'approvisionnement en électricité par les riverains. Après l'inauguration de la centrale en 1989, l'électricité produite était distribuée gratuitement dans la région. Mais depuis quelques années, un prix forfaitaire est attribué aux abonnés afin de permettre aux gestionnaires d'entretenir la centrale, car un seul des trois groupes (turbines) initialement installés fonctionne de nos jours, les deux autres sont à l'arrêt depuis plusieurs années. C'est la société d'énergie Centrafricaine (ENERCA) qui est chargée de collecter les frais de factures auprès des abonnés avant de régler à la société Congolaise d'électricité (SNEL). À défaut de disposer

des industries nécessaires pour exploiter l'énergie fournie, l'ENERCA accuse toujours des déficits dans la commercialisation de son potentiel électrique à *Mobaye-Mbanga*.

L'autre avantage social de l'aménagement hydroélectrique de Mobaye concerne son apport dans la production piscicole. Préalablement, nous avons fait des entretiens avec une vingtaine de pêcheurs afin de recueillir leur perception du barrage. Nous avons constaté que les pêcheurs sont repartis en groupe, dont un chef assure la commande. À Mobaye, la pêche est l'activité économique par excellence, et celle-ci a été toujours pratiquée par le peuple *Ngbandi*. L'activité piscicole est répartie entre l'amont et l'aval du barrage. Manifestement, près de 60% des pêcheurs affirment que l'établissement du barrage a contribué à la prolifération de nombreuses espèces piscicoles, en particulier les espèces rhéophiles (ex : *Lates Niloticus (le Capitaine)*, *Mormyrus*). Il s'avère que cet argument soit tenu quasiment par les pêcheurs situés en aval immédiat du barrage, où leur eau a été bien oxygénée par la turbulence engendrée par le demi-barrage. L'apparente prolifération des poissons a suscité l'accroissement du nombre des pêcheurs en aval du barrage. Nous avons observé que, même certains peuples qui ne sont pas des peuples dits de l'eau, se sont reconvertis en pêcheurs. La pêche s'effectue généralement, soit à la nasse sur les rapides (*photo 10*), soit au filet (*photo 11*). La turbulence, quant à elle résulte de la structure hydraulique du barrage en *demi-lit* qui permet à l'eau de circuler de manière permanente dans la moitié du chenal non obstruée par le barrage.

En revanche, pour 35% des pêcheurs, l'établissement du barrage (et son corollaire, le dérochement des rapides), est au contraire, un facteur d'appauvrissement du patrimoine génétique des poissons lithophiles. Ces derniers ont longuement insisté sur le fait que la présence du barrage a beaucoup contribué à des pertes humaines. Pour les peuples *Ngbandi* dont l'Oubangui est une rivière sacrée, l'établissement du barrage n'est pas du tout accepté par leurs ancêtres dont l'esprit plane toujours sur la rivière. D'après eux, la présence du barrage entraîne une rupture de l'équilibre qui existait entre les riverains et leurs ancêtres. C'est pourquoi ces derniers occasionnent des échouages de bateaux, des pirogues afin de montrer leur mécontentement.



Photo 10 – Pêche à la nasse sur l’Oubangui
Photo 10 – Fishing in the trap on Ubangui



Photo 11 –Pêche au filet au niveau du ressaut hydraulique en aval du barrage de Mobaye
Photo 11 – Net fishing at the hydraulic ressaut at Mobaye

B- Méthodologie de l'étude d'impact du barrage de Mobaye

Nous avons opté pour la méthode de « *station témoin* » afin d'évaluer l'impact du demi-barrage sur la rivière Oubangui. Celle-ci est couramment utilisée pour étudier les effets hydrologiques des barrages en rivière. Celle-ci consiste à comparer les données mesurées à la même station avant et après la construction du barrage [Magilligan & Nislow, 2005]. Il s'agit d'une méthode efficace mais nécessite néanmoins de disposer des données rétrospectives sur la rivière à l'endroit de l'aménagement.

1- Nature et sources de données utilisées

Dans notre étude de cas, la méthode de « *station témoin* » est appliquée par la comparaison des données *hydrologiques* (Débits) et *planimétriques* (imageries rétrospectives) de l'Oubangui à l'échelle de Mobaye (Pk 1 250). Les données hydrologiques sont recueillies auprès des services hydrologiques de Centrafrique, notamment à la **DMN** (Direction Nationale de Météorologie) et au **SCEVN** (tab. 5). Elles ont toutes fait l'objet d'une analyse hydrostatistique permettant d'évaluer l'influence du *demi-barrage* sur le *régime hydrologique* de l'Oubangui à la station de Mobaye. Tandis que, les données planimétriques sont recueillies auprès des organismes internationaux (**IGN** et **OSFAC**) (tab. 5), et celles-ci ont été analysées spatialement via un **SIG** (*Système d'Information géomatique*), en vue d'évaluer l'influence du demi-barrage sur la *morphologie fluviale* et sur le *processus hydrosédimentaire*.

Tableau 5 – Nature et sources de données utilisées
Table 5 – Nature and data Sources Used

	Nature de Données	Pas de temps/ Résolution / Echelle	Sources
Données limnimétriques	<i>Chroniques de débit de l'Oubangui à Mobaye</i>	<i>Mensuel</i>	<i>***DMN</i>
	<i>Chroniques de débit de l'Oubangui à Bangui</i>	<i>Journalier</i>	<i>Gie-SCEVN et DMN</i>
	<i>Chroniques pluviométriques de l'Oubangui à Bangui</i>	<i>Mensuel</i>	<i>DMN</i>
Données planimétriques	<i>Photographies aériennes de l'Oubangui pour les secteurs de Mobaye, Bangui et Zinga ;</i>	<i>1/50 000</i>	<i>Mission de l'IGN</i>
	<i>Image SPOT 2010 de Mobaye</i>	<i>5 m</i>	<i>OSFAC</i>

2- Analyse et traitement des données de débits

Nous rappelons que le *débit* d'une rivière correspond au volume d'eau écoulé à une station donnée par unité de temps (*chap.1*). Sa variation saisonnière détermine le « *régime hydrologique* » particulier d'une rivière, qui est un facteur indispensable à la dynamique fluviale et à la pérennisation des activités humaines liées à l'eau. A l'échelle interannuelle, le régime hydrologique peut être soumis aux effets des variabilités hydrologiques d'origines climatiques, géologiques et anthropiques. Les variations du régime hydrologique d'origines anthropiques ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques au cours de ces dernières décennies. Dans le cas de constructions des ouvrages hydrauliques en rivière, certains travaux scientifiques ont montré que la variation du régime hydrologique est le premier effet observé dès la fermeture d'un barrage [Martins, 2008]. Selon Petts (1984), la régulation d'une rivière affecte toute la gamme des débits dont la gamme des débits extrêmes (Q_{max} et Q_{min}), et la gamme des débits moyens (Q_{ma}). Sur les débits extrêmes, Magalligan & Nislow (2005) ont observé un amortissement des Q_{max} et une hausse des Q_{min} après la régulation des rivières Nord-Américaines. Sur les débits moyens, Assani & al. (2007), ont montré que la présence d'un barrage en rivière modifie toutes les caractéristiques des Q_{ma} contrairement à l'opinion couramment admise.

Bien que les impacts des barrages sur le régime d'écoulement en rivière soient bien étudiés et documentés, il existe encore un réel besoin de connaissances sur les impacts des *petits barrages* en rivière. La grande majorité des travaux existants porte en effet sur les études d'impacts des *grands barrages* en rivière. On sait très peu de choses sur les impacts hydrologiques des *petits barrages* et des « *seuils en rivière* ». De ce fait, un processus d'optimisation est donc intéressant. Si les grands barrages sont mieux étudiés que les petits, c'est par ce qu'ils sont sujets à de nombreux contrôles et réglementation contrairement aux petits barrages qui appartiennent à 90% à des propriétés privées et se trouvent pour la plupart sur des petits cours d'eau [Shuman, 1995 ; Dean & al., 2002 ; Singer & Gangloff, 2011].

L'intérêt de notre analyse est d'apporter quelques contributions scientifiques à la compréhension des effets des petits barrages sur le régime d'écoulement en rivière, avec une étude de cas du demi-barrage de Mobaye sur la rivière Oubangui. Les paramètres hydrologiques pris en compte dans l'analyse sont: le Q_{ma} , le Q_{max} et le Q_{min} ; qui sont respectivement le *débit moyen annuel*, le *débit maximum annuel* et le *débit minimum annuel*.

Un traitement hydrostatistique a été effectué sur le logiciel ***KhronoStat*** de l'IRD (photo 12) afin d'identifier d'éventuelles variations dans le régime interannuel après la régulation. Les variations seront identifiées à travers des discontinuités ou des (***ruptures***) temporelles dans la distribution interannuelle du Q_{ma} , du Q_{max} et du Q_{min} . A cet effet, le test de « *stationnarité* » d'Hubert a été appliqué pour la détection des ruptures. Contrairement aux autres tests statistiques, **le test d'Hubert** offre l'avantage de détecter *plusieurs ruptures* dans une série temporelle.

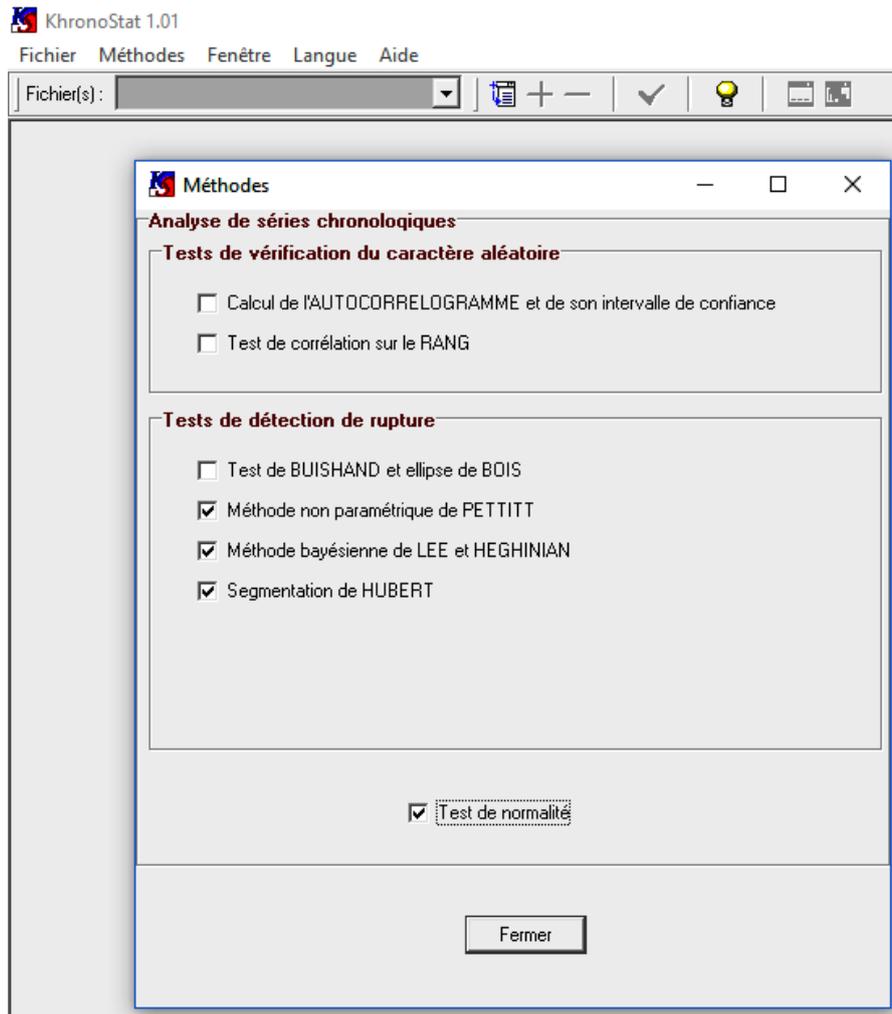


Photo 12 – Interface du logiciel KhronoStat
Photo 12 – KhronoStat Software Interface

L'usage des tests statistiques de ruptures est de plus en plus répandu en analyse hydrologique pour évaluer l'influence des barrages ou des *changements climatiques* sur les variations du régime d'écoulement. *Le test d'Hubert consiste à découper la série en m segments, de telle sorte que la moyenne calculée pour un segment soit significativement différente de la*

moyenne du segment voisin. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable (avec deux segments ou plus), l'hypothèse nulle de stationnarité est acceptée [Hubert & al., 1989 ; Faye, & al., 2015]. Ainsi, Servat, & al., (1999), ont défini une *rupture* comme étant un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées. La présence d'éventuelles ruptures dans notre série temporelle n'aura pas la même signification hydrologique selon qu'elle se situe avant ou après l'aménagement du demi-barrage. Afin de mieux ressortir les fluctuations les plus importantes, nous avons appliqué la « *moyenne mobile* » sur le Q_{ma} , le Q_{max} et le Q_{min} .

3- Analyse et traitements des données planimétriques (photo-interprétation)

Le demi-barrage a été construit sur la partie rocheuse du lit de l'Oubangui à Mobaye. L'établissement de l'ouvrage en travers s'est accompagné par des opérations de « déroctage » qui a pour effet de modifier la géométrie hydraulique locale du chenal. De plus, l'obstruction partielle de la largeur du chenal a entraîné une accélération du courant dans la moitié du lit non obstruée. À travers un suivi spatial du lit de l'Oubangui à Mobaye, nous avons identifié les éventuels changements morphosédimentaires enregistrés par l'Oubangui après sa régulation. Les changements ont été identifiés au moyen de la **photo-interprétation** via le logiciel **SIG** (*ArcGIS 10. 2*). Une série de photographies aériennes a été utilisée à cet effet. Notons que, l'usage des photographies aériennes et des images satellites est de plus en plus courant en hydrologie fluviale. Gilvear (2004), a par exemple utilisé une série de photographies aériennes sur près de 60 ans (1942-2000) afin de suivre les changements morphologiques de la rivière *Spey* (Ecosse) après sa régulation. De même Gaeuman & al. (2005), ont analysé l'ajustement morphosédimentaire de la rivière *Duchesne* (USA) après sa régulation à l'aide des imageries rétrospectives. Eaton & Lapointe (2001), ont aussi souligné l'intérêt de cette approche qui a apporté des résultats concluants à la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire de la *Loire*. Sur l'Oubangui, l'analyse spatiale des photographies aériennes se présentent comme suit :

- ✓ *Sur ArcGIS 10.2, nous avons géoréférencé les photographies aériennes, puis appliqué un masque avec l'Outil Extraction by masque, avant de vectoriser les unités fluviales (ex : fig. 45a).*

- ✓ Le bilan morphosédimentaire est quantifié en unité de surface (m^2) puis converti en pourcentage (%).
- ✓ La mobilité latérale du lit est obtenue par la superposition des trajectoires multi-dates du chenal (ex : fig. 45b).
- ✓ La marge d'erreur de l'analyse concerne l'erreur de géoréférencement à cause de la qualité de certaines photographies aériennes en blanc et noir qui rend imprécis certains calages. L'EQM (Erreur Quadratique Moyenne) de géoréférencement varie de 1 à 9 mètres sur l'ensemble des photographies utilisées.

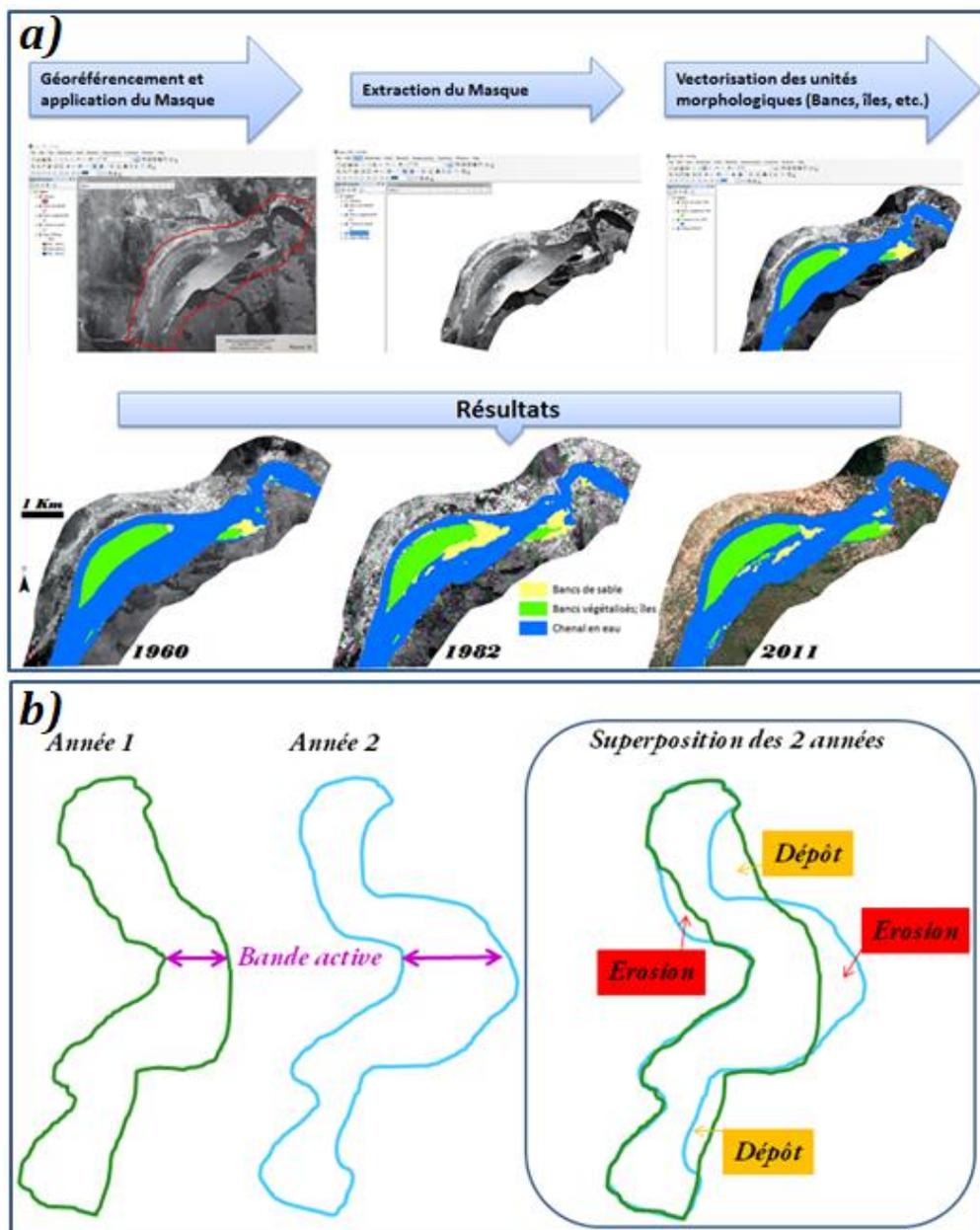


Figure 45 – Protocole de suivi en plan de la morphologie fluviale
 Figure 45 – Monitoring protocol in terms of fluvial morphology

4- Autres sources de données

En complément aux analyses hydrostatistiques et spatiales, nous avons procédé à des investigations de terrain entre 2015 et 2016, qui ont donné lieu à :

- **une série de relevés topo-bathymétriques** permettant de dresser des profils transversaux de l'Oubangui (*fig. 22 & 23 ; annexe 1*) en vue d'analyser les dimensions transversales et verticales de l'Oubangui à Mobaye. Un drone Phantom 3 a aussi complété ce diagnostic permettant des prises de vue aériennes sur ce secteur.
- **une série d'enquêtes semi-directives** réalisée auprès de la communauté riveraine (*annexe 4*), notamment auprès des pêcheurs de Mobaye et des commerçants de sables de Bangui afin de recueillir leur perception des enjeux socio-économiques du demi-barrage sur leurs activités respectives.
- **des entretiens directs** réalisés auprès des pouvoirs publics pour recueillir leur perception sur les enjeux économiques et environnementaux des aménagements hydrauliques sur l'Oubangui.
- **une série d'échantillonnage sédimentologique** a été faite dans le but d'analyser l'influence du barrage sur le cortège sédimentaire de l'Oubangui à l'échelle de Mobaye. Les sédiments ont été prélevés dans une petite benne par la plongée. Les sites d'échantillonnages concernent l'amont et l'aval du barrage (*fig. 46*). L'analyse a été réalisée au laboratoire LNBTP de Bangui suivant un protocole défini par AFNOR (*annexe 2*).

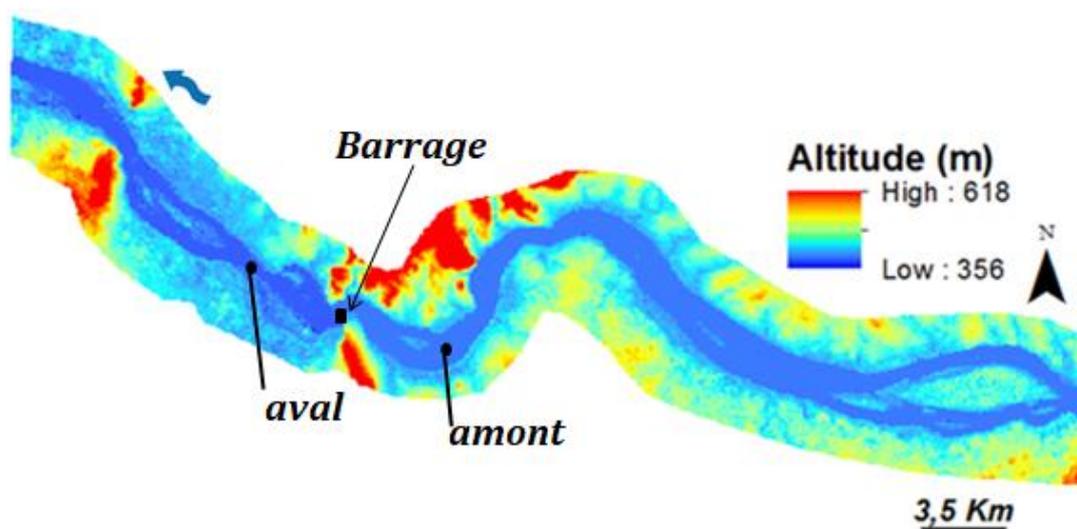


Figure 46 – Sites d'échantillonnages sédimentologiques sur l'Oubangui à Mobaye
Figure 46 – Sedimentological sampling sites on Ubangui in Mobaye

C- Résultats

1- Une morphologie fluviale impactée

Dans un système fluvial en « *parfait équilibre* », la quantité de flux de matières entrant correspond toujours à la quantité des flux sortant (*fig. 13*). Mais en réalité, « l'équilibre parfait » en rivière n'existe pratiquement pas, car les systèmes fluviaux sont constamment soumis à des perturbations externes d'origines climatiques, tectoniques et anthropiques. De ce fait, les systèmes fluviaux ajustent continuellement leur géométrie interne en combinant les variables de contrôle (Q et Q_s) et les variables de réponse (*ex: pente d'énergie, morphologie, largeur, profondeur, granulométrie...*) afin de maintenir une certaine capacité de transport en adéquation avec leur charge sédimentaire. Les ajustements dépendent en effet du degré de perturbation de chaque rivière. Ainsi, sur la rivière Oubangui, l'établissement du demi-barrage sur les rapides de Mobaye a de ce fait perturbé localement la morphologie fluviale. Les opérations de déroctage visant à asseoir l'ouvrage en travers se sont traduites par des perturbations dans la « *géométrie hydraulique* » locale de la rivière. Les résultats de l'analyse spatiale réalisée permettent de mettre en évidence deux changements spatiaux sur l'emprise étudiée : *un changement dans la largeur du chenal, et un autre changement sur les unités morphosédimentaires.*

1) *Changement en plan dans la largeur du chenal*

Le premier changement en plan observé concerne la modification de la largeur du chenal sur l'emprise spatiale étudiée. L'analyse spatiale a mis en évidence une extension de 8% de la largeur du chenal en amont de l'ouvrage, et une rétraction légère de 4% en aval sur l'emprise spatiale étudiée (*fig. 47*).

L'extension de la largeur du lit en amont devrait être normalement un effet attendu. Celle-ci résulte en effet de l'élargissement du chenal par la retenue d'eau qui submerge la largeur à « *pleins-bords* » du chenal. En revanche, la valeur enregistrée est insignifiante comparativement à d'autres barrages qui forment de grands lacs artificiels en amont. Pour autant, cette extension a causé en amont, l'envolement des aires agricoles, de chasses et d'habitations situées sur la plaine inondable de l'Oubangui. Selon le rapport de Ngocko (2015), la mise en eau de la retenue s'est accompagnée par le déplacement de la population locale. Environ 1 400 ménages ayant effectués ce déplacement. A cet effet, des plans de relocalisation, de reconversion et/ou d'indemnisations des populations victimes étaient

envisagés dans le projet initial d'aménagement du barrage. Un sondage réalisé auprès de 35 riverains (pêcheurs, agriculteurs, commerçants etc.) a montré que 70% de la population sont insatisfaits des mesures compensatoires obtenues. Ces derniers ont montré leur indignation en jugeant trop partielle l'indemnisation reçue en contrepartie de leur expropriation. Les compensations obtenues ne reflètent pas aux propositions initiales. À défaut, certains expropriés se sont reconvertis en d'autres métiers, notamment en pêcheurs.

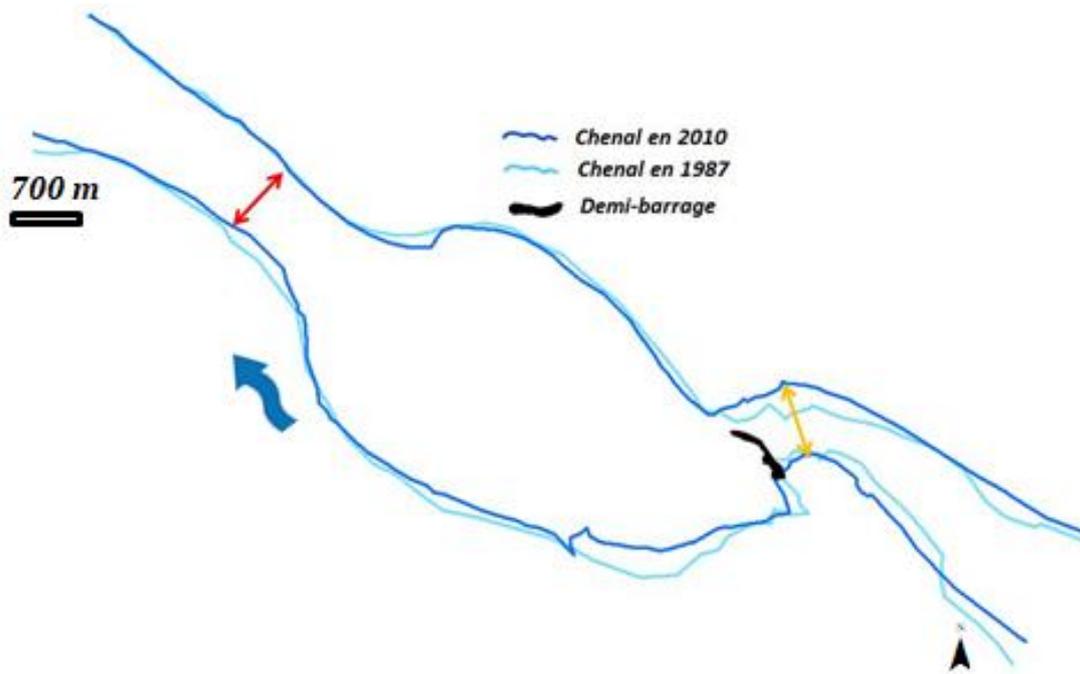


Figure 47 – Mobilité en plan du chenal de l’Oubangui à Mobaye
Figure 47 – Mobility in plan of the Ubangui channel at Mobaye

Par ailleurs, le chenal connaît un léger rétrécissement de 4% en aval immédiat du demi-barrage (*fig. 47*) dont l’origine se trouverait dans la structure en demi-lit du barrage. La rétraction d’un chenal en aval d’un barrage après régulation est généralement liée à l’amortissement des pics de crues par les retenues. Marston & al. (2005) ont observé une diminution de la sinuosité totale de la rivière *SNAKE* (USA) à cause du laminage *des pics de crues* par la retenue du barrage de *Jackson Lake*. Par ailleurs, la rétraction d’un chenal en aval de certains grands barrages est la conséquence immédiate de son enfoncement (incision). Au stade actuel de nos recherches, nous ne sommes pas en mesure de démontrer que la rétraction du chenal de l’Oubangui en aval est imputable d’une incision provoquée par le demi-barrage. Nous ne disposons d’aucunes données sur la profondeur du lit de l’Oubangui avant cet aménagement qui nous permettraient de comparer avec nos relevés de 2015 et 2016.

2) *Changement sur les unités morphosédimentaires*

Le deuxième changement en plan enregistré concerne les **modifications dans la structure des formes sédimentaires de l'Oubangui** après sa régulation. Sur la même emprise spatiale étudiée précédemment, nous avons enregistré une réduction 22% de la surface des unités morphosédimentaires (*ex : bancs de sables, îles*) situées en aval immédiat du barrage (*fig. 48*). Ce déficit est très prononcé sur les bancs vifs situés dans l'axe médian de l'écoulement du fait de l'érosion progressive (turbulence) engendrée par le demi-barrage. L'érosion progressive en aval peut donc avoir une double origine : *une origine anthropique* liée à la structure en *demi-lit* du barrage qui a pour effet d'accroître la vitesse d'écoulement dans le déversoir permanent. *Une autre origine climatique*, car l'établissement du barrage en 1989 coïncide avec une relative stabilité pluviométrique au milieu des années 1990 (*fig. 49*). Cette stabilité pluviométrique inverse la tendance d'écoulement déficitaire observée depuis 1970. La reprise d'écoulement de la décennie 1990 est également enregistrée sur la rivière *Chari*, principal contributeur en eau du *lac Tchad*. Le *Chari* tire en effet sa source en Centrafrique, son bassin versant est séparé du bassin de l'Oubangui par une *ligne de partage des eaux*, dénommée la « *dorsale Centrafricaine* ».

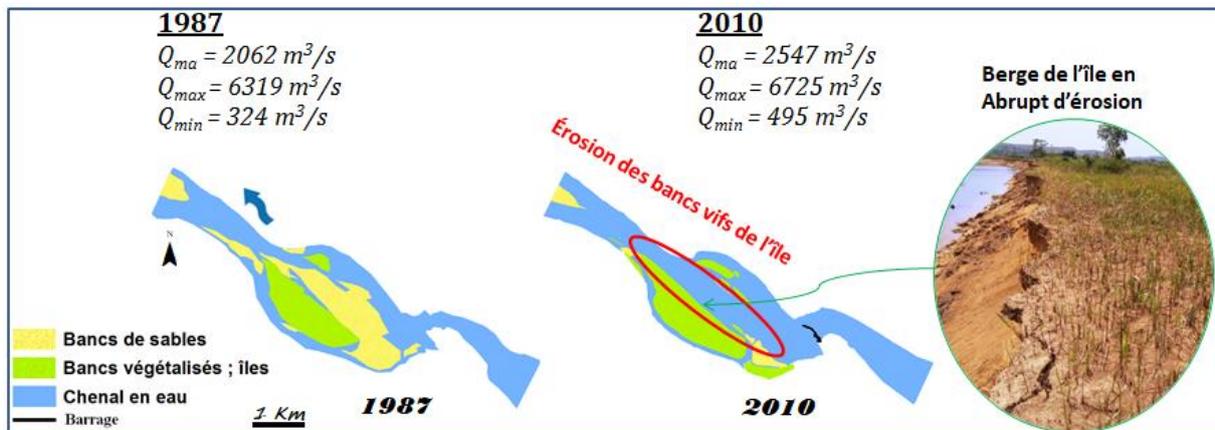


Figure 48 – Evolution morphosédimentaire de l'Oubangui à Mobaye
Figure 48 – Morphosedimentary evolution from Ubangui to Mobaye

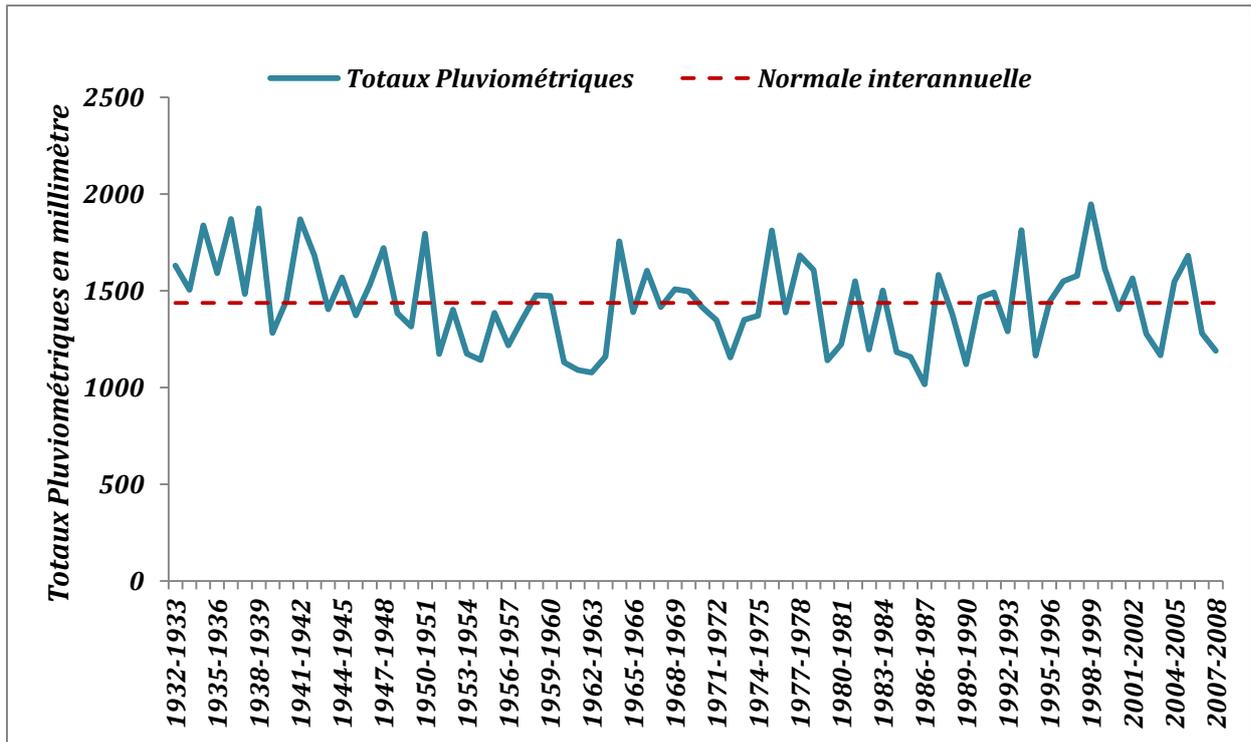


Fig. 49 – Totaux Pluviométriques de l’Oubangui à Bangui en millimètre
Fig. 49 – Rainfall totals from Ubangui to Bangui in millimeters

2- Un régime hydrologique « non altéré »

Effets sur le régime d'écoulement des débits moyens annuels (Q_{ma})

Sur le régime des Q_{ma} , le test d'Hubert a détecté trois ruptures précisément en 1959, 1970 et 1982 (fig. 50). Les trois ruptures détectées se traduisent par quatre tendances d'écoulement (fig. 50). En revanche, **aucune rupture n'a été détectée** après l'établissement du barrage en 1989.

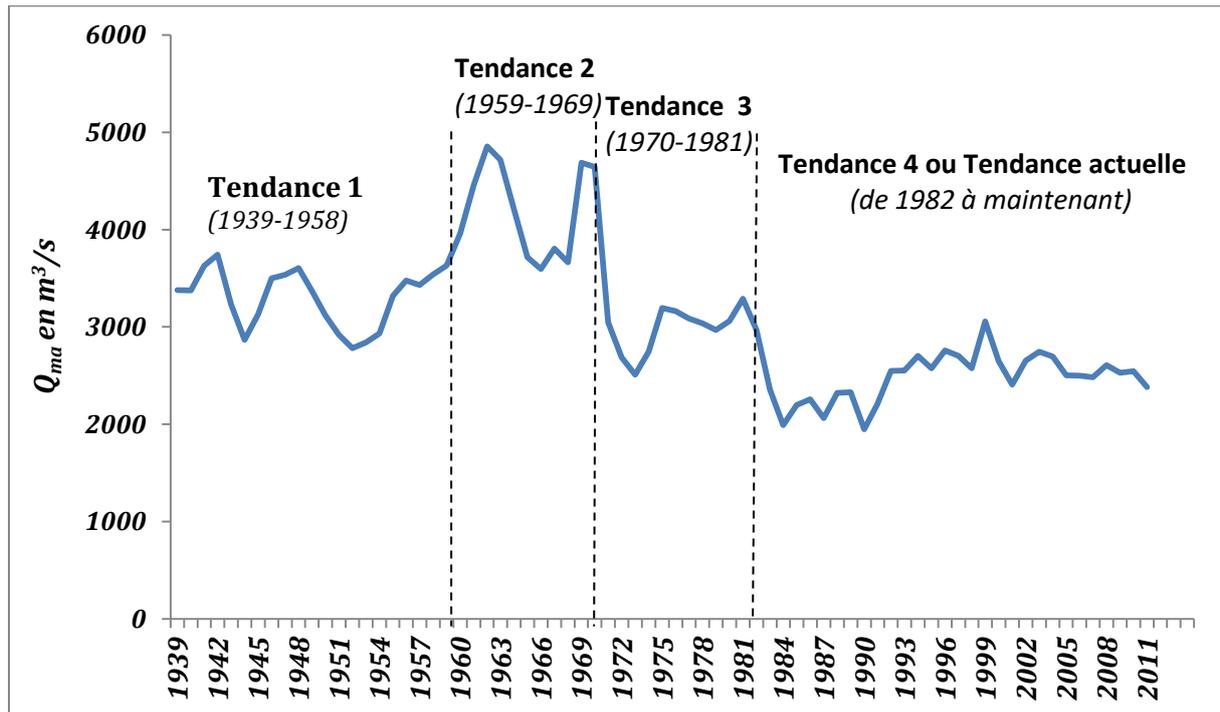


Figure 50 – Evolution interannuelle du Q_{ma} de l'Oubangui à Mobaye en année civile
Figure 50 – Interannual evolution of Q_{ma} from Ubangui to Mobaye in calendar year

Effets sur le régime d'écoulement des débits maximums annuels (Q_{max})

Sur le régime des Q_{max} , le test d'Hubert a détecté deux ruptures précisément en 1961 et 1970, correspondant à trois tendances d'écoulement (fig. 51). À l'image du Q_{ma} , **aucune rupture n'a été détectée**, non plus, sur le régime des Q_{max} après la régulation de l'Oubangui en 1989 par le demi-barrage de Mobaye.

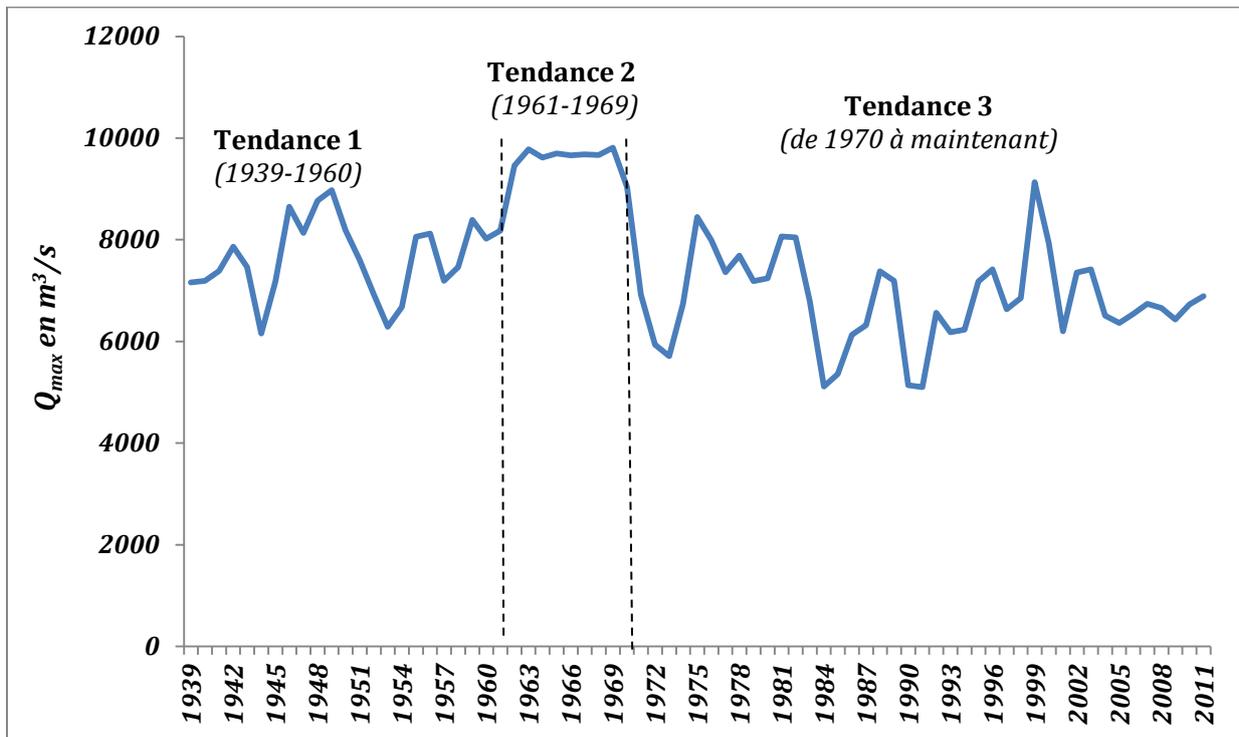


Figure 51 – Evolution interannuelle du Q_{max} de l'Oubangui à Mobaye en année civile
Figure 51 – Interannual evolution of Q_{max} from Ubangui to Mobaye in calendar year

Effets sur le régime d'écoulement des débits minimums annuels (Q_{min})

Sur le régime des Q_{min} , le test a détecté trois ruptures en 1961 ; 1963 et 1970 correspondant à quatre tendances d'écoulement (fig. 52). De même, **aucune rupture n'a été détectée** après l'établissement du demi-barrage en 1989.

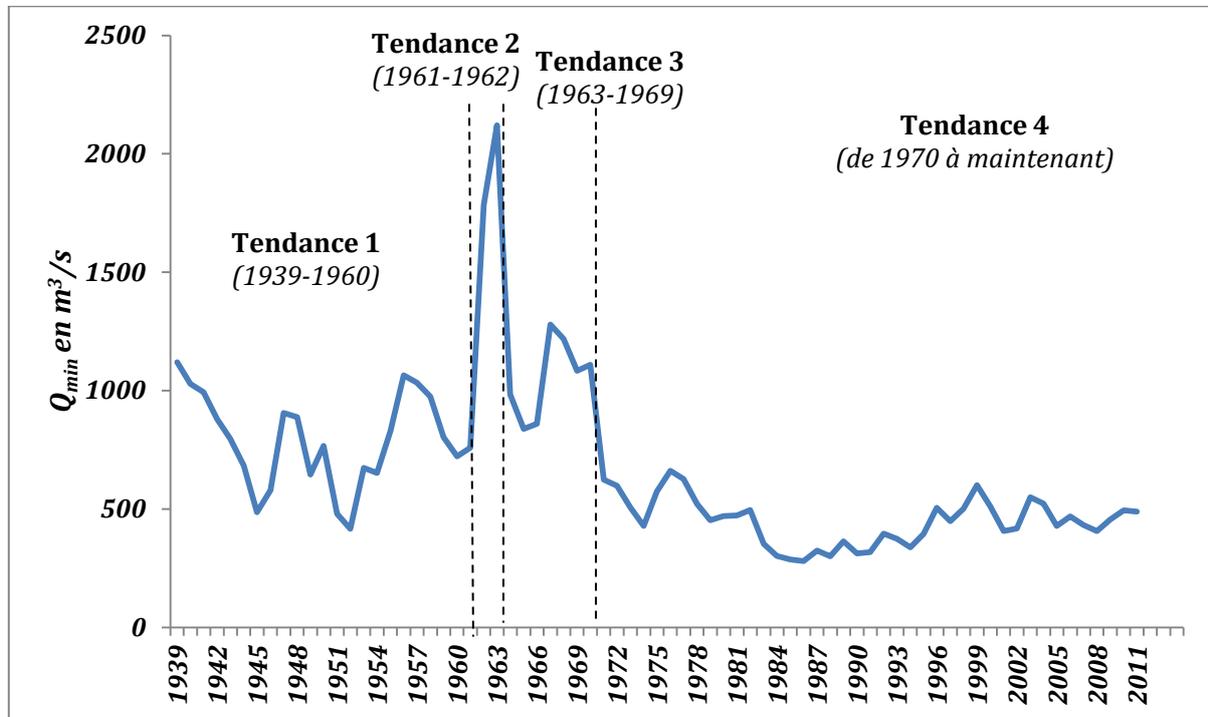


Figure 52 – Evolution interannuelle du Q_{min} de l'Oubangui à Mobaye en année civile
Figure 52 – Interannual evolution of Q_{min} from Ubangui to Mobaye in calendar year

Les résultats de nos analyses hydrostatiques ne nous révèlent pratiquement aucune influence du barrage sur le régime hydrologique de l'Oubangui car nos tests statistiques n'ont détecté aucune rupture dans le régime interannuel des Q_{ma} , des Q_{max} et des Q_{min} .

3- Un ouvrage « transparent » sur la continuité sédimentaire

Il se peut qu'il y ait un lien de cause à effet entre l'absence de rupture du régime hydrologique et l'absence de rupture du transit sédimentaire de l'Oubangui après sa régulation à Mobaye. En tout cas, les résultats de nos analyses sédimentologiques nous permettent de souligner que le demi-barrage de Mobaye n'exerce quasiment pas une influence significative sur le cortège sédimentologique de l'Oubangui, car il n'existe pratiquement pas de différence dans la texture granulométrique des alluvions prélevées en amont et en aval de l'ouvrage. Le D_{50} de la

charge sédimentaire prélevée en amont est de 0,17 mm, et celui de de la charge sédimentaire prélevée en aval est de 0,20 mm, soit une différence 0,03 mm. Or, cette différence est généralement très élevée sur certains barrages, notamment sur les grands barrages dont leurs réservoirs pouvant piéger entre 70 à 90% du volume sédimentaire en transit. Le piégeage s'opère généralement sous forme de tri granulométrique. Les sédiments grossiers (galets, graviers) se déposent alors dans la partie deltaïque du lac de barrage. Tandis que, les sédiments fins (sables, limons, argiles) se déposent au sein du réservoir. C'est en aval que l'on constate souvent une carence sédimentaire du fait de piégeage des alluvions dans le réservoir. Mais en aval du barrage de Mobaye, la rivière Oubangui n'est pas du tout dépourvue d'alluvions malgré un processus d'érosion progressive qui s'est mise en place. La texture granulométrique des alluvions de la partie amont est presque la même que celle des alluvions de la partie aval. Ce qui ouvre la possibilité d'affirmer que l'ouvrage hydraulique de Mobaye admet une certaine transparence sur les flux sédimentaires de l'Oubangui sur ce tronçon court-circuité. Nous demeurons persuadés que « la transparence » de l'ouvrage hydraulique de Mobaye sur le transport sédimentaire de l'Oubangui s'explique par le caractère en « demi-lit » du barrage (demi-barrage). En effet, l'obstruction partielle de la largeur du lit de l'Oubangui à Mobaye permet à la rivière de maintenir constamment un transport sédimentaire sur ce tronçon court-circuité.

Enfin, la présence des bancs alluviaux en aval semble marquer effectivement la transparence du demi-barrage sur les flux solides (*fig. 53*). L'image spot de 2010 utilisée nous a permis d'observer une alternance de bancs alluviaux sur le tronçon de l'Oubangui sur plus de 50 km (*fig. 53*). Ces bancs alluviaux sont couramment utilisés comme indicateurs pour évaluer la capacité de franchissement d'un barrage par des alluvions provenant de l'amont [Malavoi & al., 2011]. Leur présence symbolise la transparence d'un ouvrage sur la continuité sédimentaire, et leur absence, la rupture de cette continuité.

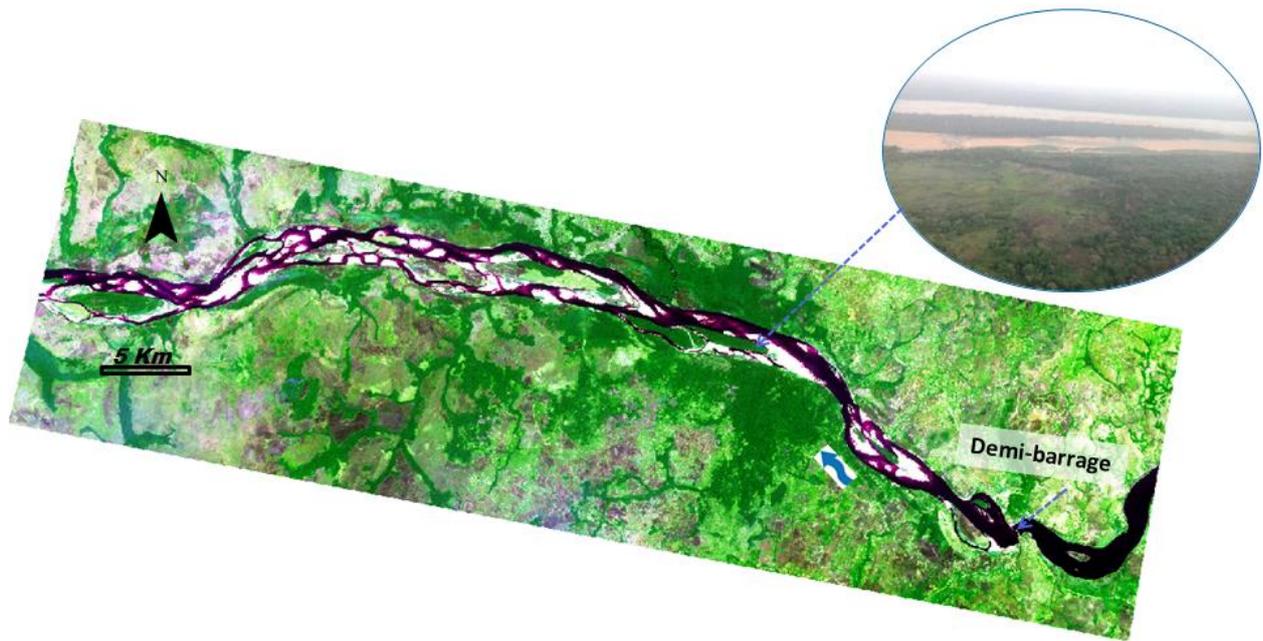


Fig. 53 – Morphologie fluviale de l’Oubangui à Mobaye. Image Spot 2010, Real: Nzango
Fig. 53 – River morphology of Ubangui at Mobaye. Spot Image 2010, Real: Nzango

4- Discussions

L’analyse spatiale du lit a permis de mettre en évidence une certaine variation dans la morphologie fluviale de l’Oubangui après sa régulation à Mobaye. Cette variation résulte des modifications enregistrées dans la géométrie hydraulique du chenal lors de la construction du barrage. Malgré les altérations morphologiques enregistrées, nos analyses hydrostatistiques n’ont révélé aucune cassure dans le régime hydrologique (Q_{ma} , Q_{max} et Q_{min}) après la régulation de l’Oubangui en 1989 (*tab. 6*).

Une rupture commune a toutefois été détectée en 1970 sur l’ensemble des paramètres hydrologiques étudiés. Cette rupture correspond à la rupture générale observée sur la majorité des hydrosystèmes tropicaux sous influence des effets des forçages climatiques de la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

Tableau 6 – Résultats du Test d’Hubert les trois paramètres hydrologiques étudiés
Table 6 – Hubert Test Results the three hydrological parameters studied

Paramètres hydrologiques	Année de Rupture
Q _{ma}	1959 ; 1970 ; 1982
Q _{max}	1961 ; 1970
Q _{min}	1961 ; 1963 ; 1970

Bien plus, nos analyses sédimentologiques ne mettent pas en évidence l'influence du barrage de Mobaye sur la continuité sédimentaire. Tout laisse croire que le demi-barrage de Mobaye semble être un modèle idéal pour un aménagement hydraulique durable, d'autant plus qu'il n'exerce quasiment pas d'impacts sur le régime hydrosédimentaire en dépit de quelques altérations morphologiques.

Du moins, tous ces résultats obtenus méritent d'être interprétés avec prudence.

- 1) Premièrement l'absence de cassure dans la distribution interannuelle du Q_{ma} , du Q_{max} et du Q_{min} après régulation ne signifie pas que le barrage de Mobaye est un ouvrage totalement transparent. Cela pourrait signifier que l'ouvrage de Mobaye altère le régime d'écoulement de l'Oubangui de manière moins significative contrairement à un barrage ordinaire doté d'un réservoir qui régule les débits des crues. Il est d'ailleurs possible de pousser cette analyse sur le comportement du « **calendrier hydrologique** » de l'Oubangui avant et après sa régulation. Dans notre analyse, nous avons pu observer un décalage temporel dans le calendrier hydrologique de l'Oubangui après sa régulation. Avant 1989, le *calendrier hydrologique* de l'Oubangui était réparti entre *avril-mars*. Le mois *d'avril* correspondait au début de *crues*, et le mois de *mars*, à la fin de *décrue*. L'avènement du demi-barrage en 1989 a entraîné une légère variation temporelle dans ce calendrier. Au lieu *d'avril-mars*, le calendrier hydrologique tend désormais à être réparti entre *mai-avril*, avec un mois de *mai* correspondant au début de *crues*, et un mois *d'avril* à la fin de *décrue*. De même, le *pic de crues* sur l'Oubangui migre progressivement du mois *d'octobre* vers le mois de *novembre* après sa régulation. Avant l'établissement du barrage, le mois *d'octobre* concentrait plus de 75% du *mode* d'alimentation de crues sur l'Oubangui. Mais depuis 1989, celui-ci ne concentre que 59% du pic de crues, soit un déficit de -16%.
- 2) Deuxièmement, la présence des bancs alluviaux en aval ou l'absence de perturbations dans le cortège sédimentologique de l'Oubangui ne doit pas nécessairement se traduire par la « transparence » du barrage sur la continuité sédimentaire, au contraire cela pourrait se traduire par l'absence des crues rares qui sont susceptibles de mobiliser et d'évacuer les bancs alluviaux. L'utilisation d'autres indicateurs de transparence sédimentaire, comme les *traceurs équipés de transpondeurs passifs intégrés (PIT)*, aurait pu déboucher sur des résultats concluants et plus précis.

Conclusion du premier chapitre

L'ensemble des analyses conduites dans ce chapitre a permis d'apporter un regard nouveau sur les effets des petits barrages en rivières. Faisant l'objet de nombreuses suppressions dans les pays avancés, les petits barrages ont fait l'objet de très peu de publications scientifiques si bien que leurs effets sur les rivières soient mal connus. Le barrage de Mobaye est un ouvrage hydroélectrique aménagé au fil de l'eau sur l'Oubangui. Sa construction s'est faite en demi-lit suite au désistement de la République Centrafricaine à assurer la continuité du barrage vers la rive droite. Le barrage a été érigé sur l'un des rapides de l'Oubangui à Mobaye. Sa construction a nécessité quelques travaux de dérochement des blocs quartzeux qui resserrent le lit dans ce secteur fonctionnel. De ce fait, quelques changements ont été enregistrés dans la géométrie hydraulique locale de l'Oubangui après cet aménagement. Par exemple, l'écoulement est devenu de plus en plus turbulent dans la moitié du lit non obstruée par l'ouvrage en travers. Sur un autre plan, l'établissement du barrage a suscité de nombreuses indignations des riverains de l'Oubangui, car ces derniers ont perdu une partie de leurs moyens de subsistances après l'aménagement. Mais l'électrification de la ville de Mobaye et ses environs (rive gauche) a contribué plus ou moins à améliorer le cadre de vies des autochtones. La pêche qui était l'une des activités principales est de plus en plus pratiquée par toutes les tribus locales. Des activités commerciales autour des produits de la pêche se sont aussi créées. Dans l'optique de notre recherche qui était d'évaluer l'impact du demi-barrage sur la dynamique fluviale de l'Oubangui au moyen des jeux de données limnimétriques et planimétriques, nous n'avons souligné aucun effet significatif du demi-barrage sur le régime d'écoulement interannuel de l'Oubangui malgré quelques altérations enregistrées sur la morphologie fluviale et dans le calendrier hydrologique. Aucune cassure n'a été signalée dans le régime des débits moyens, maximums et minimums de l'Oubangui. De plus, le demi-barrage n'entraîne pas une rupture dans le transit sédimentaire de l'Oubangui. Cette « transparence » peut s'expliquer par la structure en demi-lit du barrage.

Par ailleurs, le barrage de Boali sur la rivière Mbali n'a pas la même structure hydraulique que celle du barrage de Mobaye. Le barrage de Boali est en effet un barrage-réservoir. Son ouvrage en travers obstrue la totalité de la largeur de la rivière Mbali, et son réservoir est formé d'un immense lac artificiel capable de piéger de gros volumes sédimentaires. Dans ce contexte, on s'intéressera alors à évaluer dans le chapitre suivant, l'influence du réservoir de la Boali sur le continuum fluvial de la rivière Mbali.

Chapitre 2 – Etudes de cas du barrage-réservoir de Boali

Le deuxième chapitre de cette partie étudie les effets du barrage de Boali sur le continuum hydrosédimentaire de la rivière Mbali. On présentera d'abord le complexe hydraulique de Boali, puis l'approche méthodologique adoptée, et enfin les résultats obtenus.



A- Le complexe hydraulique de Boali

1- Le barrage de Boali et son environnement lithique

Le barrage de Boali ($18^{\circ} 00' 05'' E, 4^{\circ} 55' 10'' N$) a été inauguré en 1991 dans le but de réguler le débit de la rivière *Mbali* (fig. 54a) afin de soutenir la production d'énergie de deux centrales hydrauliques préexistantes. Avant tout, la *Mbali* est caractéristique d'une rivière de moyenne altitude sur un contexte géologique cristallin. Elle tire sa source au pied du plateau gréseux de *Gadzi-Carnot* à environ 800 mètres d'altitude, elle fraye des chemins entre les lignes de fracturations structurales de l'escarpement de la surface Centrafricaine pour s'écouler vers la *Pama* avant de rejoindre l'Oubangui (fig. 54a). Cette descente se fait par palier ou *marche-cuvette* (*step-pools*). Son bassin est influencé principalement par la tectonique cassante. La profusion des *chutes d'eau*, des *chaos rocheux* (photo 13a) et des *plantes lithophytes* (photo 13b) sont manifestement des marqueurs du « métamorphisme » du bassin. Le barrage de Boali a été érigé sur un massif rocheux (schisto-quartzeux) afin de résister à la pression de l'eau. Il s'agit d'un barrage-poids, dont la partie centrale de l'ouvrage est faite en béton et les ailes en terre (fig. 54c).

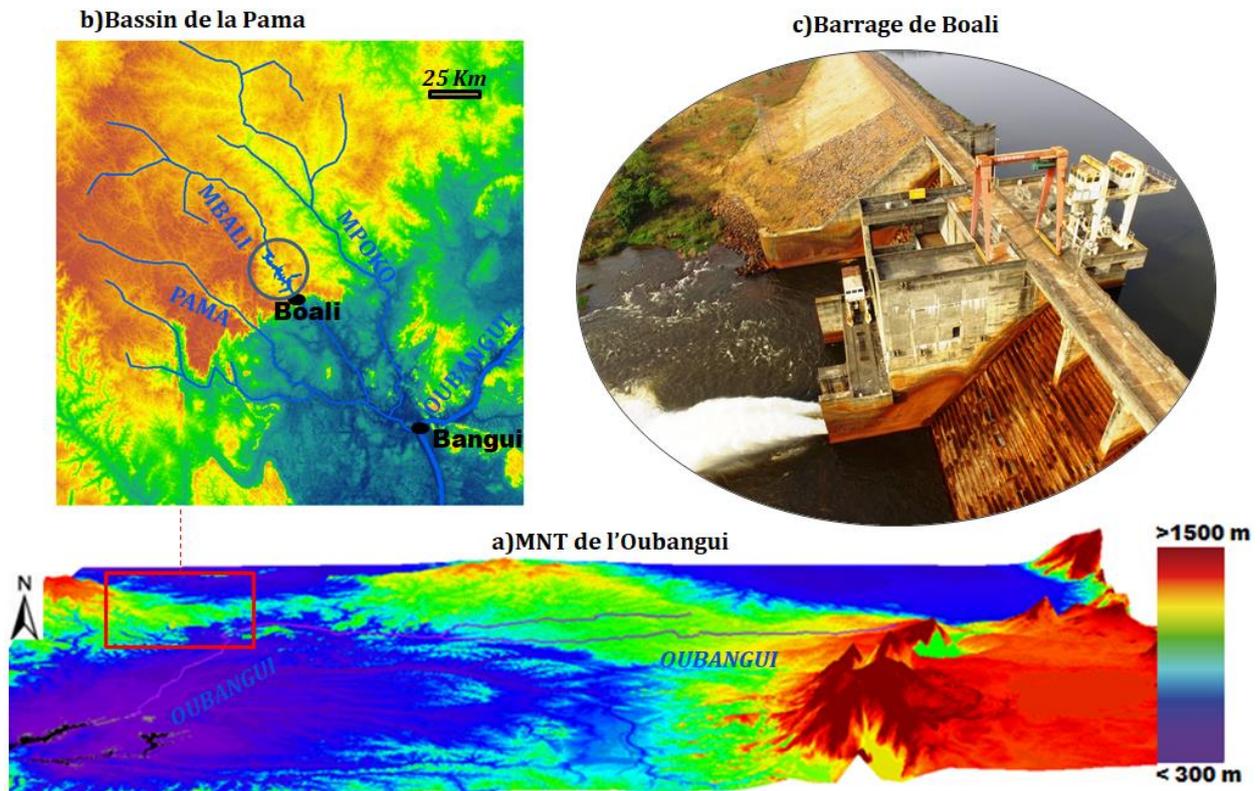


Fig. 54 – Le barrage de Boali sur la rivière Mbali
Fig. 54 – Boali Dam on the Mbali River

a) Chaos sur les marges de la Mbali



b) Les arbres lithophytes sur les marges de la Mbali



Photo 13 – Environnement lithique de Boali
Photo 13 – Lithic environment of Boali

La réalisation de l'ouvrage est assurée par le bureau d'Ingénieur-conseil « *Coyne & Bellier* », et sa gestion, par la société nationale d'énergie Centrafricaine (ENERCA). Le chantier a duré 27 mois (1988-1991) pour un coût de construction de 15 millions d'euro. Le barrage contrôle un bassin versant péri-forestier de 4 500 km² (*fig. 55*). Le lac de barrage est long de 20 km pour un volume d'eau de 250 millions de mètre cube à la cote normale.

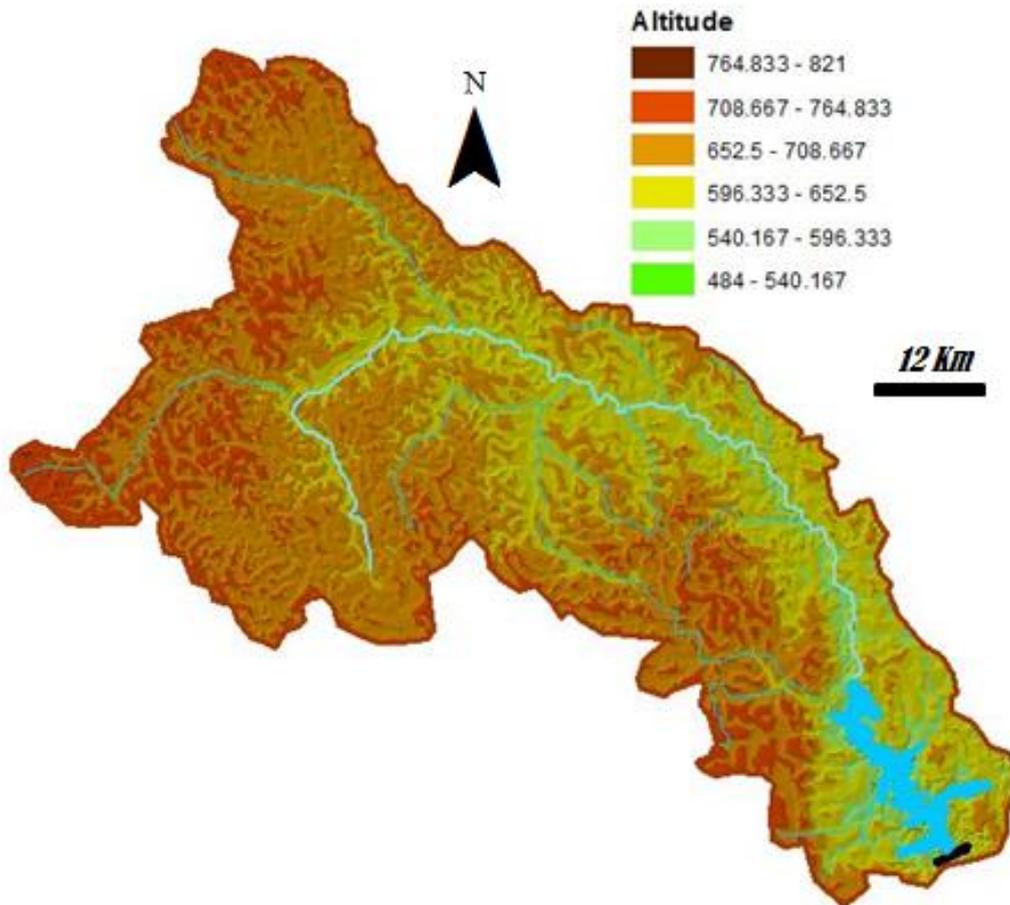


Fig. 55 – Bassin versant contrôlé par le barrage de Boali
Fig. 55 – Watershed controlled by the Boali dam

Deux objectifs majeurs ont motivé la construction de ce barrage :

- 1) premièrement, il s'agit de réguler le débit de la Mbali pour soutenir la production hydraulique des centrales hydrauliques préexistantes. La première centrale hydraulique sur la Mbali a été installée en 1954, et la deuxième en 1976. Les centrales de Boali 2 et Boali 1 se situent respectivement à 8 km et 10 km en aval du barrage de Boali 3. Le projet de construction du barrage était apparu comme une alternative pour la gestion des ressources en eau de la rivière Mbali afin d'optimiser la capacité de production des centrales de Boali 1 et 2 pour alimenter en électricité la ville de Bangui, située à environ 90 km de Boali. Les deux centrales produisent une capacité d'énergie totale de 18,65 MW. Mais la capacité produite s'avère très faible pour soutenir la croissance urbaine fulgurante de la ville de Bangui depuis 1960 (*fig. 42*). De nos jours, la demande en électricité de Bangui aux heures de pointes dépassent

largement les 50 MW, alors que la fourniture totale des centrales (centrales hydrauliques + centrales thermiques) n'est que de 40, 65 MW.

- 2) Le deuxième objectif d'aménagement du barrage est de produire de l'hydroélectricité via une troisième centrale dénommée, centrale de Boali 3. Cette nouvelle centrale est installée directement dans l'axe central de l'ouvrage. Sa production devrait dépasser les 10 MW. Mais cet objectif n'est pas encore atteint. Le barrage ne remplit pour le moment que le premier objectif, qui est celui de la régulation du débit de la Mbali pour permettre aux usines de Boali 1 et 2 de maintenir en toute saison leurs unités en service.

Un dispositif d'auscultation été mis en place par l'Ingénieur-Conseil afin de surveiller le comportement du barrage. Celui-ci est constitué :

- ✓ Des mesures d'auscultation dynamique qui concernent les mesures de pression interstitielle, du drainage en galerie et de déformations etc. (*photo 14a*).
- ✓ Des mesures d'auscultation topographiques : Les mesures en Altimétrie (les repères de tassement) ; Planimétrie etc. (*photo 14b*)
- ✓ L'inspection visuelle des ouvrages.
- ✓ Des observations hydrométéorologiques concernant les conditions climatiques sur le site du barrage à travers les mesures de pluviométrie (*photo 14d*), de températures, de la cote de retenue (*photo 14c*) et de la hauteur d'eau de la Mbali en aval.

Mais depuis quelques années, les mesures d'auscultations physiques ne sont plus effectives à cause du dysfonctionnement des appareils de mesures, seule l'auscultation visuelle est toujours opérationnelle, et effectuée par un agent de l'ENERCA. Cette situation rend éventuellement le barrage vulnérable aux risques de ruptures. La rupture d'un barrage peut être brutale ou progressive, elle entraîne en effet une submersion d'eau en aval du barrage. L'onde de submersion peut occasionner des dommages considérables sur les hommes, sur les biens et sur l'environnement. C'est pourquoi il est toujours nécessaire d'inclure dans le projet de construction de grands barrage, une carte de risque de submersion afin de représenter les zones potentiellement inondables en cas de rupture totale de l'ouvrage.



Photo 14 – Les mesures d’auscultations sur le barrage de Boali. Source: ENERCA.

Photo 14 – Monitoring measures on the Boali dam. Source: ENERCA.

2- Contributions sociales de l’ouvrage

Hormis l’électrification de la ville de Bangui et de Boali par l’énergie produite, la construction du barrage de Boali a permis à la population d’acquérir une nouvelle source de revenus : la pêche [Minot, 2005]. De plus, elle a permis la création de petits commerces et d’activités artisanales nouvelles telles que la fabrication de Pirogues et de filets de pêche. Minot (2005) a signalé le cas des éleveurs peuhls reconvertis en pêcheurs. La population de Boali et ses environs s’élève à plus de 20 000 habitants. Une partie a été délogée, indemnisée et relogée dans une zone de recasement. Contrairement à Mobaye où il y a eu quelques soucis dans l’intégration des autochtones suite à la régulation de l’Oubangui, Beto (2012) a montré qu’à Boali, il n’y a donc pas eu de problème majeur du côté intégration. La pêche qui était une activité secondaire est devenue l’une des principales activités de la région. L’agriculture n’est pas délaissée par l’avènement du barrage. Depuis, la ville de Boali est devenue la première pourvoyeuse en produit vivrier de la ville de Bangui [Beto, 2012]. Les peuhls qui, jadis étaient des « nomades » se sont sédentarisés et pratiquent la *culture attelée* en parallèle

avec leurs activités pastorales. La population locale a servi aussi d'importantes mains-d'œuvre dans l'établissement du barrage. L'apport du projet en matière de formation des personnels de l'ENERCA a été très appréciable [Doumbia & Ba, 1994].

Au plan social, le projet a permis d'améliorer l'habitat et les conditions de vie des populations recasées. Le projet a contribué à réduire les maladies d'origine hydrique par la création des points de forages dans les zones (*photo 15*). Le projet a aussi permis la construction des établissements publics (ex : école primaire, maternité, centre de santé).



Photo 15 – Un point de forage dans la commune de Boali. Cliché : Nzango, 2015.
Photo 15 – A water drilling point in the municipality of Boali. Photo: Nzango, 2015

B- Méthodologie de l'étude d'impact du barrage de Boali

Dans le chapitre précédent, nous avons utilisé la méthode de « *station témoin* » afin d'évaluer l'effet hydromorphologique du demi-barrage de Mobaye sur la rivière Oubangui. Dans ce chapitre, nous ne pouvons pas appliquer la même méthode dans la mesure où nous ne disposons pas de données rétrospectives sur la rivière Mbali à l'endroit de Boali. De ce fait, nous avons réalisé un diagnostic hydrologique en vue d'identifier d'éventuels changements induits par le barrage sur la rivière Mbali.

1- Données collectées

Deux ordres de missions ont été accordés par la société ENERCA pour cette recherche. Le 1^{er} concerne la mission numéro 234 de 2015, et le deuxième, la mission numéro 078 de 2016. Ces différentes missions ont permis de souligner deux types d'impacts induits par l'établissement du barrage :

Le premier impact concerne la modification du paysage fluvial de la Mbali lors de l'aménagement du barrage. On l'a vu, la commune de Boali est située aux confins de la forêt dense humide. Sa végétation est du type savane arbustive. Des opérations de déboisement et d'excavations ont été nécessaires pour l'érection du barrage et pour la mise en eau du réservoir. Des ouvertures ont été également faites dans le paysage pour l'acheminement des lignes de hautes tensions [Minot, 2005]. Ces différents travaux contribuent à modifier le paysage fluvial de la région de Boali. Pour cet impact primaire, nous avons utilisé **les données satellitales** afin de mettre en évidence les changements d'occupation du sol enregistrés depuis l'aménagement de Boali. Deux images satellitales *Landsat (TM et ETM+)* ont servi pour cette analyse sur le logiciel *ENVI 5*. Une image *TM* de 1986 et une autre image *ETM+* de 2010.

L'impact secondaire concerne les effets du barrage sur l'écoulement de la Mbali. A cet effet, nous avons collecté **des données hydrologiques** et **sédimentologiques** en vue d'analyser l'influence du barrage sur les flux hydriques et sédimentaires. Les données hydrologiques sont fournies par le service de gestion du plan d'eau de l'ENERCA, et celles-ci concernent la *cote de retenue (photo 16a)*, et la *hauteur d'eau* de la rivière Mbali en aval de l'ouvrage. Les données sédimentologiques concernent les matériaux échantillonnés dans le fond du réservoir, notamment la carotte prélevée au milieu de la retenue (*photo 16b*). La prestation du carottage a été fournie par le laboratoire LHL de Bangui. L'analyse de la carotte permet de déterminer

le taux de sédimentation dans le lac artificiel de Boali. Elle renseigne également sur la nature et la taille des sédiments piégés dans ce réservoir. Certaines photographies du site d'étude ont été prises par notre drone. Nous rappelons aussi que l'utilisation de cet appareil n'a pas été aussi facile dans le contexte actuel en Centrafrique, néanmoins, celui-ci nous a permis de prendre un certain nombre de photographies avec une meilleure résolution.

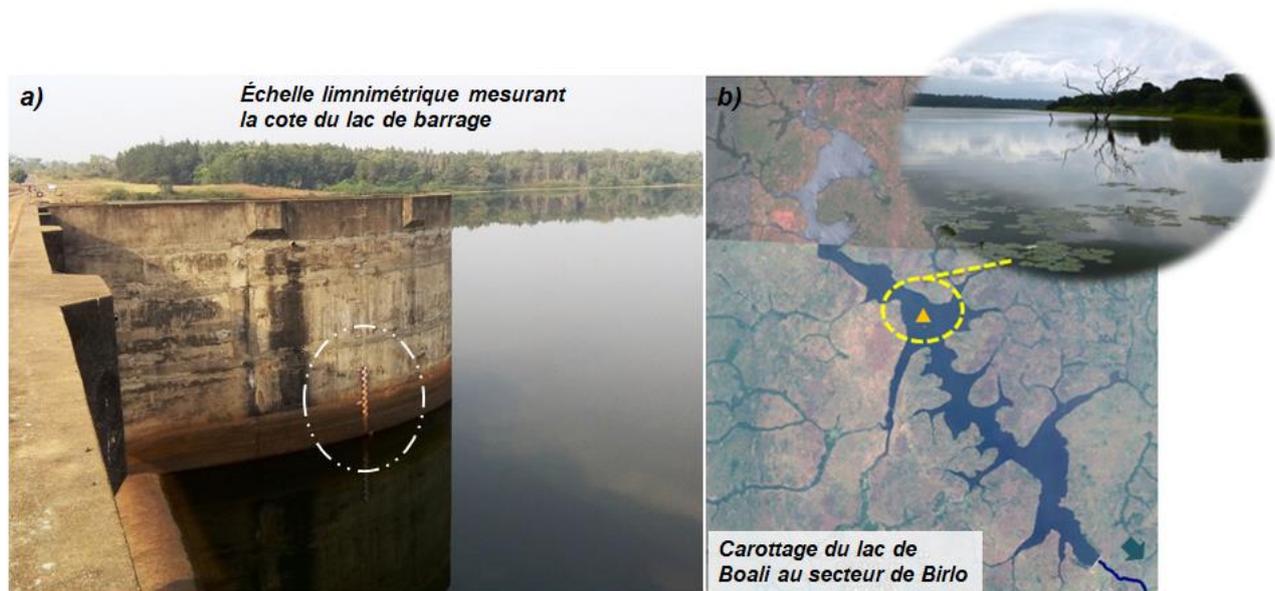


Photo 16 – Photographie du site de carottage sur la Mbali (cliché : Nzango, 2015)
Photo 16 – Photography of the drilling site on the Mbali (author: Nzango, 2015)

2- Traitement de données

Les images satellitales *Landsat* ont été traitées sur le logiciel de télédétection *ENVI 5* afin d'évaluer l'impact primaire du barrage sur l'occupation de sol de la commune de Boali. La méthode de *Maximum Likelihood* a été préférée pour la *classification*, et la *post-classification Majority/Minority* a été aussi appliquée. Le traitement a été effectué au moyen des machines du laboratoire CEDETE de l'Université d'Orléans.

Les données hydrologiques ont été analysées simplement sur l'office Microsoft Word 2010, alors que la carotte sédimentaire a été analysée au LNBTP de Bangui en Centrafrique

Lors du diagnostic, nous avons également réalisé un échantillonnage physico-chimique du barrage afin de déterminer la qualité trophique de l'eau du réservoir nécessaire à la reproduction et à la survie des espèces aquatiques. Les paramètres physico-chimiques

analysés sont : le Potentiel d'Hydrogène, la Conductivité, les Nitrates et l'Oxygène Dissous. Les échantillons ont été analysés au laboratoire LHL (*Laboratoire Hydroscience Lavoisier de Bangui*) par la méthode *Potentiométrique*. En complément à ces analyses, nous avons réalisé des enquêtes auprès des autochtones afin de recueillir leurs avis sur les avantages et inconvénients de la construction du barrage de Boali.

C- Résultats

1- Impacts du barrage sur le paysage fluvial de la Mbali

Le traitement des images satellitales met en évidence quelques variations dans l'occupation du sol de la commune de Boali (*fig. 56*). Les changements enregistrés concernent globalement la réduction de la surface forestière au profit de la surface savanicole et des sols nus. En moins de 30 ans, la forêt dense a perdu près de 15% de sa surface. Le réservoir a envahi 32 km² du milieu naturel. Des espaces agricoles et résidentiels ne sont pas du tout épargnés par l'engloutissement. En revanche, aucune étude n'a été faite sur les pertes en eau du lac artificiel de Boali. Nous avons remarqué par ailleurs que les pertes en eau d'un réservoir dépendent de sa taille (surface et profondeur): plus grande est la surface du réservoir, plus grandes seront les pertes d'eau par évaporation ; moins profonds sont les réservoirs, plus importantes sont aussi les pertes par évaporation, au point de compromettre son exploitation [Martins, 2008]. En plus de la taille d'un plan d'eau, le type de plantes aquatiques présentes dans le lac peut augmenter ou pas le taux d'évapotranspiration.

La réduction de la couverture végétale expose cependant le versant de la Mbali au ruissèlement et à l'aléa d'érosion (*fig. 57*) [Bétot, 2012]. Non seulement l'érosion chimique prédomine dans ce contexte, mais l'érosion mécanique est aussi présente. L'érosion chimique se manifeste par l'élimination des minéraux primaires des roches en place pour donner une sorte d'argile de type kaolinite pauvre en silice ou d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Ce processus d'altération chimique est connu en domaine tropical sous le nom de « *ferrallitisation* ».

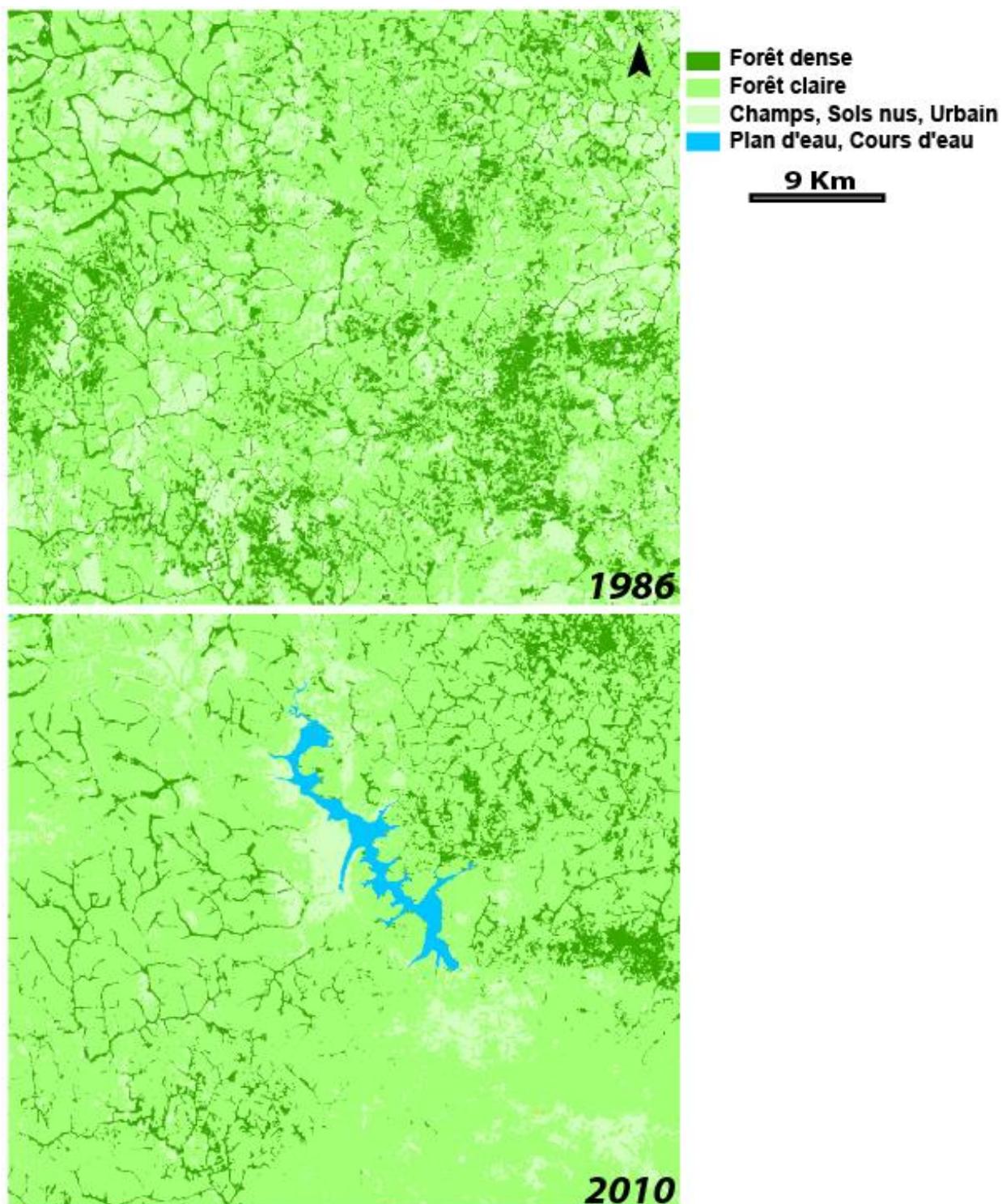


Fig. 56 – Occupation du sol à Boali 3 entre 1986 – 2010

Fig. 56 – Landuse in Boali 3 between 1986 – 2010

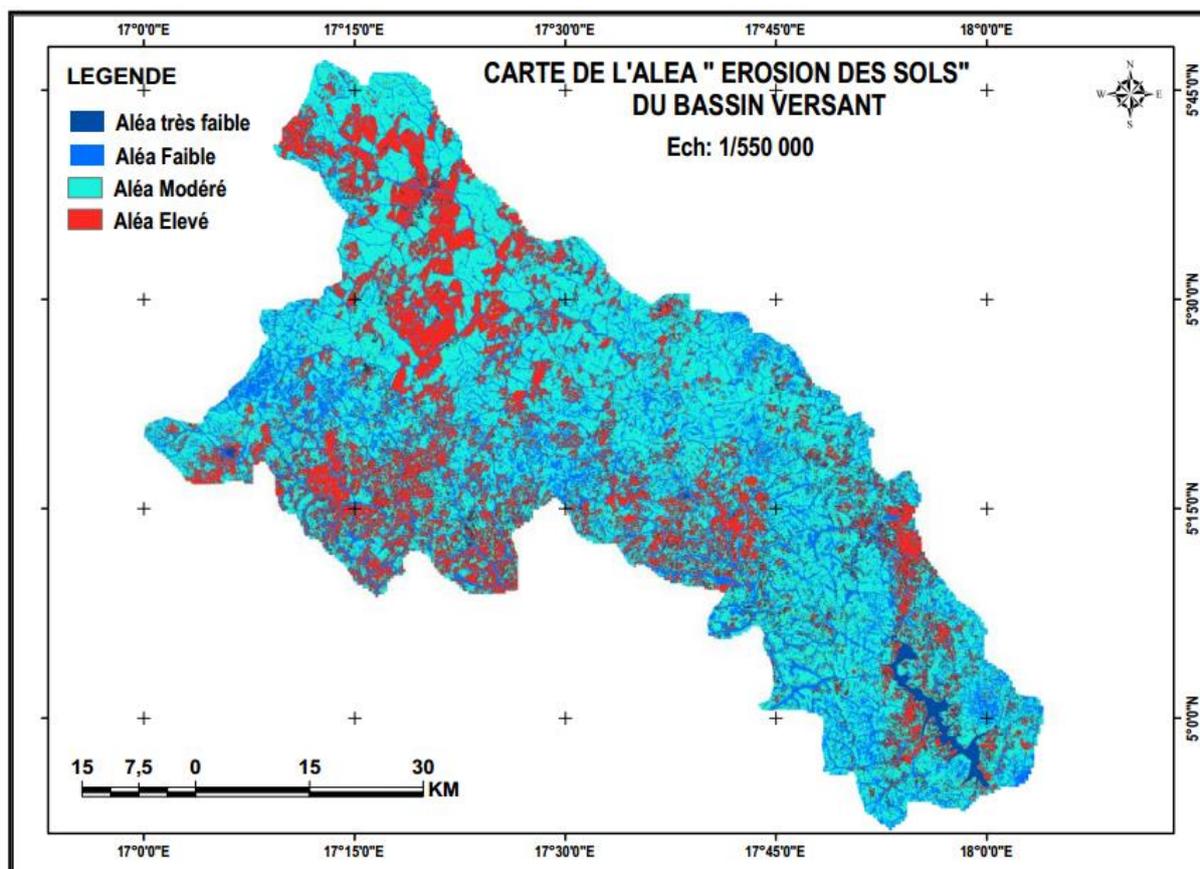


Fig. 57 – Carte de l'aléa d'érosion des sols du bassin versant de la Mbali contrôlé par le barrage. Beto (2012)

Fig. 57 – Map of the soil erosion hazard of the Mbali watershed controlled by the dam. Beto (2012)

2- Impacts du barrage sur les flux liquides

Des fluctuations ont été observées sur la courbe d'évolution de la *cote de retenue* du barrage (*fig. 58*) à cause des pulsations des vannes du barrage. Ces pulsations dépendent étroitement des besoins en eau des centrales hydrauliques. Il en résulte aussi en aval, des fluctuations de la hauteur d'eau de la rivière Mbali. Une légère hausse d'écoulement a ainsi été observée en aval du barrage après la régulation de la rivière en 1991 (*fig. 59*), et cela a contribué à perturber le cycle biologique des communautés aquatiques. Contrairement à Mobaye où la pêche est très productive en aval du barrage, à Boali, la pêche en aval n'est pas du tout prospère. Selon nos entretiens réalisées auprès de onze (11) pêcheurs locaux, 80% des enquêtés ont constaté une diminution du peuplement aquatique en aval après la régulation de la rivière Mbali. Mais ce constat n'est pas le même à l'intérieur du réservoir où, ces derniers ont signalé une abondance des ressources piscicoles depuis la mise en eau du réservoir.

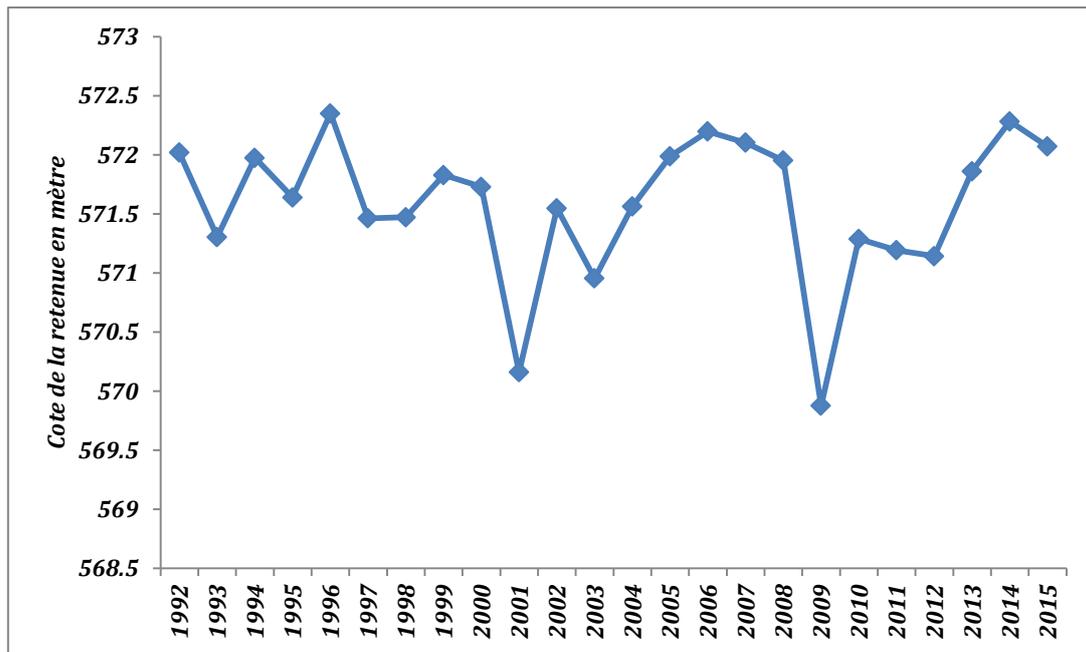


Fig. 58 – Evolution de la cote de retenue du barrage depuis 1992
Fig. 58 – Evolution of dam retention since 1992

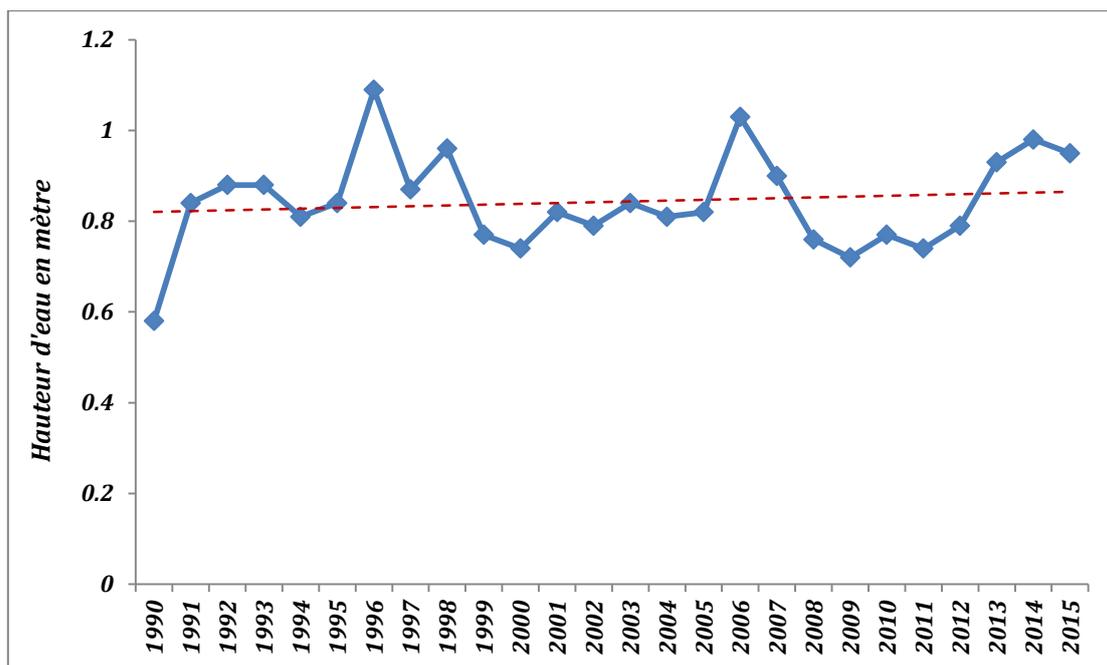


Fig. 59 – Evolution de la hauteur d'eau de la rivière Mbali en aval du barrage de Boali
Fig. 59 – Evolution of the water level of the Mbali River downstream of the Boali dam

Les fluctuations observées dans l'écoulement de la rivière Mbali après sa régulation ont tout de même eu des conséquences sur le calendrier hydrologique de la rivière. Comme sur l'Oubangui, le calendrier hydrologique initial de la Mbali est souvent reparti entre *avril-mars*.

Par conséquent, le calendrier hydrologique a été légèrement modifié après l'établissement du barrage à Boali. Il est de plus en plus réparti entre *mai-avril*. Le mois de *mai* correspond désormais à la reprise d'écoulement sur la Mbali alors que cette reprise se faisait au mois d'*avril*. De même, le mois d'*avril* correspond désormais à la fin de décrue alors que celle-ci se faisait au mois de *mars*. Enfin, le pic de crue d'*octobre* est de moins en moins ressenti sur la rivière depuis sa régulation (fig. 60). Ce pic est désormais variable entre les mois de septembre, d'octobre et de novembre.

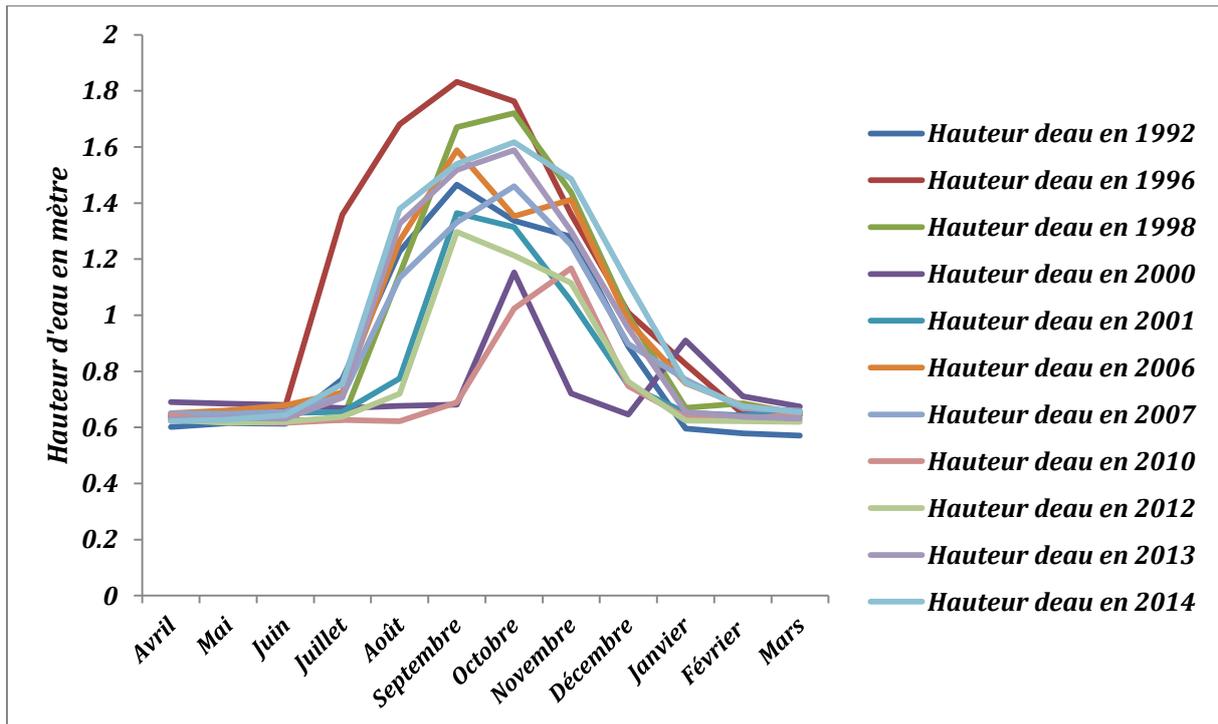


Fig. 60 – Régime hydrologique de la rivière Mbali en aval du barrage de Boali
Fig. 60 – Hydrological regime of Mbali river downstream of Boali dam

3- Impacts du barrage sur les flux sédimentaires

La sédimentation dans les lacs 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 [Boung Heng, 2013]. Lorsqu'elle est mal maîtrisée, elle peut conduire au comblement progressif de la retenue, et à réduire la rentabilité des ouvrages. Un enjeu primordial pour les gestionnaires est toujours de mieux gérer leur réservoir afin de limiter les risques associés au comblement.

Le carottage effectué a permis de comprendre le rythme de sédimentation du lac de barrage de Boali ainsi que la nature des sédiments qui s'y accumulent. L'épaisseur de la carotte prélevée est de 20 cm après 25 ans de mise en service du barrage, ce qui correspond à un taux de sédimentation moyenne de 0,8 cm/an. Un taux relativement faible pour un réservoir qui n'a jamais été vidangé. Les normes de construction de ce barrage prévoyaient une vidange du réservoir de Boali tous les 10 ans, mais celle-ci n'a jamais été réalisée une seule fois. Néanmoins, la valeur de comblement obtenu est totalement insignifiante quand on fait la comparaison avec d'autres lacs tropicaux. Dans la région de N'Gaoundéré au Cameroun, Daiwe & al. (2010) ont montré que le taux de comblement du lac *Dang* s'élève à près de 2,7 cm/an. Mais c'est au Maghreb que les barrages enregistrent des taux records de sédimentation lacustre (près de 1 m/an) à cause d'érosion et de ruissellement des bassins versants. Mais le résultat obtenu sur le lac de Boali mérite d'être nuancé car une seule carotte ne peut renseigner avec certitude le taux de sédimentation d'un grand lac artificiel. Nous aurions pu échantillonner plusieurs endroits sur le lac afin d'aboutir à de conclusions intéressantes. Si nous l'avions pas fait c'est par ce que nos moyens étaient limités lors de ce diagnostic.

Il est d'ailleurs possible de pousser plus loin l'étude de la carotte sédimentaire à travers une analyse sédimentologique permettant de connaître la nature et l'origine des sédiments qui s'accumulent au fond du réservoir de Boali. Ainsi, les matériaux accumulés sont des matériaux fins (fraction limono-argileuse) ayant une granulométrie moyenne inférieure à 50 micromètre et une teneur en eau avoisinant les 50%. Leur faible texture granulométrique reflète les conditions hydrosédimentaires de la rivière Mbali, et leur teneur en eau s'explique par la présence de l'argile dans la composition. Les matériaux échantillonnés sont en effet constitués des sédiments terrigènes et biodétritiques.

- 1) Les sédiments terrigènes sont issus de la décantation des matières particulaires provenant de l'érosion du versant et des marges du lac. Pourriot & al. (1995) a de ce fait montré que les lacs sont fortement influencés par leur bassin versant, l'influence du bassin versant s'exerce par les apports de celui-ci en eau, en matériaux dissous ou particulaires, énergie, ainsi que par les caractéristiques morphologiques de sa cuvette et l'âge du lac.
- 2) Les sédiments biodétritiques sont ceux issus de la production autochtone du réservoir, notamment des sédiments issus particulièrement de la minéralisation des matières

organiques du réservoir (décomposition progressive des débris des macrophytes, des cadavres d'animaux et des végétaux préexistés à l'enneigement du milieu).

C'est en aval du barrage que l'effet de la sédimentation du réservoir est plus ou moins prononcé. Etant dépourvue d'alluvions, la rivière Mbali, avec son eau claire, ne coule que sur des galets sur le tronçon situé en aval du barrage (*photo 17*). Ce déséquilibre sédimentaire pourrait avoir des dommages sur l'habitat des communautés aquatiques.



Photo 17 – La rivière Mbali à 11 Km en aval du barrage de Boali
Photo 17 – The Mbali River about 10 km downstream of the Boali dam

4- Impacts du barrage sur l'habitat des poissons

Sur le plan écologique, la mise en eau du lac de barrage de Boali a apporté des modifications dans le paysage fluvial de la rivière Mbali. En amont du barrage, un paysage lacustre s'est formé pour se substituer au paysage fluvial initial (*fig. 61*). Ce changement paysager s'est accompagné d'un changement d'habitat, qui se traduirait par une « mutation écologique » au sein des communautés aquatiques. La majorité des pêcheurs sondés ont dit avoir constaté une diminution du peuplement des espèces aquatiques locales quelques années après la mise en eau du lac de barrage. Toutefois, ils ont observé une prolifération de nouvelles espèces de poissons, en l'occurrence, le « *tilapia* », dans le lac de barrage.

Considéré comme étant une espèce invasive dans certaines régions, le tilapia est une espèce opportune, omnivore, capable même de s'adapter dans un habitat lentique et lotique. D'ailleurs, d'autres recherches scientifiques ont même signalé la présence des Tilapia dans le lac alcalin du cratère de Ngorongoro en Tanzanie. Leur forte capacité d'adaptation leur permet de survivre dans des milieux extrêmes. Mais, en ce qui concerne notre bassin d'étude, le Tilapia n'est pas considéré comme une espèce à éradiquer, au contraire il est bien accueilli par les autochtones qui le considèrent désormais comme l'emblème de la ville de Boali.

En revanche, un flou persiste cependant sur l'origine de cette espèce dans le lac de barrage de Boali. Pour certains, le tilapia a été introduit délibérément par des employés d'une société Chinoise qui assistait à la construction du barrage. Pour d'autres, l'espèce s'est développée spontanément dans la retenue. Mais ce dernier n'est pas la seule espèce à proliférer dans le lac de Boali ; des crocodiles ont aussi élus domiciles dans ce réservoir.

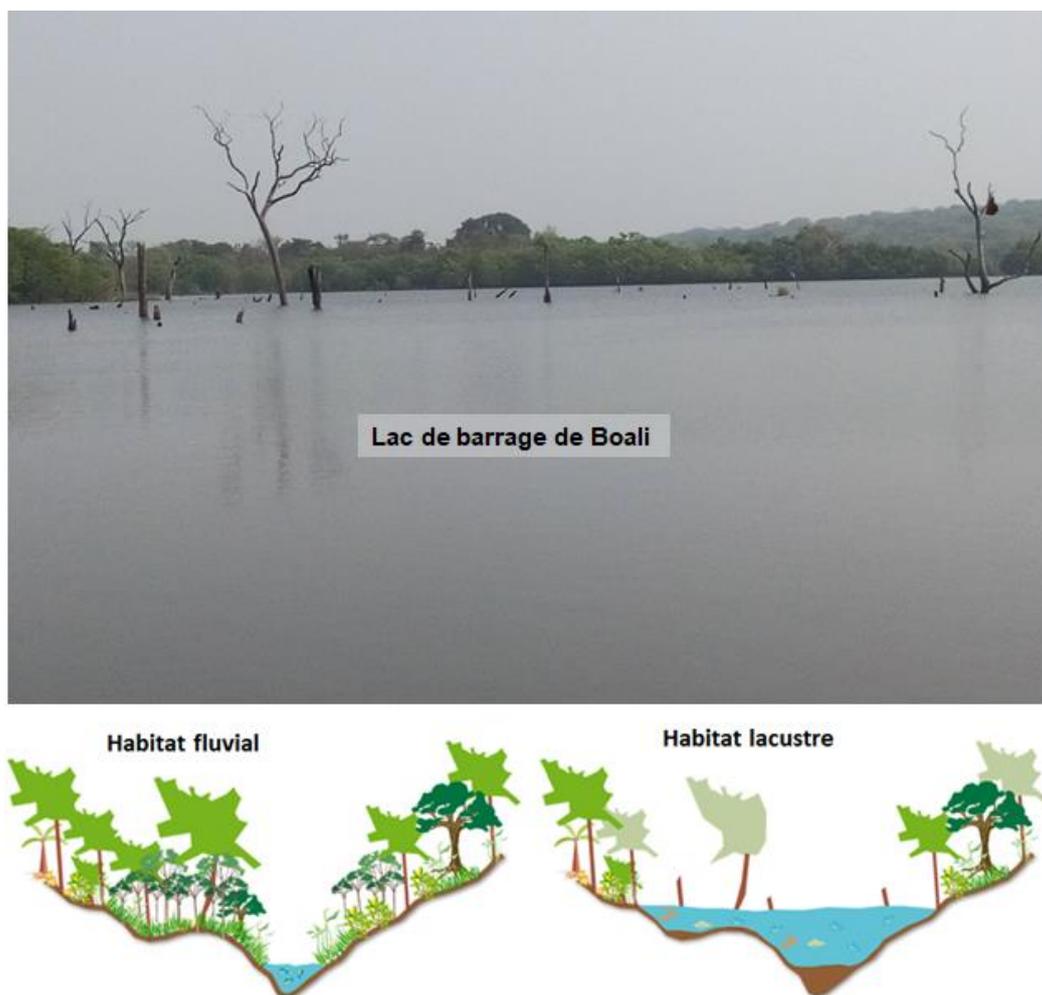


Fig. 61 – Schéma théorique du changement d’habitat aquatique
Fig. 61 – Theoretical diagram of aquatic habitat change

D'un point de vue trophique, le lac de barrage de Boali présente une qualité d'eau relativement satisfaisante (tab. 7). C'est peut-être à long terme que ce réservoir pourrait connaître des problèmes d'eutrophisation qui, selon Hade (2002), représente la phase avancée, quasi terminale, de l'évolution d'un lac. La présence actuelle des plantes aquatiques (macrophytes) dans certaines parties du lac pourrait contribuer à réguler la qualité de l'eau (fig. 61). Pour autant, ces plantes, selon leur nature, peuvent contribuer à accroître l'évapotranspiration du plan d'eau.

Tableau 7 – Paramètres physico-chimiques analysés pour évaluer la qualité trophique de l'eau
Table 7 – Physicochemical parameters analyzed to evaluate the trophic quality of water

PARAMETRES	METHODES	RESULTATS	UNITES
Ph	Potentiométrique	7.4	
Conductivité	Potentiométrique	24.7	μS/Cm
Nitrate	Spectrophotométrique	2.3	Mg/1NO ₃
Oxygène Dissout	Potentiométrique	7.54 Mg/L O ₂	Mg/L O ₂

Conclusion du deuxième chapitre

En conclusion sur ce deuxième chapitre, nous pouvons dire que le barrage de Boali a été aménagé entre 1989-1991 dans un contexte de baisse d'écoulement de la rivière Mbali qui influençait la production hydroélectrique des centrales de Boali 1 et 2. L'avènement du barrage a permis d'améliorer les conditions de vies sociales de la commune de Boali qui, jadis était totalement rural. Des mutations sociétales ont été enregistrées depuis la construction du barrage. La pêche qui était une activité presque inexistante, dévient la principale activité dans la commune à cause de la prolifération des ressources piscicoles dans le lac. Les peuhls qui ne savaient qu'élever leurs bétails se sont depuis remis en pêche et en agriculture, et pratiquent ces activités en parallèle avec l'élevage.

Toutefois, l'aménagement hydraulique de Boali s'est accompagné de quelques impacts négatifs sur l'environnement. Le premier impact concerne l'effet de la construction du barrage sur le paysage de Boali. L'établissement de l'ouvrage en travers et la mise en eau du lac ont nécessité d'importantes opérations de déboisement et d'excavation des terres

conduisant à modifier l'occupation du sol de la commune de Boali. La forêt dense a perdu près de 15% de sa surface au profit des autres unités d'occupations que sont les savanes, les sols nus et l'urbain. A cet effet, le versant de la Mbali devient vulnérable aux effets de météorisations et d'érosions chimiques.

Le deuxième impact concerne l'effet du barrage sur les flux liquides. La régulation du débit de la rivière Mbali a en effet entraîné des variations d'écoulement en aval du barrage. Nous avons observé une migration dans le calendrier hydrologique de la rivière Mbali. L'année hydrologique migre progressivement entre mai-avril au lieu d'avril-mars. Les pics de crues du mois d'octobre sont écrêtés alors que l'écoulement des saisons de basses eaux a été soutenu.

Le troisième impact concerne l'effet de rétention du réservoir sur les flux sédimentaires. D'un volume de 250 millions de mètre cube, le lac de barrage de Boali n'a jamais fait l'objet d'une vidange quelconque. Il constitue une sorte de bassin d'accumulation sédimentaire. Le taux d'accumulation est estimé à 0,8 cm/an. Les sédiments qui s'y accumulent correspondent à un mélange de matériaux exogènes et endogènes. En aval du barrage, la rivière Mbali ne coule que sa sur roche mère, elle présente alors un habitat moins diversifié pour l'accomplissement du cycle vital des espèces aquatiques. Cet effet de piégeage pourrait compromettre à long terme la production hydroélectrique de Boali. Des opérations d'entretien (curage) périodique s'avèrent nécessaires en vue d'optimiser la capacité de rétention d'eau du lac.

Un autre impact observé concerne la rupture de la continuité écologique de la rivière Mbali. Le barrage a cloisonné le tronçon fluvial de la Mbali à l'échelle de Boali. La présence du lac de barrage a modifié le peuplement aquatique du milieu. Des espèces comme le tilapia et le crocodile ont élu domicile dans ce nouvel habitat, et ont envahi le plan d'eau.

Conclusion Partielle

Les deux chapitres de cette partie étudient les impacts des barrages hydrauliques fonctionnels sur le bassin de l'Oubangui. Deux barrages hydrauliques fonctionnels ont été étudiés. Le premier est le demi-barrage de Mobaye sur la rivière Oubangui, et le deuxième est le barrage-réservoir de Boali sur la rivière Mbali. Les résultats obtenus après « études de cas » sur les deux barrages sont en revanche peu similaires. Le demi-barrage de Mobaye, grâce à son aménagement en demi-lit, ne constitue pas un obstacle majeur au continuum fluvial de l'Oubangui, contrairement au barrage de Boali qui cloisonne la rivière Mbali, et qui forme une rupture dans la continuité écologique. De par sa faible influence sur la dynamique fluviale, le demi-barrage pourrait être un exemple d'aménagement hydraulique durable en rivière. Dans le cadre du controversé projet de transfert d'eau interbassin, un aménagement hydraulique en demi-lit pourrait s'avérer nécessaire pour minimiser l'impact du projet sur la dynamique hydrologique de l'Oubangui et du fleuve Congo. Cependant, les promoteurs du projet PTEIB ont déjà planifié un barrage-réservoir sur l'Oubangui à Palambo. L'impact de cette mégastructure sur la dynamique fluviale de l'Oubangui est encore mal connu. Sur le plan hydro-écologique, ce barrage-réservoir n'aurait-il pas les mêmes effets en rivière que le barrage-réservoir de Boali ? Ne constituerait-t-il pas une rupture dans la continuité hydrosédimentaire et biologique de la rivière Oubangui ? Ne modifierait-il pas en aval le régime hydrologique de l'Oubangui ?

A travers une prospective environnementale, la partie suivante tentera d'apporter quelques éléments de réponses aux précédentes interrogations.

Partie 3

Prospective environnementale des barrages planifiés sur l'Oubangui

Chapitre 1 – Le projet de dérivation de l'Oubangui vers le lac Tchad

- A- Objectifs et justificatifs du projet PTEIB
- B- Les effets potentiels du projet PTEIB

Chapitre 2 – Etudes d'impacts prévisibles du barrage de Palambo sur l'Oubangui

- A- Essai de modélisation hydrologique des effets du barrage planifié à Palambo sur l'Oubangui
- B- Apports de « l'extrapolation hydrologique » à l'évaluation des effets prévisibles du barrage de Palambo

Chapitre 3 – Perspectives d'aménagements et de Gestions durables des barrages de l'Oubangui

- A- Perspectives de Recherches et de Gestions des Barrages de Mobaye et Boali
- B- Perspectives d'Aménagement et de Gestion du barrage planifié à Palambo

Introduction de la Partie 3

La troisième partie de ce travail étudie globalement l'impact des barrages planifiés sur le bassin de l'Oubangui, avec l'étude de cas du barrage planifié à Palambo dans le cadre du controversé projet de transfert d'eau interbassin.

Un aperçu du fameux projet de transfert d'eau de l'Oubangui vers le lac Tchad sera présenté dans le premier chapitre. Ensuite, un deuxième chapitre fera une prospective environnementale des effets potentiels dudit projet sur la dynamique hydrosédimentaire de l'Oubangui. Enfin, des perspectives d'aménagements et de gestions de l'ensemble des barrages étudiés seront proposées dans le troisième chapitre.

Chapitre 1 – Le projet de dérivation de l’Oubangui vers le lac Tchad

Le premier chapitre de cette partie présente de manière succincte le projet de dérivation de l’Oubangui vers le lac Tchad. On présentera dans un premier temps, les objectifs du projet, et dans un second temps, ses effets bénéfiques escomptés.



The screenshot shows the top of the Le Monde website. The main navigation bar includes 'ACTUALITÉS', 'ÉCONOMIE', 'VIDÉOS', 'OPINIONS', 'CULTURE', 'M LE MAG', and 'SERVICES'. The article title is 'Le projet de remplir le lac Tchad refait surface' under the 'PLANÈTE' category. The sub-headline reads: 'L'avenir de cet espace sahélien qui fait vivre près de 40 millions de personnes est devenu un enjeu politique.' The author is 'Par Laurence Caramel et Joan Tilouine' and it was published on '24 février 2018 à 09h33'.



The screenshot shows the UNESCO website for the 'Conférence internationale sur le lac Tchad'. The UNESCO logo and name are prominent, along with the motto: 'Construire la paix dans l'esprit des hommes et des femmes'. Navigation links include 'À PROPOS', 'THÈMES', 'PAYS', 'PARTENARIATS', and 'REJOINDRE'. The event details are: 'Conférence internationale sur le lac Tchad Du 26 au 28 février 2018 à Abuja au Nigeria'.

A- Objectifs et justificatifs du projet PTEIB

Le lac Tchad est un lac endoréique qui est partagé entre quatre pays (Niger, Tchad, Nigeria et Cameroun). Il nourrit des dizaines de millions d'individus dans une région semi-aride. Les récentes découvertes d'Abel et de *Toumaï* ont fait du bassin du lac Tchad le berceau de l'humanité [Brunet & al., 2002], même si cette découverte est remise en question aujourd'hui. La sécheresse hydrologique sans précédent enregistrée au 20^{ème} en Afrique subsaharienne a entraîné une forte concentration humaine sur le lac Tchad. Selon le recensement de 2013, le bassin conventionnel du lac Tchad compte près de 47 millions d'habitants dont 13 millions dépendent directement ou indirectement des ressources en eau du lac [Ngaresssem & al., 2014]. Sous l'effet de récentes sécheresses, de nombreuses populations d'agriculteurs, d'éleveurs ou de pêcheurs ont convergé vers les rives et les îles du lac : il apparaît aujourd'hui comme une grande oasis sahélienne, à l'instar du delta intérieur du Niger [Magrin, 2007]. Jadis, l'un des plus grands lacs planétaires, le lac Tchad a perdu une grande partie de sa surface en eau. Sur base d'images de la NASA (*fig. 62*), Coe et Foley (2001), ont publié un article dans le « *Journal of Geophysical Research* » pour démontrer qu'en moins de quarante (40) ans (1963-2001), la surface en eau du lac Tchad s'est asséchée de plus de 90%. Ces résultats alarmistes ont suscité d'énormes inquiétudes auprès des grands organismes internationaux (ex : FAO, FEM, UNESCO), et régionaux (CBLT), malgré plusieurs controverses.

L'ultime plan de sauvetage proposé par les pays membres de la CBLT consiste à un apport en eau du bassin du Congo via un système de dérivation vers le lac Tchad. Ce plan dénommé, PTEIB (Projet de Transfert d'Eau Inter Bassin) a été proposé en 2011 dans le but de transférer les eaux des rivières *Oubangui* et *Kotto* pour soutenir le lac Tchad. Lors de la dernière conférence de l'UNESCO sur le lac Tchad qui s'est tenue en février 2018 à Abuja au Nigeria, l'UA (Union Africaine) a approuvé le projet PTEIB comme étant un projet *panafricain* visant à restaurer le lac Tchad pour un développement, une sécurité et une paix durables dans la région. Mais ce projet n'est que la version revisitée du vieux projet « TRANSAQUA » dont l'idée avait germé durant les sécheresses des années 1970-1980 [Magrin, 2018]. TRANSAQUA visait à l'époque de capturer les eaux du haut-Congo à hauteur du lac Kivu pour transférer vers le lac Tchad. La version proposée par CIMA+ consiste à réaliser un *transfert combiné* « *pompasse-gravité* » sur le bassin de l'Oubangui depuis les sites de *Palambo* (18° 57' 4"E, 4° 42' 24" N) et *Bria* (22° 5' 9" E, 6° 39' 31" N) (*fig. 4*).

Les effets bénéfiques escomptés du projet concernent entre autres, la préservation de l'écosystème du lac Tchad, la production d'énergie hydroélectrique, la promotion de la sécurité en Afrique subsaharienne, et l'intégration économique régionale à travers le développement des infrastructures de transports routiers et fluviaux.

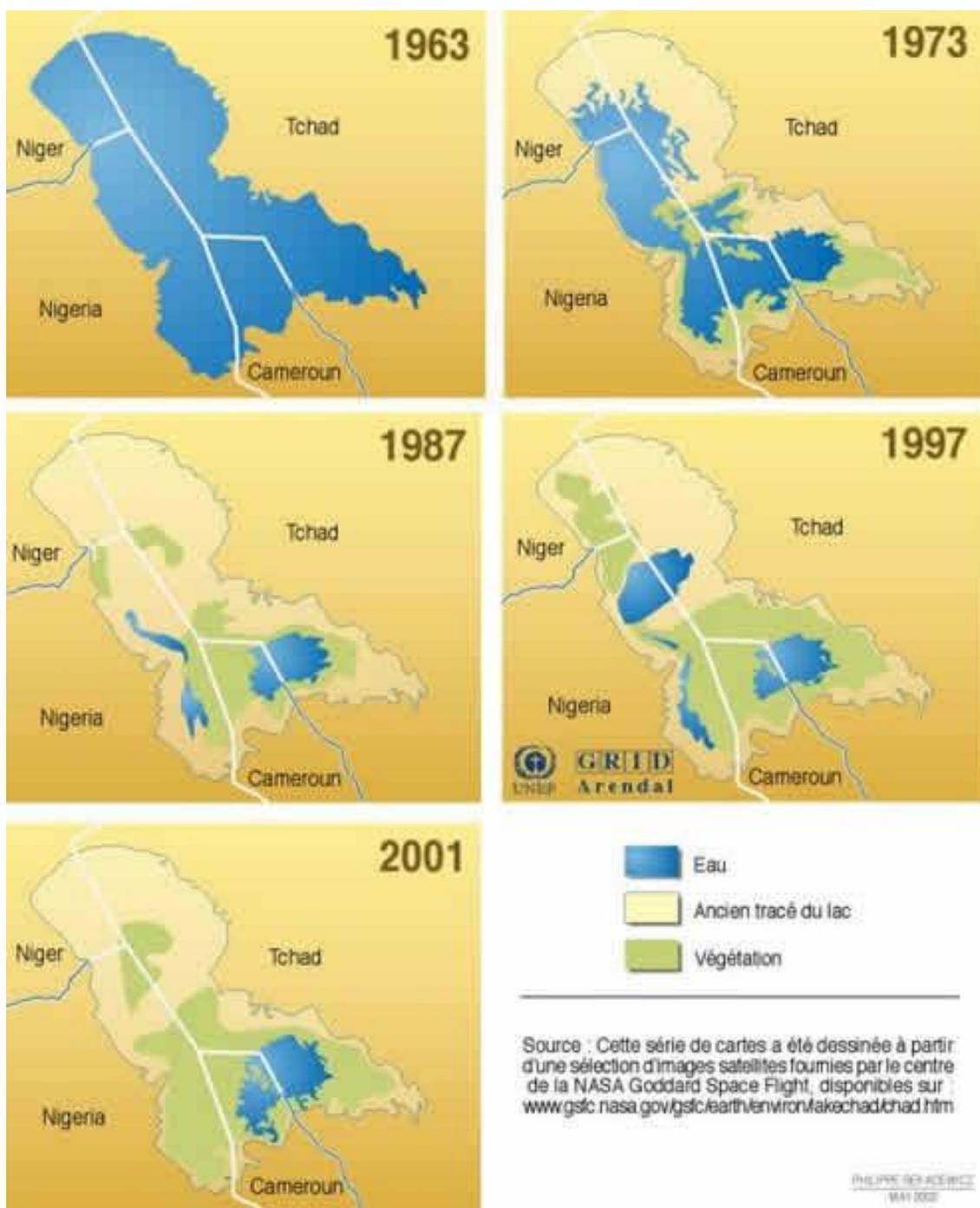


Fig. 62 – Evolution de la surface du lac Tchad. NASA 2002
Fig. 62 – Evolution of the surface of Lake Chad. NASA 2002

1- Historique du projet de transfert interbassin

L'idée de revitaliser l'écosystème du lac Tchad par des apports en eau du bassin du Congo ne date pas de 2011. Elle est apparue à la fin des années 1970 et fut avancée vers 1982 dans une publication publicitaire de la société *BONIFICA* intitulée : « *TRANSAQUA, une idée pour le Sahel* » (fig. 63).

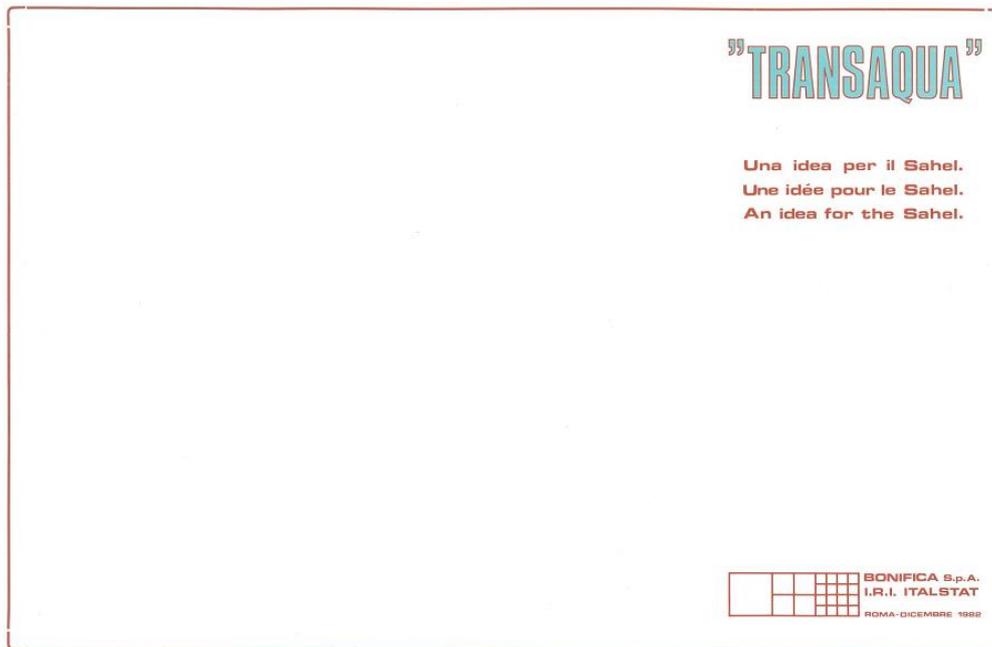


Fig. 63 – TRANSAQUA, unie idée pour le Sahel. Source BONIFICA (1982)
Fig. 63 – TRANSAQUA, an idea for the Sahel. Source BONIFICA (1982)

Marcello Vichi, ancien responsable du bureau d'étude *BONIFICA* proposait à l'époque de capturer des eaux du bassin du Congo, précisément dans la localité de *Bukavu (lac Kivu)*, où les précipitations moyennes annuelles atteignent 1 900 mm, pour les acheminer vers le lac Tchad (fig. 64). *TRANSAQUA* fut avancé en vue de remédier aux irrégularités climatiques observées au Sahel dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle qui se traduit par un déséquilibre hydrologique voire écologique. L'idée de base du projet *TRANSAQUA* est de transférer environ **100 km³** d'eau douce du haut-Congo vers la zone sahélienne. A l'image du projet du canal de *SUEZ*, le projet *TRANSAQUA* devait être considéré comme une grande « autoroute » fluviale contribuant à désenclaver une bonne partie des pays de l'Afrique Centrale. Cette intégration des transports internationaux pouvait être réalisée à la hauteur du croisement du canal avec la *transafricaine Lagos-Mombassa* prévue.

Les Etudes d'Impact Environnemental (EIE) de ce projet sur le bassin du Congo ont prévu une diminution d'écoulement des rivières impactées par le projet mais pas une modification de leurs régimes d'écoulements en aval, à cause de leur forte pluviosité répartie sur presque toute l'année. Enfin, les effets écologiques sur l'environnement peuvent être assimilés à ceux produits par la construction d'une grande artère de communication dans un territoire presque vierge. La première version de « *TRANSAQUA* » a été suivie par « *TRANSAQUA-Zaire* » en 1984, puis « *TRANSAQUA-Afrique Centrale* » en 1985.

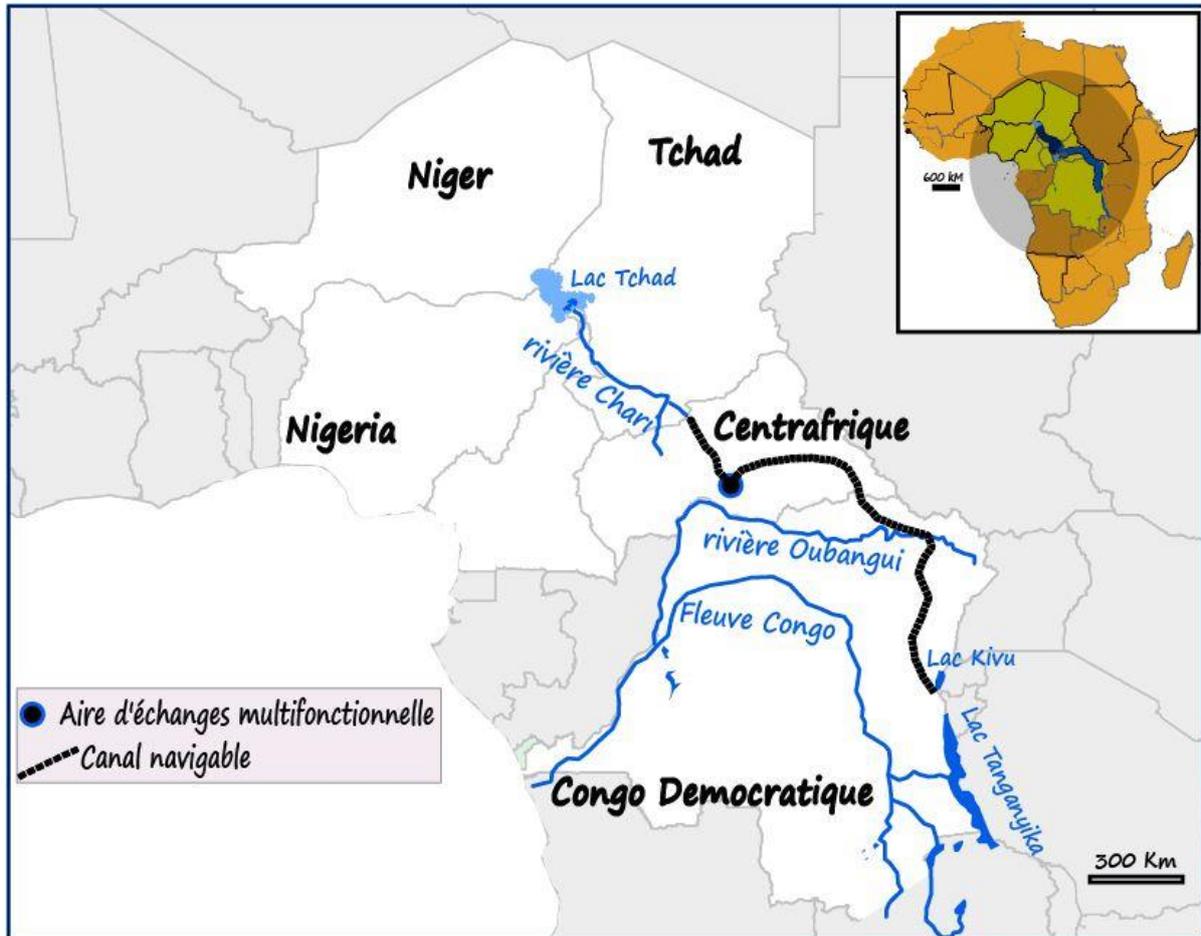


Fig. 64 – Projet « TRANSAQUA », une idée pour le Sahel. (Source BONIFICA ; adapté)
Fig. 64 – « TRANSAQUA » Project, an idea for the Sahel. (Source BONIFICA ; adapted)

La nouvelle version du projet a été récemment proposée en 2011 par le bureau d'étude *Canadien CIMA+* sous le patronage de la *CBLT*. Deux (2) scénarios de transfert ont été proposés à cet effet (*fig. 4*), le premier concerne le transfert d'eau par « *gravité* » depuis le site de *Bria* sur la rivière *Kotto* (affluent de l'Oubangui), et le deuxième scénario concerne le transfert par « *pompage* » depuis le site de *Palambo* sur la rivière Oubangui au Pk 1540. Ce

double transfert d'eau conduirait à rehausser le niveau du lac Tchad et à revitaliser son écosystème. Contrairement à la version TRANSQUA qui prévoyait de transférer **100 km³/an** d'eau vers le lac Tchad, la version PTEIB a prévu pour sa part de transférer seulement **3,5 km³/an**.

Considérons le scénario prévu à Palambo, le transfert de l'Oubangui se ferait par l'érection d'un barrage-réservoir dans lequel de l'eau serait stockée pour dériver vers le lac Tchad via les rivières *Tomé, Fafa, Ouham* et *Chari* (fig. 4). Le site de Palambo a déjà fait l'objet de plusieurs études de faisabilité techniques dont celles de *SOGREAH* (actuel *ARTELIA*) en 1990, qui soulignent ses potentialités hydrologiques et géotechniques en termes d'exploitation hydraulique.

La troisième version du projet n'est pas encore opérationnelle mais elle se rapproche de la première version par rapport au volume d'eau transféré. Elle a été proposée en 2016 par la firme Chinoise *Power China* dans le but de transférer 50 km³ d'eau depuis l'Oubangui ou le fleuve Congo vers le lac Tchad. Toujours sous la houlette de la CBLT, cette troisième version vise à contourner les controverses suscitées par la deuxième version. Le rapport des études de faisabilité de *Power China* sont attendus pour 2020. Mais dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés uniquement à la deuxième version proposée en 2011 dont les effets environnementaux sont encore mal connus.

2- La problématique de l'assèchement du lac Tchad

Pour des chercheurs comme Coe et Foley (2001), le lac a perdu plus de 90% de sa surface en eau (fig. 62). Les auteurs attribuent l'assèchement du lac à une cause hydroclimatique, notamment au déficit d'apport en eau de la rivière *Chari* lié à une baisse de pluviométrie. Ces résultats alarmistes ont suscité de nombreuses inquiétudes auprès des institutions internationales. De là, naissent diverses théories sur la probable « disparition » du lac Tchad dans un futur proche. De là également, ont eu lieu plusieurs conférences sur la *sauvegarde du lac Tchad*, dont la dernière date de 2016 à *Abuja* au *Nigeria*. La conférence *d'Abuja* a été pilotée par l'UNESCO dans le but est d'élaborer un programme d'action complet pour sauver le lac de son éventuelle disparition. Un transfert d'eau du bassin du Congo vers le Sahel semble être la solution phare pour lutter contre l'assèchement du lac Tchad.

Déjà au début du 20^{ème} siècle, la crainte de voir disparaître le lac Tchad et les ressources potentielles qui y sont associées a fait l'objet de publications scientifiques [Magrin, 2015] et de conférences internationales. À propos, plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'assèchement du lac Tchad, dont la principale réside dans la détérioration du climat sahélien [Sebag & al., 2006]. Les travaux menés dans le cadre des missions paléontologiques sur le bassin du lac Tchad ont mis en évidence la présence récurrente de phases humides et sèches « désert-lac » au cours du Miocène et du Pliocène [Brunet & al., 1995 ; Kiari, 2014]. Au cours du dernier millénaire, les données historiques et les analyses sédimentaires indiquent une succession de hauts et bas niveaux du lac (*fig. 65*) avec quatre ou cinq périodes de très bas niveaux entre les années 900 et 1900 [Maley, 1993 ; Kiari, 2014]. Selon Touchart (2002), ces variations sont classiquement celles d'un lac endoréique, qui n'a pas d'émissaire pour réguler les sorties d'eau et qui varie donc en fonction des apports.

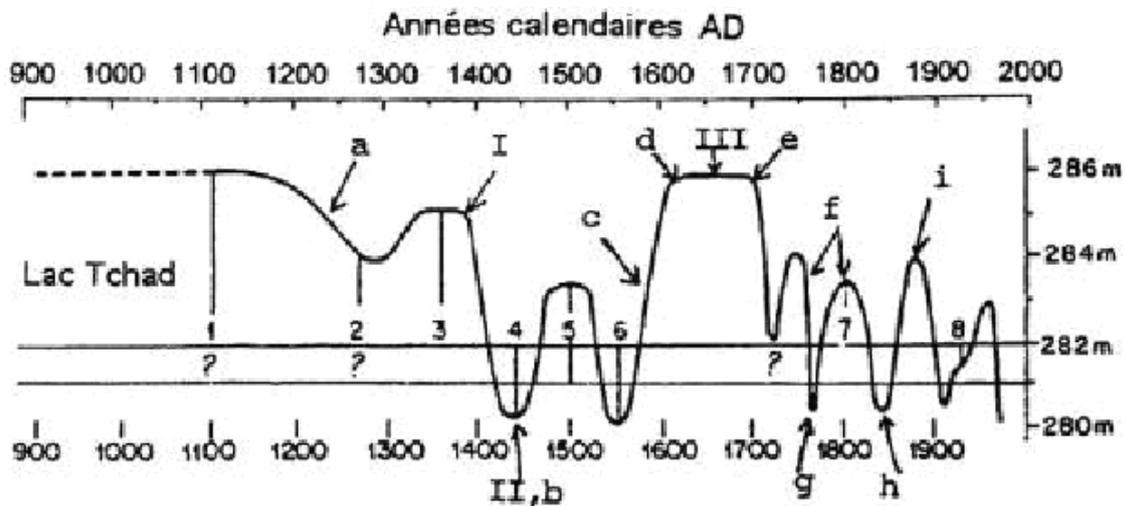


Fig. 65 – Variations historiques du niveau du lac Tchad au cours du dernier millénaire. Source: Maley (1993)

Fig. 65 – Historical changes in the level of Lake Chad during the last millennium. Source: Maley (1993)

Ainsi que Maley (1993), Lemoalle & Magrin (2014), ont montré que l'évolution du Lac Tchad s'est toujours faite de quatre manières : le Grand Tchad, le Moyen Tchad, le Petit Tchad et le Petit Tchad sec (*tab. 8*).

Le Grand Tchad est caractérisé par une grande surface d'eau libre, qui s'étend sur 24 000 km², bordée d'un archipel dunaire peu développé ; il n'est apparu que pendant de brefs

épisodes au cours du 20^{ème} siècle, et pour la dernière fois lors des années humides du milieu des années 1950.

Le Moyen Tchad présente pendant toute l'année un seul plan d'eau, qui couvre entre 15 000 et 19 000 km² à une altitude de 280 à 282 mètres, avec deux grandes cuvettes, sud et nord, séparées par un étranglement et les hauts fonds de la Grande Barrière qui restent submergés.

Le Petit Tchad est dans son ensemble plus un marécage qu'un lac au sens classique du terme. Il est constitué de plusieurs plans d'eau séparés pendant au moins une partie de l'année par des hauts fonds. Dans la cuvette sud, une surface en eau libre d'environ 1 700 km² est située devant le delta du Chari, avec un niveau d'eau compris entre 279 et 281 m d'altitude. La cuvette nord est séparée de la cuvette sud par l'exondation plus ou moins permanente de la Grande Barrière, qui contrôle l'hydrologie de cette partie du lac.

Le Petit (lac) Tchad sec est un nouvel état qui a été défini récemment pour désigner un Petit Tchad sans alimentation de la cuvette nord par la cuvette sud, qui reste donc sèche toute l'année.

Tab. 8 – Les caractéristiques des différents états du Lac Tchad [Lemoalle & Magrin, 2014].

Tab. 8 – Characteristics of the different states of Lake Chad [Lemoalle & Magrin, 2014].

Lac Tchad	Petit sec	Petit	Moyen	Grand
Apports du Chari (km ³ /an)	<15	15-34	35-43	>43
Niveau de l'eau (m)	cuvette nord sèche	différents niveaux	280-282	>282.3
Nombre de plans d'eau	plusieurs	plusieurs	un seul	un seul
Surface totale du lac (km ²)	2 000-6 000	2 000-14 000	15 000-19 000	20 000-25 000
Surface inondée de la cuvette nord (km ²)	0	0-8 000	9 000	10 000
Paysage dominant	marécages et savane	marécages	archipel dunaire	eaux libres
Végétation aquatique	++	+++	++	+

Qu'en est-il de la situation actuelle du lac Tchad ?

Ne voulant pas établir une monographie sur le lac Tchad, nous pouvons ajouter qu'actuellement, le lac Tchad est formé de deux cuvettes, sud et nord, séparées par une zone

de hauts fonds, la grande barrière [Lemoalle & Magrin, 2014]. La cuvette sud est alimentée directement par le Chari, principal tributaire du lac (fig. 66); la cuvette nord profite des débordements d'eau de la cuvette sud pour être alimentée.

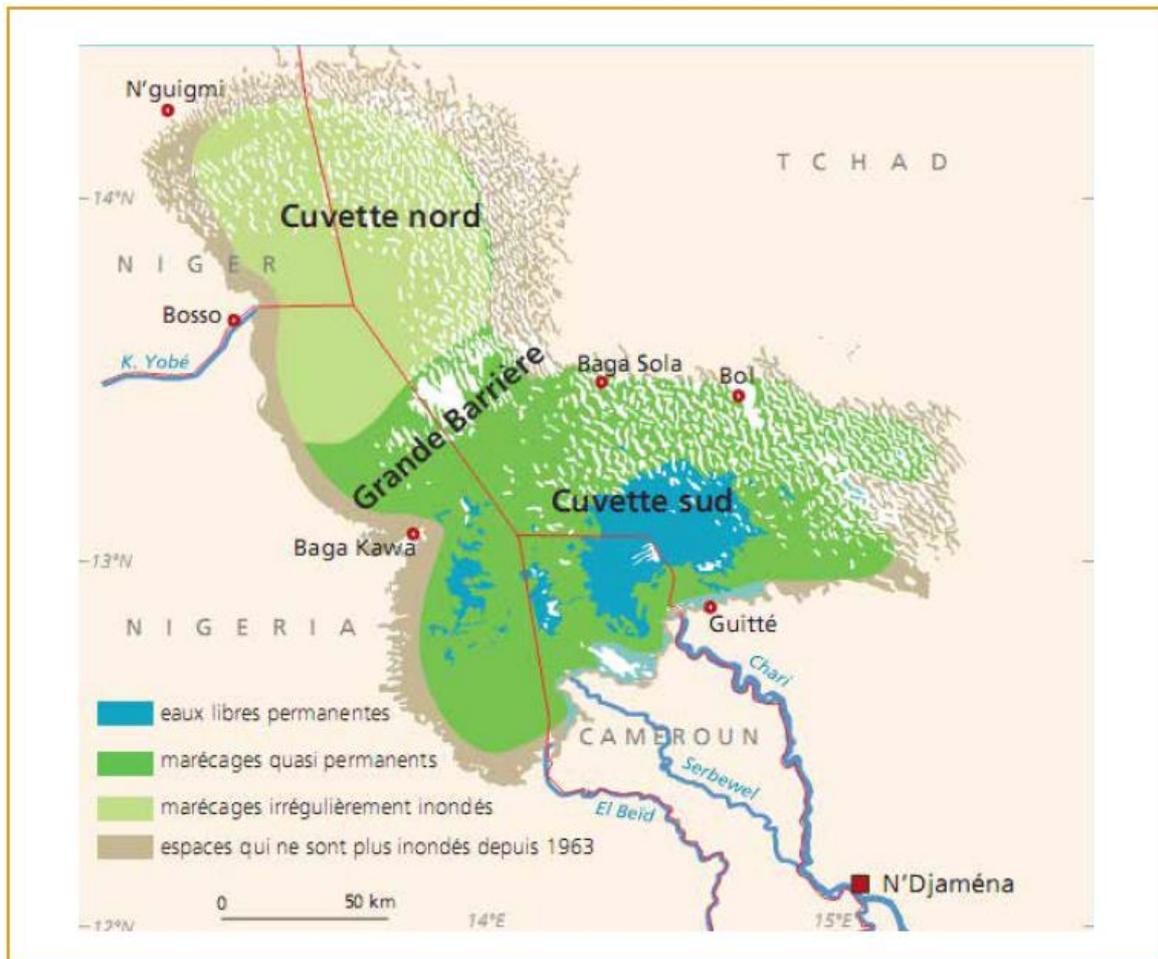


Fig. 66 – Situation du lac Tchad autour de 2010. [Lemoalle & Magrin, 2014]
Fig. 66 – Situation of Lake Chad around 2010. [Lemoalle & Magrin, 2014]

Sur le plan économique, l'agriculture est l'activité prédominante dans le bassin du lac Tchad, ensuite viennent l'élevage et la pêche (*annexe 5*). Elle est pratiquée par plus de la moitié de la population qui y réside. La superficie des terres cultivées du bassin est estimée à près de 2 800 000 hectares [Mbodou, 2006]. Ainsi, trois types d'agriculture sont pratiqués dans la région : *l'agriculture pluviale, l'agriculture de décrue et l'agriculture par irrigation*. Sur le plan environnemental, la situation actuelle du lac Tchad a eu des effets marqués sur la biodiversité locale à cause de la perte d'habitats. Les principaux changements observés concernent la biodiversité en poissons et les communautés végétales. Des changements considérables se sont opérés dans la faune aquatique (CBLT, 2015).

Sous l'effet des sécheresses récentes sur le lac Tchad, de nombreuses populations d'agriculteurs, d'éleveurs ou de pêcheurs ont convergé vers ses rives et ses îles : il apparaît aujourd'hui comme une grande oasis sahélienne, à l'instar du delta intérieur du Niger [Magrin, 2007]. De nombreux « réfugiés climatiques » chassés par la sécheresse sahélienne ont trouvé refuge sur ses rives, où la construction de routes vers les principales villes régionales a ouvert des possibilités commerciales intéressantes [Reounodji & al., 2014].

Quelques controverses autour de l'assèchement du lac Tchad

Ce projet de transfert a été soutenu par plusieurs institutions internationales dont l'UNESCO. Le projet a de même reçu un soutien discret de la NASA. Pour les chercheurs de la NASA, dont Ichoku & al. (2018), le transfert d'eau de l'Oubangui vers le lac Tchad aurait peut-être des conséquences environnementales, mais cela constituerait un plan d'action stratégique pour lutter contre la possible avancée du désert vers le bassin du Congo, dans un contexte où le lac Tchad est une « zone tampon » entre le désert du Sahara au nord et la forêt humide du Congo au sud.

Par ailleurs, la thèse de l'assèchement du lac Tchad a été controversée par d'autres chercheurs qui démontrent que la surface en eau du lac a connu une nette hausse depuis la décennie 1990. Lemoalle & Magrin (2014) ont ainsi souligné que la surface en eau du lac Tchad a effectivement diminué entre 1970-1995, mais celle-ci a connu une augmentation partielle depuis 1995 (fig. 67).



Fig. 67 – Evolution de la surface en eau du lac Tchad entre 1970-2015. Source: Lemoalle & Magrin (2014).

Fig. 67 – Evolution of the water surface of Lake Chad between 1970-2015. Source : Lemoalle & Magrin (2014).

Si le lac Tchad est résilient aux épisodes secs des années 1970-1980, ce n'est plus le cas de la rivière Oubangui. On l'a vu, l'Oubangui est la rivière la plus affectée par les effets des sécheresses hydrologiques de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, et cela se manifeste par un déficit d'écoulement de 30% depuis 1970. Alain Laraque, chercheur à l'IRD, a rappelé à Washington⁴ (USA) en 2018 que « *si l'hydrologie de l'Oubangui reste déficitaire depuis 1970 alors que la surface en eau du lac Tchad est relativement stable depuis 1995, dans ce cas il faut inverser la tendance du transfert d'eau [...] Au lieu de transférer l'Oubangui vers le lac Tchad, on doit transférer le lac Tchad vers l'Oubangui* ». Ces différentes passes d'armes font de l'Oubangui le centre des enjeux géopolitiques de l'eau en Afrique subsaharienne.

Toujours à Washington, Kiari & Lemoalle (2018) ont avancé une nouvelle proposition qui n'a jamais été proposé dans le cadre de la lutte contre l'assèchement apparent du lac Tchad. Cette proposition consiste à faire un transfert interne dans le lac Tchad. Il s'agit d'ajuster un transfert d'eau de la cuvette sud vers la cuvette nord du lac Tchad en franchissant la barrière qui sépare les deux cuvettes (*fig. 66*). La cuvette sud est en effet la cuvette la mieux alimentée par les eaux du *Chari* provenant de Centrafrique, contrairement à la cuvette nord qui est alimentée par les débits faibles de la rivière *Komadougou Yobe*, et dans certaines mesures par les eaux de débordements de la cuvette sud (*fig. 66*). Les auteurs ont avancé cette proposition suite à une crue exceptionnelle du Chari qui a entraîné l'extension de la surface en eau du lac Tchad en 2012.

⁴ À Washington D.C. aux États-Unis, une conférence sur « les recherches hydrologiques du bassin du Congo » s'est tenue du 25 au 27 septembre. La conférence a été organisée à l'AGU avec les sponsorings de NSF, la NASA, l'Université d'État de l'Ohio, Hybam, GET Toulouse, le CRuHM et HSM Montpellier. En savoir plus : <https://chapman.agu.org/congo-hydrologic-research/> <https://congoriverbasin.wordpress.com/>

B- Les effets potentiels du projet PTEIB

1- Les effets bénéfiques escomptés

Afin de gérer durablement les ressources en eau et de répondre graduellement à la pénurie d'eau sur le lac Tchad, les pays membre de la CBLT ont proposé comme meilleure solution de procéder à un transfert interbassin. Les pays membres de la CBLT ont réaffirmé en 2018 leur volonté de concrétiser le projet PTEIB lors de la conférence de l'UNESCO d'Abuja (Nigeria) à laquelle étaient présents, les chefs d'Etats membres de la CICOS (Commission Internationale du Bassin du Congo-Oubangui-Sangha). L'UA (Union Africaine) a approuvé le projet PTEIB comme étant un projet *panafricain* visant à restaurer le lac Tchad pour un développement, une sécurité et une paix durables dans la région. D'une envergure régionale ou continentale, le projet permettrait d'ouvrir une plateforme d'échanges entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale. Il permettrait également de développer l'irrigation et l'élevage dans le Sahel.

Les effets bénéfiques à l'échelle du bassin du Congo

Selon ses promoteurs, le projet offre deux (2) grandes opportunités économiques à l'échelle du bassin du Congo : premièrement, il permettrait de produire de l'énergie hydroélectrique dans ce territoire le moins électrifié du globe, et deuxièmement, le projet permettrait de réguler la navigabilité sur l'axe fluvial Oubangui-Congo.

Dans son étude de faisabilités techniques, *Cima +* propose donc de produire de l'énergie hydro-électrique depuis les barrages de Palambo et de Bria. Une bonne part de l'énergie produite sera utilisée pour acheminer l'eau (pompage) vers le lac Tchad en franchissant la « dorsale Centrafricaine ». Le reste d'énergie sera vendue aux sociétés *ENERCA* (*Energie Centrafricaine*) et *SNEL* (*Société Nationale Congolaise d'électricité*) pour soutenir les besoins électriques du Centrafrique et du Congo-Démocratique. A Palambo par exemple, *CIMA+* envisage de produire annuellement, en moyenne 290 MW, dont 80% serviraient au pompage, et 20% pour l'approvisionnement de la ville de *Bangui* et ses environs. En effet, Bangui la capitale Centrafricaine souffre depuis des décennies d'un « syndrome » énergétique qui paralyse toutes les activités urbaines. D'après le rapport de l'ENERCA (2015), la demande en énergie de la ville de Bangui aux heures pointes s'élève en effet à plus de 50 MW, tandis que la fourniture totale actuelle des toutes les centrales n'atteint que 40,65 MW. Des coupures intempestives se font régulièrement afin de réguler la consommation

d'énergie sur l'ensemble de la ville. La production d'hydroélectrique à Palambo dans le cadre du projet PTEIB permettrait de satisfaire les demandes énergétiques de la ville de Bangui et d'accélérer la croissance urbaine. A Bria, l'énergie produite pourrait aussi favoriser l'implantation des sociétés d'exploitations minières.

Il est force de constater que le projet PTEIB ne fait pas l'unanimité auprès des centrafricains malgré les avantages escomptés en terme d'approvisionnement en électricité. Ce constat est tiré d'un sondage réalisé auprès d'une quarantaine de Centrafricains. Les sondés sont repartis entre les administrateurs, les sociétaires, les gestionnaires et les riverains (pêcheurs, commerçants de sables ...). Il se révèle que près de 95% des sondés s'opposent à l'idée de la construction du barrage sur l'Oubangui à Palambo dans le cadre du projet de transfert d'eau interbassin. Cette opposition pourrait s'expliquer principalement par le rôle ambigu de la République du Tchad dans les récents conflits en République Centrafricaine. Si géographiquement le lac Tchad se trouve à cheval entre quatre (4) pays à savoir, le Nigéria, le Niger, le Tchad et le Cameroun. Cela est loin d'être ce que les Centrafricains majoritairement de l'emplacement de cet immense plan d'eau. La plupart des Centrafricains pensent en effet que le lac Tchad, comme son nom l'indique, se trouve totalement en République du Tchad. Et donc l'idée de transférer une partie de leur rivière pour alimenter leurs voisins Tchadiens n'est qu'une totale absurdité. De surcroît, certains riverains de l'Oubangui redoutent de ne pas retrouver leurs moyens de subsistances après la mise en eau du lac de barrage régulateur. Ils craignent une éventuelle disparition de leurs pratiques ancestrales comme l'a été le cas de l'avènement du barrage de Mobaye qui a suscité le mécontentement des esprits de l'eau sur les riverains.

S'agissant de la régulation de la navigation sur l'axe fluvial Oubangui-Congo, l'érection du barrage-réservoir à Palambo permettrait de soutenir les débits minimums de l'Oubangui qui limitent les possibilités de navigation en période de basses eaux sur le bief Bangui-Brazzaville. Depuis 1970, la navigation sur l'Oubangui se fait de manière saisonnière à cause du déficit d'écoulement et de l'ensablement du chenal. Les hautes eaux correspondent évidemment à la saison navigable. L'axe fluvial Oubangui-Congo demeure la principale artère d'échanges commerciaux pour le désenclavement de la Centrafrique via les deux Congo. Mais, en raison des forçages hydroclimatiques observés dès la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le transport fluvial sur l'Oubangui-Congo a été très fragilisé, ce qui représente une grosse perte économique pour la Centrafrique et les deux Congo. De ce fait, *CIMA+* a

prévu un marnage important (15 m) du réservoir de Palambo afin de réguler le débit dans le but d'optimiser le transport fluvial sur l'Oubangui et le Congo.

Un autre effet bénéfique escompté de ce projet de dérivation est de limiter la « saharisation » ou du moins la « sahélisation » du bassin du Congo. Comme l'ont souligné les chercheurs de la NASA, l'apport d'eau de l'Oubangui vers le lac Tchad permettrait de freiner l'avancée de l'onde du sahel vers le bassin du Congo.

2- Les controverses autour du projet

Les enjeux environnementaux du projet de dérivation de l'Oubangui

Le rapport d'étude de faisabilité de CIMA+ en 2011 laisse entrevoir quelques enjeux environnementaux du projet PTEIB sur le bassin du Congo (bassin donateur) et celui du lac Tchad (bassin récepteur). CIMA+ rapporte en effet que, ce projet est techniquement faisable mais sa réalisation nécessite d'énormes coûts financiers et quelques enjeux environnementaux. Le cabinet a synthétisé ces enjeux en trois groupes :

1) Les enjeux liés au milieu physique

- ✓ *Altération du régime hydrologique et de la qualité de l'eau des principaux cours d'eau impliqués dans le projet dont l'Oubangui et le Chari.*
- ✓ *Risque d'Eutrophisation et d'altération des habitats aquatiques des poissons*
- ✓ *Risque de rupture du barrage de Mobaye car le barrage de Palambo formera une retenue qui s'étendrait en amont sur 200 Km et pourrait atteindre le pied du barrage de Mobaye.*

2) Les enjeux liés au milieu biologique

- ✓ *Altération de l'écosystème aquatique de l'Oubangui à cause du changement des faciès d'écoulement.*
- ✓ *Risque d'invasion des espèces envahissantes telles que le *Typha australis* et la jacinthe d'eau dans la rivière Chari et dans le lac de barrage de Palambo.*

3) Les enjeux liés au milieu humain

- ✓ *Délocalisation de plusieurs communautés villageoises environnantes avec une possibilité de relocalisation.*
- ✓ *Reconversion des communautés riveraines en éleveur, commerçant et surtout en pêcheur.*

Quelques controverses sur les enjeux environnementaux dudit projet

Soutenu par la CBLT, le projet PTEIB est sujet à de nombreuses controverses. Suite à la publication du rapport d'étude de faisabilité réalisée par *CIMA+*, les institutions internationales, les ONG et les pouvoirs publics ont montré leur scepticisme à propos de la réalisation dudit projet. Les critiques formulées sont d'ordre socio-environnemental. Dans quelle mesure ce projet permettrait de rehausser le niveau en eau du lac Tchad ? Quels sont les enjeux écologiques du projet sur le bassin de l'Oubangui et celui du lac Tchad ? Ce projet est-il toujours d'actualité, dans la mesure où l'Oubangui est aussi entré dans une phase sèche ? Un tel projet ne suscitera-t-il pas des tensions régionales ? Quels seront les conflits d'usage dans la gestion des eaux du barrage de Palambo et de Bria ? Qu'en est-il de la perception du projet par les riverains du lac Tchad, et par ceux de l'Oubangui ?

En 2013, l'Union Européenne, par la voie de son Commissaire au développement *M. Andris Piebalgs* s'est appuyée sur la conclusion des études de faisabilité pour rejeter le Projet en estimant que celui-ci comporte de sérieux risques environnementaux majeurs.

Pour le WWF (*World Wide Fund for Nature*), ce projet constitue une menace pour les *oiseaux migrants*, car plus de 2,6 millions d'hectares des zones humides du lac Tchad sont classées « *aires protégées* » depuis 2001.

Selon *José Endundo*, l'ancien ministre Congolais de l'environnement en 2014 : « *sans garantie, ce projet est à recalculer...Il n'existe pas à ce jour, d'études convaincantes et globales plaidant pour la réalisation sans risques de ce projet* ».

Les controverses reçues ont suscité la réticence des bailleurs à financer le projet. En décembre 2016, la CBLT a mandaté pour quatre ans la firme Chinoise ***Power China International Group Limited*** pour mener de nouvelles études en vue d'approfondir la faisabilité du projet. Les conclusions de leurs travaux n'ont pas encore été publiées à ce jour. *Power China* propose donc de transférer 50 km³/an des eaux bassin du Congo vers le lac Tchad, soit la moitié du volume proposé par le précédent projet (TRANSAQUA). Cette nouvelle version du projet vise à renforcer la résilience du Sahel au changement climatique et à ouvrir de nouvelles opportunités d'échanges et de développement entre l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale via les infrastructures d'envergure continentale. « *Le projet de transfert d'eau interbassin n'est pas une option mais une nécessité* », telle est l'une des conclusions de

la conférence d'Abuja (Nigeria) de février 2018. Ainsi, les chefs d'Etats présents se sont engagés à mobiliser les fonds nécessaires au financement dudit projet.

Conclusion du premier chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté les objectifs principaux du projet PTEIB ainsi que ses effets bénéfiques escomptés. Le projet de transfert d'eau interbassin est un vieux projet initié dès le début des années 1970 et qui a refait surface dans la décennie 2010. C'est sous la houlette de la CBLT que le cabinet Canadien a proposé en 2011 la version du projet qui consiste à alimenter le lac Tchad à travers les eaux du bassin de l'Oubangui. Ainsi, deux barrages ont été proposés à cet effet, un sur la Kotto à Bria et un autre sur l'Oubangui à Palambo. Ce transfert d'eau vise à inverser ou à stopper l'assèchement du lac Tchad qui avait suscité de nombreuses inquiétudes auprès des institutions internationales. Les effets bénéfiques escomptés du projet sont nombreux dont les principaux sont : révitalisation de l'écosystème du lac Tchad, désenclavement de l'Afrique Centrale par une série de réseau navigable, développement de l'irrigation et de l'élevage dans le Sahel, production d'énergie hydroélectrique et régulation de la navigabilité sur l'Oubangui. CIMA+ a conclu positivement sur la faisabilité technique du projet, et souligne toutefois qu'il existe des dommages environnementaux liés à ce mega-projet. Des altérations seraient enregistrées sur le milieu physique, biologique et sur la société humaine, a précisé le cabinet Canadien. CIMA+ rapporte aussi que la réalisation dudit projet nécessite d'énormes coûts financiers. Le budget des opérations est estimé à 14 milliards de Dollars pour un transfert combiné de l'Oubangui-Kotto. L'analyse des Avantages/Coûts du projet a démontré que les bénéfices escomptés seront nettement inférieurs au coût d'aménagement.

Une étude de faisabilité complémentaire est en cours en vue d'approfondir les études réalisées par CIMA+. D'une durée de quatre ans, l'étude a commencé depuis 2016, elle est réalisée par la firme POWER CHINA International Group Limited sous la houlette de la CBLT. Le projet PTEIB a toujours suscité de nombreuses controverses auprès des institutions internationales. Cela contribue à freiner sa réalisation. Les bailleurs de fonds sont de plus en plus réticents au financement dudit projet. Lors de la dernière conférence de l'UNESCO sur le lac Tchad au Nigeria, les Chefs d'Etats membres de la CBLT et de la CICOS qui étaient présents, ont cependant réitéré leur volonté de sauver le lac Tchad et de mobiliser le fond nécessaire au financement du projet.

Les effets bénéfiques escomptés du projet de transfert interbassin sont bien connus et ont été largement développés au cours de ce chapitre, en revanche, les effets environnementaux potentiels dudit projet sur le bassin de l'Oubangui sont jusque là mal connus. Le prochain chapitre s'intéresse à étudier les effets prévisibles du transfert d'eau sur la dynamique hydrologique de l'Oubangui. De ces deux (2) barrages planifiés, on s'intéresse principalement au barrage de Palambo sur l'Oubangui. Deux raisons ont motivé ce choix : premièrement, le site de Palambo se trouve sur le linéaire direct de la rivière Oubangui, son aménagement pourrait avoir des effets plus ou moins significatifs sur le régime hydrologique de l'Oubangui par rapport au site de Bria qui se trouve sur un affluent de l'Oubangui. Deuxièmement, le site de Bria est un site très instable politico-socialement contrairement au site de Palambo qui se trouve à seulement 60 km en amont de la capitale Bangui.

Chapitre 2 – Etudes d’impacts prévisibles du barrage-réservoir de Palambo sur l’Oubangui

Le deuxième chapitre de cette partie étudie les effets hydrologiques prévisibles du projet de transfert interbassin sur le bassin du Congo, notamment sur l’Oubangui. Le projet prévoyait un transfert combiné depuis les sites de Palambo et Bria. A Palambo, un barrage serait construit sur l’Oubangui pour transférer de l’eau par « pompage » vers le Chari. A Bria, le projet prévoit un transfert par gravité sur la rivière Kotto vers le Chari. Dans notre étude de cas, on privilégie le transfert d’eau par pompage sur l’Oubangui depuis Palambo. Ce choix stratégique s’explique premièrement par la difficulté d’accès au site de Bria à cause des crises civiles Centrafricaines datant de 2013 ; et deuxièmement, par l’importance du site de Palambo, situé à 60 Km en amont de la ville de Bangui, capitale de Centrafrique. À Palambo, l’Oubangui est contigu entre le Centrafrique et le Congo-Démocratique. Cet aménagement pourrait devenir un cas révélateur de grands aménagements hydrauliques sur un cours d’eau transfrontalier.

La « modélisation hydrologique » a d’abord été appliquée afin de simuler les effets prévisibles du barrage planifié à Palambo sur l’écoulement de l’Oubangui. L’outil « SWAT » a servi de « modèle hydrologique » à cet effet. Ensuite, nous avons appliqué « l’extrapolation hydrologique » en vue de transposer les effets hydrologiques du barrage de Boali sur le barrage planifié à Palambo.

A- Essai de modélisation hydrologique des effets du barrage planifié à Palambo sur l'Oubangui

La méthode de modélisation hydrologique permet généralement de simuler le comportement d'un hydrosystème dans un contexte modifié [Hingray & al., 2009]. La simulation en hydrologie nécessite donc l'utilisation d'un « *modèle* » hydrologique. Un modèle est avant tout un outil numérique servant à représenter de manière simplifiée un processus dont le but est de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir [...] Il facilite la compréhension de phénomènes souvent complexes pour prévoir et proposer des mesures pour pallier aux effets indésirables [Renaud, 2004]. Notre choix du modèle s'est donc porté sur le modèle **SWAT** (Soil and Water Assessment Tool), qui est un outil d'évaluation d'un bassin versant fluvial développé par des chercheurs du Département de l'*USDA* (Département de l'Agriculture des Etats-Unis) [Arnold & al. 1998]. SWAT a été développé dans le but « *de déterminer l'impact des techniques de gestion sur le bilan en eau, sédiments, pesticides, nutriments d'un bassin versant pour différents types de sols et utilisations des terres* » [Formal, 2009 ; Lang, & al., 2011]. Dans notre cas, nous appliquons le modèle SWAT dans le but de simuler « *l'impact prévisible du barrage planifié de Palambo sur le régime hydrologique de l'Oubangui* ». Le scénario principal concerne le scénario des effets du changement d'occupation du sol sur l'écoulement de l'Oubangui.

1- Modélisation hydrologique avec l'outil SWAT

L'outil SWAT utilisé pour cette modélisation est reconnu comme un modèle efficace pour évaluer l'effet des changements d'occupation des sols sur le débit. En outre, SWAT est un modèle hydrologique facile à mettre en place et peu gourmand en données. *Sa grande robustesse et son efficacité en font un modèle largement utilisé dans le domaine de la modélisation de bassins versant, notamment par différentes agences fédérales américaines ou de la Commission Européenne* [Gassman & al., 2007 ; Lang, & al., 2011]. SWAT modélise en deux niveaux un bassin versant en tenant compte des hétérogénéités spatiales : un niveau de *SUB (Sous-Bassin)* et un autre niveau de *HRU (Unités de Réponses Hydrologiques)*. Les HRU sont des unités homogènes en termes d'occupation du sol et de la couverture pédologique. A l'échelle du bassin contrôlé par le barrage de Palambo (490 274 km²), SWAT a spatialisé **123 Sous-Bassins** et **833 HRU**. SWAT modélise aussi en deux phases le bilan hydrologique, une *première phase terrestre* pour le calcul du bilan hydrologique (*fig. 68*), et une *deuxième phase*

de routage, où s'effectue le transfert de tous éléments depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin. Sur les trois équations proposées par SWAT pour estimer l'ETP (Evapotranspiration potentielle), nous avons opté pour l'équation de Pennman-Monteith qui calcule l'ETP à partir des données de température fournies. C'est lors de la phase terrestre que SWAT modélise le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration et les apports en sédiments et en éléments nutritifs vers le réseau hydrographique (chenal principal) à travers l'équation suivante :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Avec : SW_t : la teneur finale en eau du sol (mm) ; SW_0 : la teneur initiale en eau du sol au jour i (mm) ; t : le pas de temps (jours) ; R_{day} : Précipitations au jour i (mm) ; Q_{surf} : Quantité de ruissellement au jour i (mm) ; E_a : Quantité d'évapotranspiration au jour i (mm) ; W_{seep} : Quantité d'eau entrant dans la zone vadose au jour i (mm) ; Q_{gw} : Quantité d'eau perdue (allant à l'aquifère) (mm).

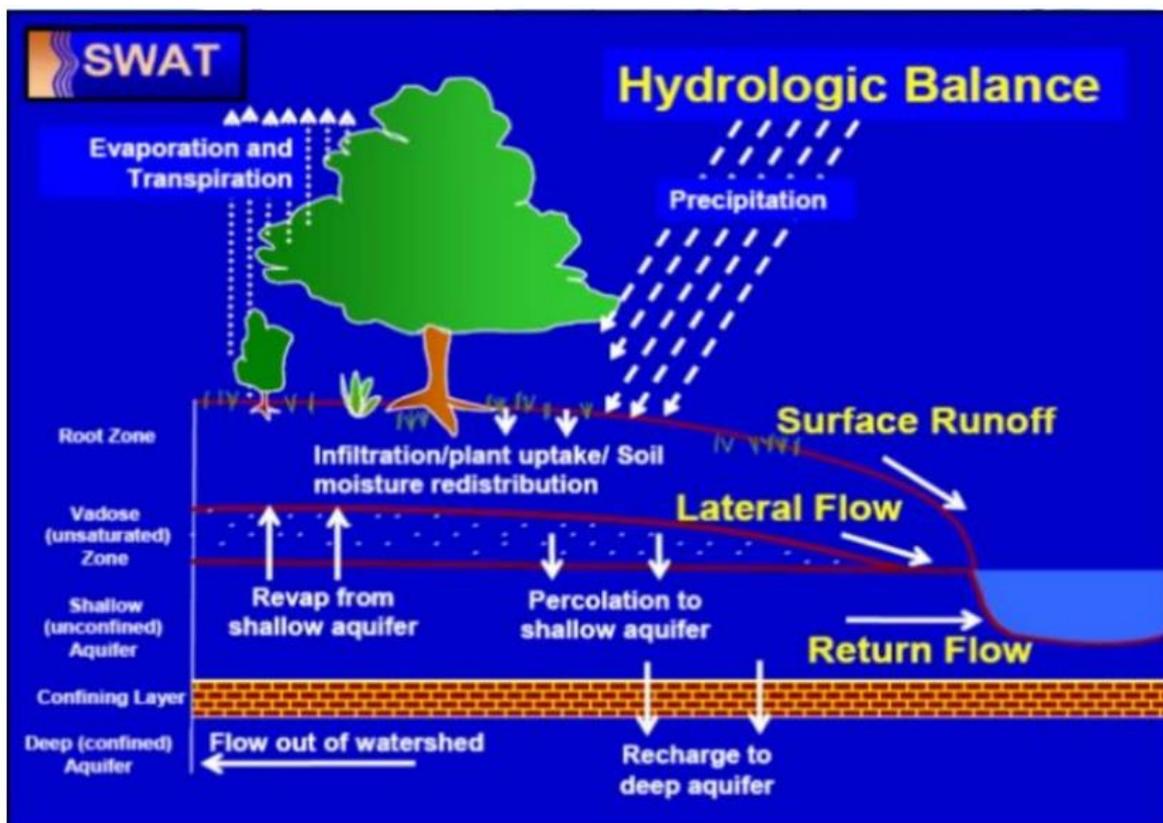


Fig. 68 – Schéma du cycle hydrologique (Documentation SWAT)
 Fig. 68 – Diagram of the hydrological cycle (SWAT Documentation)

SWAT est un modèle déterministe à base physique et semi-distribué, il requiert un certain nombre de données d'entrée (*Input Data*) spécifiques sur notre bassin versant afin de procéder à la modélisation. Il s'agit des données météorologiques (Climate), pédologiques (Landsoil), topographique (DEM) et d'utilisation des terres (Landuse) (*tab. 9*). SWAT est généralement couplé à un SIG, notamment avec **ArcGIS** (*ArcSWAT*) pour générer des données de type raster, vecteur et alphanumériques (*fig. 69*), cela facilite et automatise la préparation des données d'entrées, et rend aussi plus conviviale la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation [Renaud, 2004]. Le système de projection « WGS 84, UTM Zone 34 N » est utilisé pour l'ensemble de nos données dans l'interface ArcSWAT.

Tableau 8 – Données d'entrée du bassin de l'Oubangui appliquées au modèle SWAT

Table 8 – Ubangui basin input data applied to the SWAT model

Données	Significations et Sources
Topographie (DEM)	ASTERGDEM, Résolution 30 m https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
Sol (Landsoil)	FAO-UN, Land and Water Division (CBL) http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116
Utilisation des terres (Landuse)	Land Cover Africa
Climat (Climate)	Données météorologiques de Palambo (par extrapolation de celles de Bangui). Sources : DNM de Centrafrique http://www.hydrosciences.fr/sierem/produits/index.asp?frame=nationaux , et données de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)
Débit (flow)	Données nécessaires à la calibration. Sources : DNM de Centrafrique http://www.hydrosciences.fr/sierem/produits/index.asp?frame=nationaux

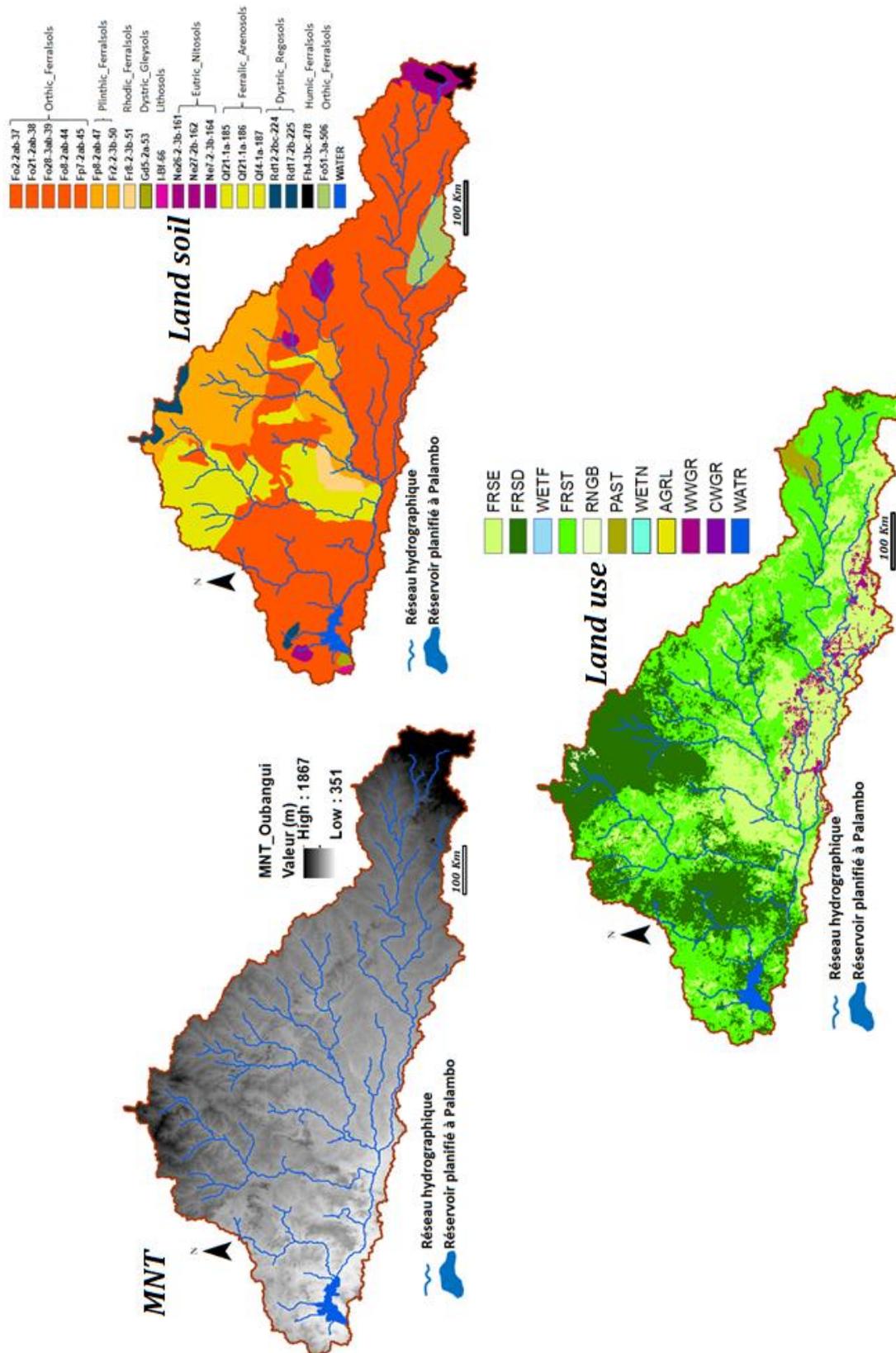


Fig. 69 – Quelques données SIG générées par ArcSWAT à l'échelle du bassin contrôlé par le barrage-planifié de Palambo

Fig. 69 – Some GIS data generated by ArcSWAT at basin scale controlled by the planned Palambo dam

2- Simulation

Notre simulation s'est effectuée sur une période de deux ans (*1^{er} janvier 2009 au 31 décembre 2010*), et comme toute simulation hydrologique, les premières valeurs simulées ne calent pas d'emblée avec les valeurs observées (*fig. 70*), cela nécessite une *calibration* des paramètres hydrologiques les plus *sensibles* de la simulation pour optimiser le modèle.

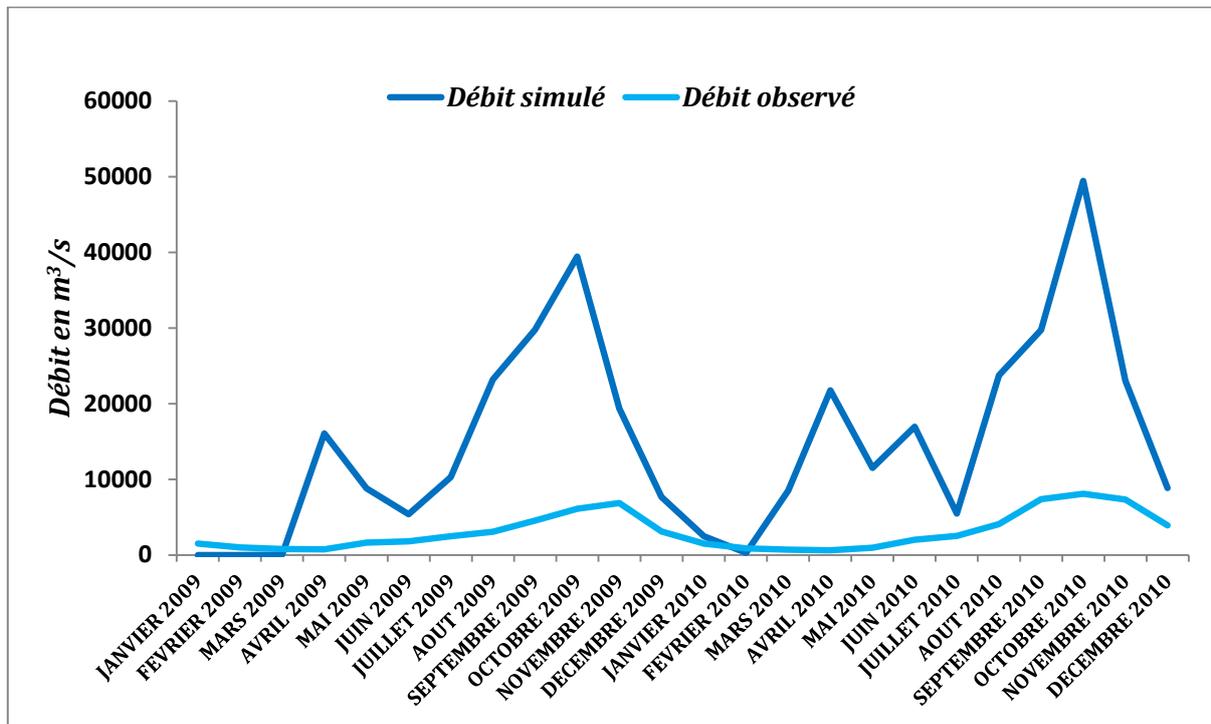


Fig. 70 – Comparaison des valeurs du Débit simulé à celles du débit observé
Fig. 70 – Comparison of the values of the Simulated Flow with those of the Observed Flow

3- Calibration

La calibration est l'une des étapes importantes de la modélisation hydrologique, elle correspond au « *scénario zéro* », et consiste à ajuster certains paramètres hydrologiques de la simulation afin d'obtenir une meilleure concordance entre les valeurs des *débits simulés* et *observés* réellement à la station limnimétrique. L'ajustement concerne les paramètres les plus *sensibles* de la première simulation. Dans notre « *simulation zéro* », 26 paramètres hydrologiques sont les plus sensibles et ont été ajustés pour fin de calibration (*tab. 10*).

La Calibration du modèle a été effectuée de manière semi-automatisée avec l'application *SWAT-Cup* et son algorithme de calcul *Sufi2*, elle a été appliquée essentiellement sur le sous-

bassin 80 qui correspond à l'exutoire du bassin versant contrôlé par le barrage-réservoir ; ainsi, la meilleure calibration a été obtenue après de nombreuses itérations (*fig. 71*).

Tableau 9 – Ajustement des 26 paramètres hydrologiques les plus sensibles du modèle
Tableau 9 – Adjustment of the 26 most sensitive hydrological parameters of the model

Paramètre	Table	Valeur par défaut	Valeur Ajustée	Définition
Cn2	MGT1	66.5	-0.75	Curve number, Coefficient de ruissèlement/infiltration
Alpha_Bf	GW	0.5	0	Constante de récession du débit de base (jour)
Gw_Delay	GW	250	27.5	Temps de recharge de l'aquifère (jour)
Gwqmn	GW	2500	25	Niveau d'eau dans la nappe libre (mm)
Sol_Awc	SOL	0.5	1.5	Quantité d'eau disponible dans le sol (mm H ₂ O/mm de Sol)
Sol_K	SOL	1000	-1.25	Conductivité hydraulique à saturation (mm/hr)
Sol_Z	SOL	1750	0	Profondeur du sol
Sol_Alb	SOL	0.125	0.1	Albédo (pouvoir réfléchissant) du sol humide
Sftmp	BSN	0	0	Température du seuil de chute de neige
Smtmp	BSN	0	0	Température de fonte de neige (degrés Celsius)
Smfmx	BSN	10	0	Facteur de fonte de neige au 21 juin (mm H ₂ O/degré Celsius-jour)
Smfmn	BSN	10	0	Facteur de fonte de neige au 21 décembre
Gw_Revap	GW	0.11	0	Coefficient de mobilisation de l'eau dans la nappe
Ch_N2	RTE	0.145	0	Coefficient de Manning (rugosité) du chenal principal
Revapmn	GW	250	0.5	Seuil de profondeur de l'aquifère qui permet la "revap"
Surlag	BSN	12.025	-0.5	Coefficient du délai du ruissellement de surface
Canmx	HRU	50	-2.5	Stockage maximum de la canopée
Blai	CROP	5.25	2.5	Indice de potentiel maximal de surface foliaire
Biomix	MGT1	0.5	0.1	Efficacité du mélange biologique
Ch_K2	RTE	249.995	0.1	Conductivité hydraulique effective de l'alluvion du chenal principal (mm/hr)
Esco	HRU	0.5	-2.5	Paramètre de compensation de l'évaporation dans le sol (mm)
Epc	HRU	0.5	0.5	Paramètre de compensation de l'absorption racinaire
Timp	BSN	0.5	0	Facteur de délai de la température de la couverture nivale
Tlaps	SUB	0	0.1	Taux de variation de la température
Slope	HRU	0.5	7.4	Inclinaison de la pente moyenne
Ssubbsn	HRU	80	-7	Longueur de la pente moyenne

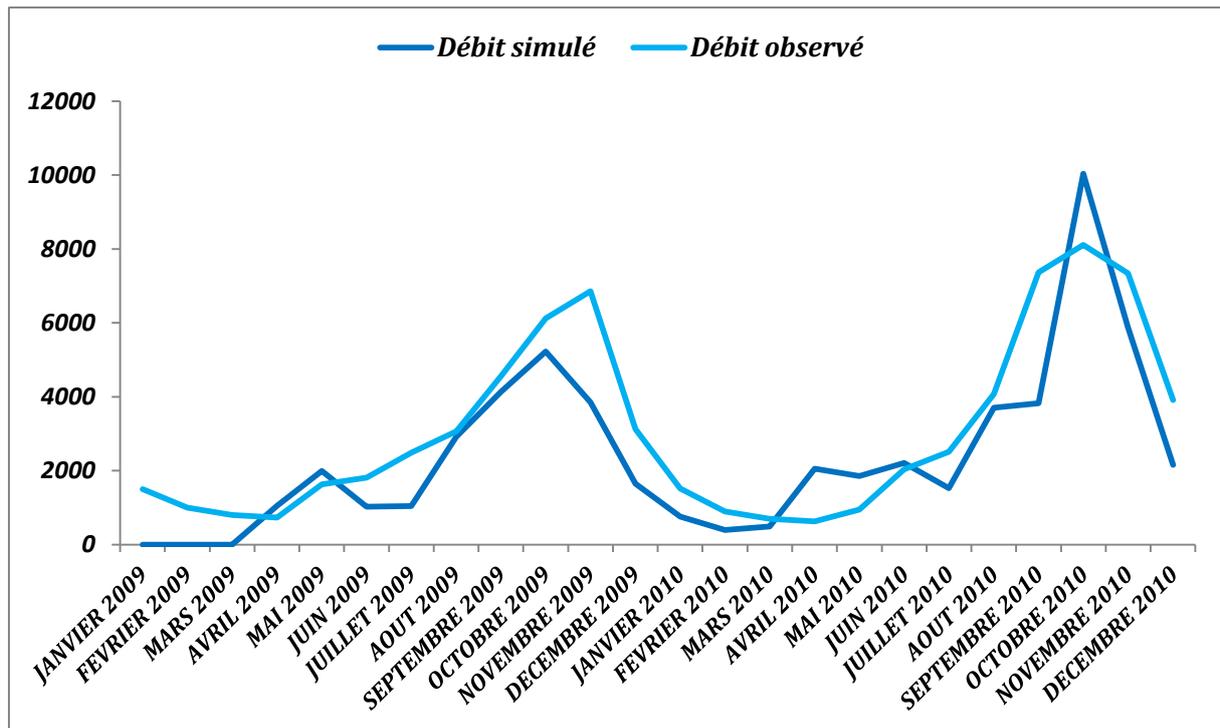


Fig. 71 – Résultats de la calibration finale
Fig. 71 – Résultats de la calibration finale

La meilleure calibration est souvent obtenue en fonction de la meilleure corrélation entre les valeurs des débits simulés et les valeurs réelles des débits observés. Ainsi, de nombreux indices sont utilisés pour apprécier cette corrélation dont l'indice de *NS* et l'indice R^2 . **L'indice *NS*** (*l'Indice de Nash- Sutcliffe*), offre une évaluation plus précise de l'efficacité quant au respect des volumes écoulés et des écarts absolus [Bioteau & al., 2002]. La valeur de *NS* varie de $-\infty$ à 1. Plus sa valeur est proche de 1, plus le modèle est optimisé, au-delà de 0,60, on considère que le modèle reproduit correctement les débits sur le bassin, des valeurs dépassant 0,65 sont considérées admissibles et 0,75 satisfaisantes. L'indice *NS* s'écrit de la sorte :

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)^2}{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2}$$

Avec ***NS*** le Coefficient de Nash- Sutcliffe ; ***Q_m*** le débit observé ; ***Q_s*** le débit simulé ; **\bar{Q}_m** la moyenne des débits observés. **L'indice R^2** (coefficient de corrélation), pour sa part permet de mesurer la relation existant entre les valeurs de débits simulés et celles des débits observés. Il varie de -1 à 1. Des valeurs supérieures à 0,5 sont considérées acceptables ; et s'écrit de la sorte :

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m) \sum_i(Q_{si} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i(Q_{si} - \bar{Q}_s)^2}$$

L'application de ces deux indices sur notre modèle sur le sous-bassin 80 a permis de souligner la bonne reproductibilité de notre calibration, car la valeur de notre indice *NS* est égal à 0,67 et celle de l'Indice R^2 est égal à 0,75.

4- Validation

La validation correspond à la dernière étape de la modélisation, une fois validé, le modèle peut-être exploité à des fins prédictives, en fonction des scénarios définis. La validation permet d'évaluer la pertinence du modèle SWAT ou encore de vérifier la validité de la calibration sur l'ensemble du bassin. En effet, la première calibration n'a été effectuée que sur un seul sous-bassin (sous bassin 80), et donc pour être validée, la calibration doit être effectuée sur l'ensemble du bassin contrôlé par le barrage. Pour se faire, nous allons relancer une nouvelle calibration sur l'ensemble du bassin en appliquant les mêmes indices que la première calibration. Cela a permis d'obtenir un faible coefficient de Nash (*NS*) de 0,47 et un coefficient de corrélation linéaire (R^2) normal de 0,51. Les valeurs obtenues post-validation ne nous permettent pas de procéder à la simulation du scénario de l'aménagement de Palambo sur l'écoulement de l'Oubangui. Ces valeurs sont plus ou moins précises pour pouvoir simuler le scénario prévu. Pour qu'un modèle hydrologique soit efficace et optimisé, il faut que les valeurs des indices *NS* et R^2 soient respectivement supérieures à 0,60 et 0,50, ce qui n'est pas le cas de nos résultats. L'imprécision ici n'est liée au modèle SWAT mais est la résultante de la qualité des données utilisées pour la modélisation. Il existe des incertitudes sur certaines données utilisées, notamment sur les données de la *vitesse du vent* et de *l'ensoleillement*. Ces incertitudes sont liées à la nature et à la source des données. Les données sur la vitesse du vent et sur l'ensoleillement ont été recueillies dans la base de données météorologiques mondiales (*CFSR weather Data*). Tandis que les données de la *pluviométrie*, la *température* et *l'humidité de l'air* ont été recueillies auprès des services météorologiques Centrafricains.

B- Apports de l'extrapolation hydrologique à l'évaluation des effets prévisibles du barrage de Palambo

1- La mise en œuvre de la méthode

On l'a vu, les études d'impact hydrologique des barrages en rivière sont largement documentées et passées en revue, cela a permis de disposer d'un large éventail méthodologique permettant d'aborder cette problématique. En revanche, il existe une carence méthodologique concernant les études d'impact des barrages projetés en rivière. Il est toujours difficile d'évaluer les impacts futurs d'un barrage sur une rivière car les systèmes fluviaux sont souvent uniques d'un bassin à un autre, et leurs évolutions sont sous influence de plusieurs paramètres. Néanmoins, on recourt couramment à la modélisation intégrée pour évaluer l'impact futur d'un barrage sur une rivière. Dans un contexte de gestion durable des hydrosystèmes fluviaux, les « *modèles* » hydrologiques sont de plus en plus utilisés comme des *outils de prises de décision* dans de nombreux projets d'aménagements de barrages afin de minimiser leurs effets sur les écosystèmes aquatiques. En fonction des scénarios définis, il existe un assortiment de modèle hydrologique. Mais ces modèles requièrent tous des paramètres (données) d'entrées spécifiques pour pouvoir simuler les scénarios d'aménagements des rivières. Le modèle SWAT en l'occurrence nécessite des données sur l'occupation du sol, sur la pédologie, sur le relief (MNT) et sur la Météorologie (ex : pluviométrie, température, humidité de l'air). Sur les bassins fluviaux les moins expérimentés comme celui de l'Oubangui, la mise en place du modèle SWAT sera compromise par une carence de données. Une telle étude sur un tel bassin oblige de disposer de matériels et du temps nécessaires pour parvenir à de meilleurs résultats. En outre, les modèles sont difficilement transposables à d'autres systèmes puisque la nature et les niveaux d'ajustement varient d'un cours d'eau à l'autre [Brierley et al. 2008].

Dans le sous-chapitre précédent, nous avons essayé d'appliquer le modèle SWAT pour simuler les effets hydrologiques prévisibles du barrage de Palambo sur l'Oubangui, mais les résultats n'ont pas été satisfaisants en raison des incertitudes dans les données météorologiques collectées. Par conséquent, nous avons appliqué la méthode « *d'extrapolation hydrologique* » pour prospecter les effets prévisibles du barrage planifié à Palambo. Nous avons développé cette méthode pour faire face à la difficulté méthodologique rencontrée. La méthode consiste à transposer les effets hydrologiques d'un barrage existant (barrage de références) sur un barrage projeté. La méthode est applicable et fiable lorsqu'il

existe un certain parallélisme entre le *barrage de référence* et le *barrage projeté*. Dans le cadre de notre extrapolation, nous avons défini précisément le *barrage de Boali* comme le barrage de référence, et le *barrage de Palambo* comme le barrage projeté. Les deux barrages sont situés dans une même région climatique et peuvent donc avoir des réponses hydrologiques proches aux effets des aménagements hydrauliques.

2- Parallélisme entre le barrage projeté de Palambo et le barrage de Boali

Le barrage de Boali ($18^{\circ} 00' 05'' E, 4^{\circ} 55' 10'' N$) est aménagé en 1991 sur la rivière *Mbali*, un sous-affluent de l'Oubangui (*fig.72a, b*). La commune de Boali est située à environ 90 Km au Nord de Bangui et compte près de 25 000 habitants. Le barrage de *Boali* est un *barrage-réservoir* dont l'ouvrage en travers fait 750 mètres et le réservoir retient près de $0,25 \text{ Km}^3$ de volume d'eau (*fig. 72c*). Il est aménagé dans un milieu rural à végétation péri-forestière sur un substrat cristallin. Sa principale vocation est de réguler le débit de la rivière Mbali afin de produire de l'hydroélectricité.

Le barrage de Palambo ($18^{\circ} 57' 4'' E, 4^{\circ} 42' 24'' N$) est planifié sur la rivière Oubangui à 60 Km à l'Est de Bangui. Excepté la rive gauche qui est Congolaise, la commune de Palambo en rive droite de l'Oubangui compte près de 6 000 habitants. L'activité dominante est la pêche ensuite l'agriculture. À l'image du barrage de Boali, le barrage prévu à Palambo disposerait d'un immense réservoir d'eau dont le volume dépassera largement celui du réservoir de Boali (*fig. 72b*). Contrairement au barrage de Boali dont la fonction principale est de produire de l'hydroélectricité, le barrage de Palambo aura trois fonctions principales : 1) *la dérivation d'une partie de l'Oubangui vers le lac Tchad via un réseau de canalisation*, 2) *la régulation de la navigation sur l'Oubangui, notamment sur le bief Bangui-Brazzaville*, 3) *et la production d'hydroélectricité*. Le site de Palambo se trouve dans un milieu forestier à climat tropical humide et dans un contexte cristallin.

Les deux sites ont un régime fluvial monomodal dont le mode d'écoulement est généralement observé au mois *d'octobre* et cela correspond au pic de la pluviométrie sur le bassin. Leur *calendrier hydrologique* est réparti « *d'avril-mars* », avec le mois *d'avril* qui correspond au début d'écoulement et le mois de *mars*, à la fin de décrue.

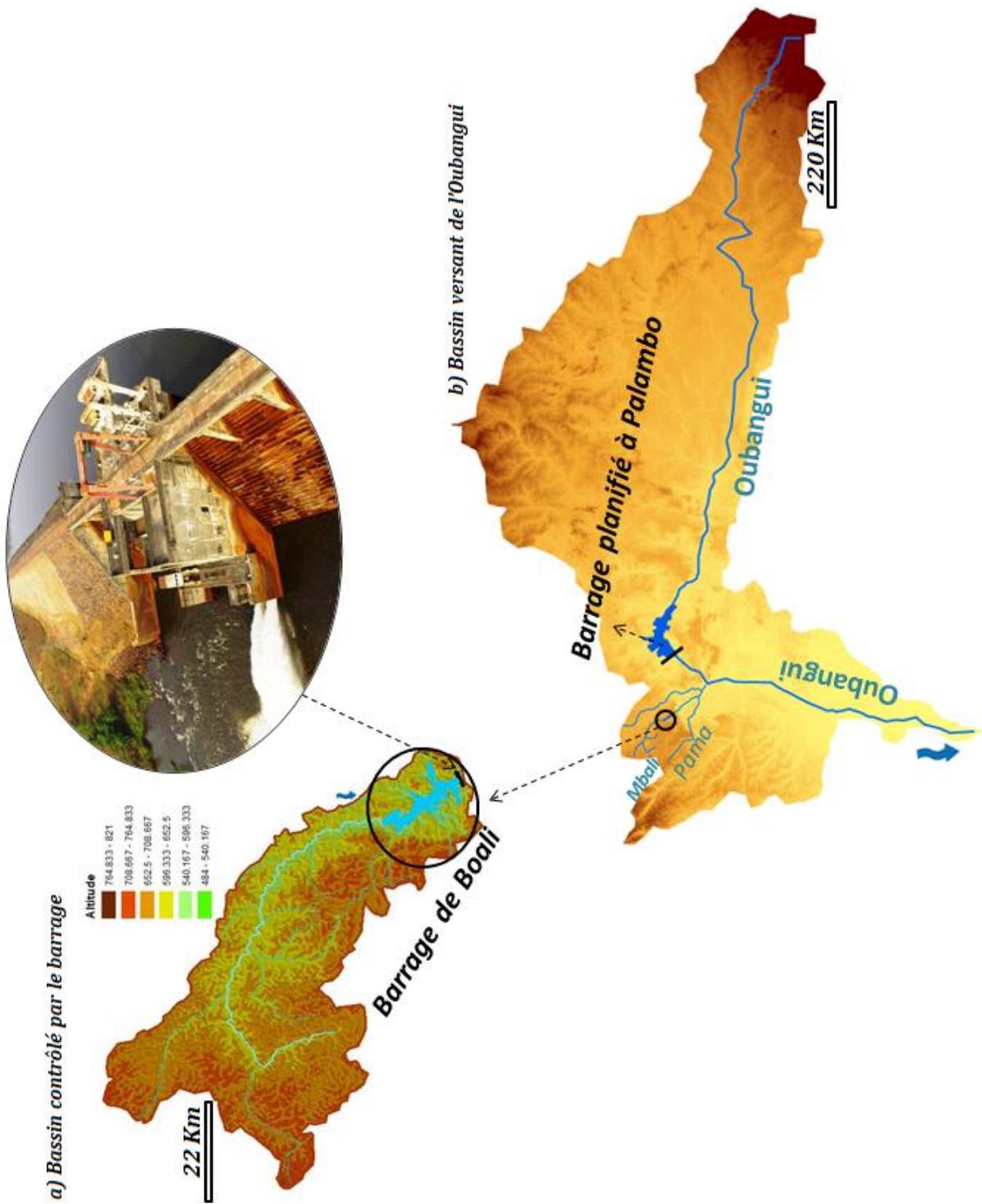


Fig. 72 – Les barrages-réservoirs de Palambo et de Boali sur le bassin versant de l’Oubangui
Fig. 72 – The reservoir dams of Palambo and Boali on the Ubangui watershed

3- Résultats de l'extrapolation

Trois niveaux d'impacts ont été identifiés concernant le barrage projeté à Palambo. Le premier niveau concerne l'impact local du projet, le deuxième concerne l'impact régional, et le troisième concerne l'impact interbassin du projet.

3.1- *Les impacts locaux du barrage projeté*

Les impacts locaux du barrage concernent les éventuels changements qui seront enregistrés dans le paysage fluvial de l'Oubangui à Palambo. Les travaux d'aménagement du barrage s'accompagneraient par la déforestation et l'excavation des terres, celles-ci pourraient contribuer à modifier l'occupation du sol à Palambo. La retenue qui sera formée après la mise en eau du barrage envahirait un milieu naturel. Des espaces agricoles et résidentiels seraient impactés. La montée des eaux recouvrirait des terres fertiles et quelques villages situés sur le long de l'Oubangui. Des milliers d'autochtones seraient déplacés et relocalisés. La déforestation exposerait le versant aux effets d'érosion et de ruissellement. Le lac de barrage connaîtrait un problème de sédimentation à cause de l'accroissement du ruissellement sur le versant. Un habitat lacustre susceptible à la reproduction des espèces limnophiles se mettrait en place de l'habitat initial (fluvial) qui était favorable à la reproduction des espèces locales semi-rhéophiles (*ex : les Lates, les Mormyrus, les Distichodus*) qui ont une certaine importance commerciale auprès de la population. Notons que ces espèces rhéophiles ou semi-rhéophiles préfèrent souvent évoluer en eaux vives et sont généralement exigeantes en qualité d'habitat ; par conséquent, la mise en place d'un habitat lacustre pourrait affecter leur cycle biologique. Alors, un processus de « *sélection naturelle* » pourrait se mettre en place où, seules les espèces capables de s'adapter au faciès lentique pourraient survivre dans le lac de barrage, tandis que les espèces timides seraient vouées à disparaître.

3.2- *Les impacts régionaux du barrage projeté*

Les impacts régionaux du projet d'aménagement de Palambo concernent les éventuels changements qui seront enregistrés sur le bassin de l'Oubangui. Ces changements seront enregistrés sur les flux de débits ainsi que sur les flux sédimentaires.

- ✓ *Sur les flux de débits*, la régulation de l'écoulement à Palambo altérerait le régime hydrologique de l'Oubangui en aval du barrage. Le caractère multifonctionnel du

barrage nécessite un marnage important du réservoir, et par conséquent, cela modifierait significativement le régime d'écoulement en aval. Un « régime artificiel » sous contrôle des pulsations des vannes du barrage pourrait se mettre en place, se substituant au régime initial très dépendant de la pluviométrie régionale. Les débits maximums de crues seraient laminés alors que les débits d'étiages seraient soutenus. Cette variabilité du régime d'écoulement aurait pour effet en aval de réduire la mobilité latérale du chenal. Or, on l'a vu, la mobilité latérale des rivières est le moteur de la dynamique fluviale (*fig. 11*) ; elle permet à la rivière lors des crues, d'éroder les berges, d'alimenter les annexes fluviales (ex : bras morts, plaines alluviales) et de régénérer les habitats aquatiques.

L'artificialisation du régime d'écoulement de l'Oubangui aurait aussi des effets sur les « patrimoines géomorphologiques », notamment sur les *chutes et rapides* de l'Oubangui. En plus de leurs intérêts touristiques, les chutes et rapides de l'Oubangui ont également des valeurs symboliques (*p. 44*) voire scientifiques. D'ailleurs, le mot « Oubangui » signifie en langue locale, « rivière des rapides ». De ce fait, la régulation du débit à Palambo pourrait affecter la *surface en eau* des rapides de l'Oubangui, notamment ceux de Bangui, situés à seulement 60 km en aval de Palambo. Ce cas a déjà été constaté sur la chute de la rivière Mbali située à 9 km en aval du barrage de Boali (*ex :photo 18*). Ce *géomorphosite* a perdu toute sa splendeur depuis les séries aménagements hydrauliques sur la rivière Mbali.

Outre leurs importances culturelles, touristiques et scientifiques, les *rapides* de l'Oubangui offrent un habitat idéal de reproduction aux nombreuses espèces de poissons *lithophiles* ; ils offrent également un microclimat particulièrement favorable à l'installation humaine sur les bords de la rivière, et à l'attraction des oiseaux migrateurs.



Photo 18 – Chute de la Mbali à environ 12 Km en aval du barrage de Boali
Photo 18 – Waterfall of the Mbali about 12 km downstream of the Boali dam

- ✓ **Sur les flux sédimentaires**, les effets concernent la rétention des sédiments par le futur réservoir de Palambo. Ce barrage constituerait une rupture dans la continuité sédimentaire de l'Oubangui. Des sédiments fins seraient piégés dans le barrage contribuant à réduire la capacité de stockage initial du réservoir. Comparativement à d'autres barrages aménagés en régions semi-arides, le taux de piégeage dans le réservoir de Palambo sera nettement inférieur, car l'Oubangui dispose d'une faible capacité de transport sédimentaire (*fig. 26*), et celui-ci draine également un bassin versant forestier qui limite les effets d'érosion mécanique. Néanmoins, les sédiments fins qui seraient piégés dans le réservoir contribueraient à modifier l'équilibre sédimentaire amont-aval de la rivière, par conséquent, cela aurait des effets sur l'habitat des communautés aquatiques psammophiles. À ce titre, le cycle vital des *hirondelles* qui nichent régulièrement sur les barres sableuses de l'Oubangui serait

perturbé. Ces oiseaux migrateurs hivernent généralement en Afrique lorsque les températures sont au plus bas en Europe.

De même, des sédiments endogènes pourraient s'accumuler dans le lac de barrage et contribueraient de fait à son comblement. Ces sédiments résulteraient de la minéralisation des matières organiques piégées lors de la mise en eau du barrage. Des mesures de gestions d'envasement doivent être prises en compte dans l'élaboration de cet aménagement afin de minimiser la sédimentation du lac de barrage de Palambo.

En outre, l'altération du régime hydrosédimentaire de l'Oubangui aurait aussi des effets sur les activités humaines en aval du barrage, notamment sur la pêche. Les activités d'extraction de sable en « *têtes* » et « *queues* » des îles fluviales de l'Oubangui ne seraient pas épargnées, elles seraient affectées évidemment par un déficit d'alluvionnement. Les bancs de sables qui structurent la morphologie fluviale lors des basses eaux seraient moins présents à cause du soutien des débits d'étiage par le réservoir.

3.3- *Les impacts interbassins du projet*

Le premier objectif du projet PTEIB est de dériver une partie de l'eau de l'Oubangui et de la Kotto vers le lac Tchad. Sur l'Oubangui, le projet prévoit de construire un méga-barrage à hauteur de Palambo permettant de stocker de l'eau dans un lac artificiel pour l'acheminer vers le lac Tchad. Quatre rivières serviront d'itinéraire à la dérivation, à savoir les rivières *Tom*, *Fafa*, *Ouham* et *Chari* (fig. 4). La rivière *Tom* appartient au bassin versant de l'Oubangui, par contre les rivières *Fafa*, *Ouham* et *Chari* appartiennent pour leur part au bassin du lac Tchad. Il existe naturellement une ligne de partage des eaux qui sépare le bassin de l'Oubangui au sud et le bassin du lac Tchad au nord. C'est la fameuse « *dorsale centrafricaine* » qui est formée à la suite d'une surrection tectonique au Cénozoïque. Cette ligne de crête, d'altitude moyenne de 600 m, devrait être franchie par un canal pour acheminer l'eau depuis la rivière *Tom* (bassin de l'Oubangui) vers les rivières *Fafa*, *Ouham* et *Chari* avant de parvenir au lac Tchad (fig. 4). Ce mécanisme de dérivation pourrait entraîner des changements dans l'organisation spatiale du réseau hydrographique des deux bassins. De plus, les rivières servant de support de dérivation pourraient se transformer en de simples canaux ou aqueducs, car leurs dynamiques fluviales seraient fortement altérées. La géométrie hydraulique de la *Tom* serait totalement modifiée, la rivière adopterait un écoulement uniforme à lit homogène ; son écosystème aquatique serait tout de même altéré par cette artificialisation.

Blanchon (2003) qualifie alors de « *techno-nature* » ce nouvel écosystème issu de l'artificialisation de l'écoulement. L'auteur a étudié les effets environnementaux des aménagements hydrauliques sur le fleuve *Orange* en Afrique du Sud, et a constaté que « *les systèmes de dérivations de l'eau transforment les cours d'eau en systèmes hybrides où il est très difficile de distinguer le naturel de l'artificiel.* »

Restons toujours sur les effets du projet à l'échelle interbassin. L'utilisation des eaux du réservoir pour les besoins multiformes pourrait engendrer des conflits d'usages entre les différents acteurs de l'eau. Si l'on privilégie par exemple l'usage de l'eau pour la dérivation au détriment de la navigation, cela pourrait créer des frustrations auprès des navigateurs. Et à l'inverse, si l'on privilégie l'usage de l'eau pour la navigation au détriment du transfert d'eau, cela pourrait aussi créer des frustrations auprès des communautés riveraines du lac Tchad.

Conclusion du deuxième chapitre

Deux barrages relatifs au projet PTEIB sont planifiés sur le bassin de l'Oubangui. aucun des deux n'a fait l'objet d'une véritable étude d'impact environnemental. Dans notre étude, nous avons déterminé les impacts prévisibles du barrage planifié à Palambo sur le régime d'écoulement de la rivière Oubangui. La modélisation hydrologique a d'abord été appliquée à cet effet. Le modèle SWAT a été utilisé pour son efficacité prouvée dans l'évaluation des effets d'anthropisation sur les débits fluviaux. Malheureusement, notre modélisation intégrée n'est pas parvenue à terme à cause des incertitudes dans les données météorologiques sur notre station étudiée. De ce fait, nous avons recouru à la méthode « d'extrapolation hydrologique » pour prospecter les impacts prévisibles du projet PTEIB. Le barrage de Boali a servi de barrage de référence pour notre extrapolation. Il en résulte, trois niveaux d'impacts du projet: un impact local, un impact régional et un impact interbassin.

L'impact local concerne les changements qui seront observés dans le paysage fluvial de l'Oubangui à Palambo. L'habitat lacustre se substituerait à un habitat fluvial en amont du barrage. Le versant de l'Oubangui sera soumis localement au processus de ruissellement et d'érosion du fait de la dénudation du couvert forestier.

L'impact régional concerne les changements qui seront enregistrés à l'échelle du bassin versant de l'Oubangui. L'altération du régime d'écoulement serait un effet attendu du fait de la régulation du débit par le méga-réservoir. Les activités humaines telles que la pêche et

l'extraction de sables seront également perturbées après la régulation du débit. Contrairement au demi-barrage de Mobaye, le barrage-réservoir de Palambo constituera un obstacle à la continuité hydrosédimentaire de l'Oubangui. La rivière connaîtrait par conséquent, une faible mobilité latérale en aval et également un déficit d'alluvionnement.

L'impact interbassin du projet concerne l'artificialisation des rivières qui serviront de support de dérivation. Celles-ci connaîtront une variabilité de leur régime d'écoulement, et par conséquent, leurs dynamiques fluviales seraient perturbées. La rivière Tomi qui sera canalisée, pourrait se transformer en un simple aqueduc. Le franchissement de la ligne de partage des eaux entre le bassin de l'Oubangui et celui du lac Tchad par le canal de dérivation pourrait modifier l'organisation spatiale du réseau hydrographique des deux bassins.

Connaissant déjà les effets bénéfiques escomptés du barrage planifié à Palambo (Chap 1- Partie 3) et les inconvénients dudit projet (Chap. 2 - Partie 3), il nous semble nécessaire de proposer quelques perspectives de gestion et d'aménagement dans le prochain chapitre afin de minimiser les effets potentiels de ce projet sur le bassin de l'Oubangui.

Chapitre 3 – Perspectives d'Aménagements et de Gestions Durables des barrages de l'Oubangui

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les actions envisageables en matière de gestions des barrages de Mobaye et de Boali. Enfin, des perspectives d'aménagement durable ont été proposées pour minimiser les effets potentiels du barrage planifié à Palambo.



A- Perspectives de Recherches et de Gestions des barrages de Mobaye et Boali

1- Actions envisageables à Mobaye

Au regard des résultats majeurs de notre recherche sur le barrage de Mobaye, nous proposons quelques actions envisageables en termes de gestion « durable » de l'Oubangui, et celles-ci se présentent comme suit :

Réhabilitation des stations hydrométéorologiques de l'Oubangui à Mobaye

L'une des principales contraintes rencontrées au cours de la réalisation de cette thèse concerne l'indisponibilité des données hydrologiques sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui. Sur une soixantaine de stations hydrométriques installées à partir du 19^{ème} siècle (*annexe 6*), seule la station de Bangui continue à jauger le débit de l'Oubangui au pas de temps journalier. À Mobaye on l'a vu, les dernières observations remontent en 1993 et cela constitue de sérieux obstacles aux travaux de recherches hydrologiques sur l'Oubangui. Il serait souhaitable de réhabiliter les stations hydrométriques de Mobaye en vue d'enregistrer les débits de l'Oubangui sur une longue série temporelle.

Approfondir la recherche pour déterminer la distance spatiale d'impact morphologique du demi-barrage

Un des sujets les plus complexes en dynamique fluviale est de définir le seuil d'impact spatial de l'érosion en aval d'un barrage. Nos résultats de recherche à Mobaye ont permis de montrer que les changements enregistrés dans la géométrie hydraulique locale de l'Oubangui après sa régulation ont entraîné une érosion progressive en aval. Les bancs alluviaux situés en aval immédiat du barrage ont perdu près de 22% de leur surface sédimentaire (*fig. 48*). Il nous semble utile d'affiner ces résultats dans des recherches ultérieures pour déterminer la distance à partir de laquelle l'impact du processus érosif devient nul. Comprendre le seuil d'impact longitudinal de cet ouvrage permet de définir de bonnes stratégies de gestion sur l'hydrosystème de l'Oubangui.

Ailleurs, les travaux de Williams & Wolman (1984) sur 21 cours d'eau Nord-Américains régulés par des barrages ont montré que l'érosion la plus forte se produit immédiatement en aval du barrage et s'atténue quelques kilomètres plus loin. Les auteurs ont montré que le

rythme de progression amont-aval de ces impacts peut varier entre 0 et 2 km/an, et peut atteindre sur certains cours d'eau 29 km/an, voire 42 km/an. Selon Phillips & al. (2005), l'impact de l'érosion progressive devient insignifiant voire nul à partir de 50 à 120 km en aval du barrage, et par conséquent, c'est l'influence de la morphologie locale du chenal ou de la vallée qui redevient plus importante au-delà de cette distance.

Déterminer l'impact de l'extraction de sables sur le processus sédimentaire de l'Oubangui

A environ 350 km en aval de Mobaye, l'Oubangui enregistre un déficit sédimentaire de 6% à Bangui. On ignore à ce jour la part des effets d'extraction de sable dans ce déficit sédimentaire (*photo 6*). *Quelle est l'influence de cette activité sur le processus sédimentaire de l'Oubangui ? L'extraction artisanale de sable en lit mineur n'entraîne-t-elle pas un enfoncement du lit de l'Oubangui à Bangui ?* À cet effet, nous recommandons aux gestionnaires de procéder à une réelle étude d'impact des activités d'extraction artisanale de sables sur l'Oubangui au secteur fonctionnel de Bangui. Les résultats de l'étude leurs permettront de réglementer cette activité.

Pérenniser la pêche sur l'Oubangui à Mobaye

La turbulence engendrée par le demi-barrage a entraîné une abondance des ressources piscicoles en aval immédiat de l'ouvrage. Le site est désormais soumis à une surpêche à cause de l'affluence des pêcheurs. Les poissons adultes se font de plus en plus rares et la pêche est progressivement orientée vers les juvéniles, cela pourrait être conséquent pour le « *cycle biologique* » des poissons, notamment sur leur croissance et leur reproduction. La reproduction constitue en effet une étape cruciale dans le cycle de vie d'un poisson, l'équilibre démographique d'une espèce de poisson est étroitement lié au bon déroulement de cette phase critique [Parkinson & al, 1999]. Les gestionnaires de l'Oubangui devraient harmoniser la pêche afin de favoriser la reproduction et la croissance des poissons.

Sur le *delta intérieur du Niger* par exemple, les pêcheurs pratiquent la pêche saisonnière afin de faire face aux effets des changements climatiques. Au premier abord, la pêche se pratique uniquement sur le delta lors des hautes eaux ; et c'est lors des basses eaux que les pêcheurs pratiquent l'agriculture sur les terres exondées. Une telle pratique (durable) pourrait être envisagée sur l'Oubangui afin d'optimiser la productivité piscicole.

Gestion transfrontalière de l'Oubangui

A Mobaye, l'Oubangui est une rivière contiguë entre le Centrafrique et la République démocratique du Congo. Son aménagement hydraulique a été fait partiellement dans la largeur du lit. Le projet d'aménagement prévoyait la construction d'un pont-barrage et non d'un demi-barrage. Inauguré en 1989, l'ouvrage de Mobaye n'obstrue que partiellement la largeur de l'Oubangui à Mobaye ; le fameux pont qui devrait assurer la continuité du barrage n'était pas du tout finalisé. Les piles du pont « inachevé » sont de nos jours visibles et contribuent à la formation des embâcles végétaux (*photo 9*). Les deux Etats devraient s'entendre pour procéder à l'arasement des piles afin de rétablir totalement la continuité de l'écoulement sur ce secteur fonctionnel. À cet effet, un Schéma d'Aménagement et de Gestion Locale (SAGE) de l'Oubangui pourrait être mis en place par les Etats transfrontaliers. Son élaboration devrait impliquer tous les acteurs de l'eau (gestionnaires, riverains, pêcheurs, cultivateurs, marchands de sable, les associations, collectivités locales ...).

2- Actions envisageables à Boali

Boali est le principal site d'approvisionnement en électricité de la ville de Bangui, capitale Centrafricaine, mais son complexe hydraulique n'est vraiment pas bien géré pour optimiser la production d'énergie de l'ensemble des centrales. Sur un autre plan, la réalisation du barrage-réservoir de Boali ne s'est pas faite sans dommages environnementaux. Des changements ont été observés dans le paysage fluvial de la rivière Mbali après sa régulation en 1991. Toujours est-il que le barrage-réservoir de Boali altère plus ou moins les flux hydriques et sédimentaires de la rivière Mbali contribuant à réduire en aval sa diversité. De tout ce qui précède, il nous semble très utile dans notre travail de proposer quelques mesures pour mieux gérer le barrage de Boali ainsi que les ressources en eau de la rivière Mbali.

Mise en place d'une station d'observation efficace sur la rivière Mbali

Certes, la rivière Mbali disposait plus de cinq stations hydrométriques et deux stations météorologiques qui permettaient d'enregistrer le débit et la pluviométrie sur son bassin, mais toutes ces stations sont à l'arrêt depuis le début des années 1990. Dès lors, on sait très peu de choses sur le comportement de la Mbali qui est une rivière instable hydrologiquement. Un enjeu important pour les gestionnaires de cette rivière serait de restaurer les stations

hydrométéorologiques préexistantes en vue de mieux gérer les ressources en eau de la rivière Mbali pour optimiser la production énergétique des centrales hydrauliques, car « on ne gère bien que ce que l'on mesure », dit un adage.

Surveiller le barrage pour anticiper les risques de ruptures

Tous les barrages ont une durée de vie finie. La législation autorise à tout grand barrage de disposer d'un système d'auscultations approprié permettant de garantir la sécurité du barrage. Le barrage de Boali était équipé d'un système de surveillance efficace permettant de détecter des pathologies dans le fonctionnement de l'ouvrage. Ce système était mis en place par le cabinet Coyne & Bellier. Il est constitué d'un dispositif comprenant les mesures d'auscultation dynamique, les mesures d'auscultation topographiques et l'inspection visuelle des ouvrages. Un rapport régulier d'auscultation est prévu par le constructeur pour rendre compte des campagnes de mesures. Comme tout barrage en rivière, la surveillance est assurée par l'exploitant et non le constructeur. La situation actuelle est que les systèmes de surveillances mis en place par le constructeur ne sont plus opérationnels. Le dysfonctionnement des appareils, l'absence des mesures, l'interruption de l'édition des rapports d'auscultation, ont conduit à l'arrêt de la surveillance du comportement du barrage. L'ouvrage hydraulique de Boali est plus que jamais exposé aux éventuels risques de ruptures. Les ruptures de barrages sont très rares mais sont toujours considérés comme un risque majeur dans le domaine de la géotechnique. Après la rupture du barrage de *Malpasset* dans le *Var* en 1959 (plus de 400 victimes), l'ingénieur *André Coyne* annonça alors que, « *de tous les ouvrages construits de main d'homme, les barrages sont les plus meurtriers* ».

Les ingénieurs hydrauliciens sont de plus en plus nombreux à penser que les barrages sont plus fragiles à l'extérieur qu'à l'intérieur à cause de l'érosion régressive. L'un des problèmes posés par la construction d'un barrage en rivière est celui de l'évacuation des eaux restituées sans effet destructeur à l'aval. L'eau relâchée par les vannes ou par les déversoirs d'un barrage est une eau généralement claire et turbulente. Elle doit se recharger localement avec son énergie cinétique pour compenser son manque en alluvions. C'est le fameux principe de « *hungry water* » décrit par Kondolf (1997). La recharge locale s'opère par *érosion linéaire* ou par *érosion des berges*. Le degré d'érosion dépend donc de la résistivité du substrat et de la nature des matériaux des berges. Les connaissances actuelles pour éviter les processus d'érosion en aval immédiat des barrages ne sont pas encore suffisamment étendues, l'une des

solutions préconisées à cet effet, est l'utilisation d'un bassin de dissipation d'énergie. Un tel aménagement serait à notre sens indispensable pour limiter l'affouillement au pied du barrage de Boali.

Limiter la dégradation du versant de la Mbali et l'envasement du lac de barrage

Le bassin de la Mbali est exposé aux aléas d'érosion depuis son aménagement en 1991 (*fig. 56 & 57*). L'anthropisation des abords du lac de barrage a contribué également à accroître la vulnérabilité du bassin au ruissellement. Les matériaux drainés sur le versant se convergent dans le lac de barrage contribuant à son envasement. Afin d'optimiser la capacité du stockage du lac, il serait souhaitable de procéder à un curage (partiel) du fond du lac. Une campagne bathymétrique à l'échosondeur est préalablement nécessaire avant de procéder au curage. Les travaux de curage peuvent se faire de manière mécanisée ou artisanale. Les matériaux curés peuvent être valorisés sous diverses formes.

- 1) Les matériaux argilo-limoneux peuvent être commercialisés aux agriculteurs pour fertiliser leur terres agricoles.
- 2) Les sables fins peuvent être commercialisés aux entreprises locales spécialisées dans les travaux de Bâtiment et Travaux Publics.
- 3) Ces matériaux peuvent également être réinjectés en aval du barrage où il existe une carence sédimentaire (*photo 17*) afin de rééquilibrer la dynamique sédimentaire et de redonner la diversité biologique. L'opération de « recharge artificielle » en alluvion est généralement pratiquée sur des anciens sites d'extraction de granulats, ou en aval des grands barrages. Sur le *Rhin* par exemple, environ 170 000 m³ de graviers sont injectés annuellement depuis 1978 en aval d'*Iffezheim* afin de stabiliser le fond du lit qui était en cours d'incision. L'objectif est d'assurer la sécurité des infrastructures (piles de pont, écluses ...) et la navigabilité du tronçon fluvial [Kuhl, 1992 ; Arnaud, 2012]. Les recharges sédimentaires ont aussi une finalité écologique. En Amérique du Nord, entre 1968 et 2004, environ 380 000 m³ de graviers ont été introduits artificiellement dans la *Trinity River* et dans les rivières de la *Central Valley (USA)* afin de restaurer l'habitat aquatique [Kondolf & al., 2005 ; Arnaud, 2012]. Une telle technique peut être envisageable sur la rivière Mbali en aval du barrage de Boali afin de limiter l'érosion linéaire. L'introduction artificielle de charge demeure cependant une action appartenant encore au domaine expérimental, et les résultats restent difficiles [...] elle

doit donc être impérativement accompagnée de campagnes de suivi afin de déterminer la mobilité et la répartition de la charge introduite dans le but d'adapter progressivement les volumes aux capacités de transport du cours d'eau ou de modifier les points d'introduction de la charge [Rollet, 2007]. La charge réintroduite doit donc être adaptée en quantité et en qualité aux conditions hydrauliques et sédimentaires du tronçon fluvial considéré [Rollet, 2007]. Dans le cas du barrage d'Iffezheim, la granulométrie injectée en aval du barrage est proche de celle du lit naturel [Arnaud, 2012].

Déterminer l'influence longitudinale du barrage de Boali

On l'a vu, le complexe hydraulique de Mobaye est une chaîne d'aménagement de 30 km composée d'un barrage-réservoir et de deux centrales hydrauliques. Il a été montré qu'une chaîne d'ouvrages hydrauliques, quelle que soit leur taille, a plus d'impact en rivière qu'un seul barrage en rivière. Pour notre part, nous pensons qu'il serait nécessaire d'affiner les recherches pour évaluer l'impact combiné du complexe hydraulique de Boali sur l'écosystème aquatique de la rivière Mbali. Par extension, les recherches peuvent conduire à déterminer l'influence du complexe hydraulique de Boali sur les rivières Pama et Oubangui.

B- Perspectives d'aménagements et de gestions du barrage planifié à Palambo

1- Intégration de la dimension environnementale dans l'élaboration du projet

A l'image du projet de canal de Suez en Egypte, le projet de dérivation de l'Oubangui vers le lac Tchad est l'un des projets les plus ambitieux du continent Africain. Dénommé « *PTEIB* », le scénario principal de cette version du projet consiste à transférer une partie de l'Oubangui à l'endroit de *Palambo* pour alimenter le *lac Tchad* via les rivières *Tomé, Fafa, Ouham* et *Chari*. Après plusieurs controverses, le *PTEIB* se retrouve de nos jours en suspens. Parmi les raisons qui entravent la réalisation dudit projet, il y a la quasi-absence de la dimension environnementale dans les Termes De Références (*TDRs*) du projet. Aucune Etude d'Impact Environnemental (*EIE*) n'a été faite afin de prévoir les effets directs et indirects du projet sur le bassin de l'Oubangui et celui du lac Tchad. La prise en compte de l'environnement dans les projets hydrauliques est une idée relativement nouvelle. Jusqu'à tout récemment, seules les contraintes techniques et les possibilités financières déterminaient les composantes d'un projet. D'abord employée dans les pays industrialisés, et pour un certain nombre de projets seulement, l'EIE se propage peu à peu à l'ensemble des pays et pour un éventail plus étendu de projets [Duchemin & al., 2003]. Tout au moins, l'EIE ne constitue guère une garantie pour un aménagement durable, néanmoins, sa réalisation aspire à minimiser les dommages environnementaux du projet de dérivation sur l'Oubangui et sur le lac Tchad. Mais aux yeux des certains développeurs, l'EIE apparaît comme un frein au progrès.

2- Vers la mise en place d'un Plan de Gestion Environnemental et Social du projet

L'EIE est un outil idéal pour la planification et la gestion d'un projet d'aménagement, en l'occurrence, le projet du transfert d'eau interbassin. Enfin, c'est un outil d'aide à la décision. La connaissance des impacts prévisibles directs et indirects du projet *PTEIB* permet de définir un Plan de Gestion Environnemental et Social dudit projet. Ce *PGES* aura pour avantage de mettre en évidence les mesures d'atténuations efficaces des effets qui résulteront de la mise en œuvre des activités du *PTEIB*. Il s'agit d'un schéma d'engagement socio-environnemental du projet dans lequel sera inclus quelques mesures atténuantes dont :

✓ *Les mesures pour limiter la sédimentation de la retenue :*

Les grands barrages sont réputés pour être des « pièges à sédiments » exogènes et également endogènes. Partout ailleurs, des dispositifs sont mis en place ou sont en

phases d'expérimentation pour limiter au maximum la sédimentation dans des lacs de barrages. Les Japonais ont développé le système de « *Bypass tunnels* », qui, de point de vue écologique, est un moyen efficace pour contrer la sédimentation des réservoirs. Ce système fonctionne par contournement du barrage via un tunnel de dérivation pour acheminer les sédiments en aval. Très récemment, une conférence internationale intitulée « *Sediment Bypass Tunnels* » vient de regrouper les différents acteurs à Kyoto (Japon) pour échanger sur ce dispositif novateur. Le système n'est pas encore totalement démocratisé, car sa mise en place nécessite d'énormes moyens techniques et financiers ; cependant, il existe d'autres systèmes à moyens coûts permettant de réduire la sédimentation des réservoirs, le cas des *passes à sédiments*. L'ouvrage peut également être équipé d'un dispositif de curage pour prélever régulièrement les sédiments dans la retenue pour les réinjecter en aval de l'ouvrage afin d'assurer la continuité sédimentaire et de garantir la capacité du stockage de la retenue. Le curage est un dispositif classique testé sur plusieurs hydrosystèmes fluviaux dont le *Rhône* avec de résultats concluants. Afin de limiter la sédimentation attendue dans le réservoir de Palambo, il serait nécessaire d'inclure dans le projet d'aménagement, un dispositif pour limiter la décantation des matériaux terrigènes et biogènes.

✓ ***Les mesures pour assurer le franchissement des poissons***

Contrairement au demi-barrage de *Mobaye* qui admet la circulation permanente des poissons, le méga-barrage de *Palambo* constituerait un obstacle majeur au franchissement des poissons. Une possibilité serait de mettre en place un dispositif permettant d'assurer la migration permanente des poissons en toute saison. Plusieurs dispositifs sont disponibles en fonction du type de barrages, dans le cas du barrage de Palambo, on peut privilégier les passes internes (*écluses à poissons, ascenseurs à poissons etc.*).

✓ ***Les mesures pour garantir la navigation sur le haut-Oubangui***

L'un des objectifs de l'aménagement hydraulique de Palambo est de réguler le débit de l'Oubangui pour promouvoir la navigation fluviale en aval, principalement sur le bief *Bangui-Brazzaville*. Cependant, la liaison amont-aval ne serait plus possible à cause du barrage de Palambo qui obstruerait totalement la largeur de l'Oubangui. Une possibilité vraisemblable à cet effet est d'équiper le barrage avec une série d'écluses

qui pourrait favoriser la remontée et la descente de Palambo par des bateaux ou des pirogues traditionnelles.

✓ ***Les mesures pour garantir la longévité du barrage***

Toute la structure du barrage doit faire l'objet de réglementation et d'auscultation afin de garantir la fiabilité de l'ouvrage. *L'auscultation d'un ouvrage géotechnique vise la surveillance du comportement de l'ouvrage afin de détecter et de signaler toute anomalie, de quelque nature qu'elle soit, susceptible de compromettre sa stabilité ou l'une de ses fonctions à court, moyen ou long terme.* Dans le cas de grands ouvrages hydrauliques, notamment des barrages-réservoirs, l'auscultation vise principalement à diagnostiquer les pathologies susceptibles d'occasionner leurs ruptures, car les ruptures de barrages sont très rares mais sont toujours considérés comme un risque majeur dans le domaine de la géotechnique.

Le méga-barrage de Palambo serait aménagé à 60 km en amont de la ville de *Bangui*, ce qui exposerait la capitale Centrafricaine à l'aléa de rupture de barrage. C'est pourquoi nous proposons aux promoteurs du projet d'équiper l'ouvrage d'un bon dispositif d'auscultation qui permettrait d'éviter toute une catastrophe dans l'agglomération Banguissoise qui compte plus d'un million et demi d'habitants. En plus du dispositif d'auscultation, le barrage devrait aussi être équipé d'une série de stations hydrométéorologiques permettant de mieux gérer les ressources en eau de l'Oubangui dans un contexte actuel de changements globaux.

✓ ***Intégration de la dimension sociale dans l'élaboration du projet de Palambo***

Une bonne démocratie s'accompagne toujours de la participation citoyenne aux prises de décisions nationales. Nous sommes au regret de constater que les riverains de l'Oubangui n'ont jamais été consultés dans l'élaboration de ce projet de transfert d'eau interbassin. Il convient de signaler que ce projet controversé a toujours suscité de vives oppositions entre ingénieurs et chercheurs, entre scientifiques et politiques, entre bailleurs et ONG de défenses environnementales. Nous insistons sur le fait que les promoteurs puissent intégrer l'avis des riverains de l'Oubangui et du lac Tchad dans l'élaboration finale du projet, car le manque de participation locale dans la prise de décision de cet aménagement entraînerait de sérieux dommages socio-environnementaux. Selon la WCD, la plus grande controverse suscitée par les barrages concerne les opérations de déplacement forcé et la relocalisation des populations. Les

répercussions sociales négatives sont souvent mal évaluées, à commencer par le nombre même de personnes à déplacer. Les indemnités ont en général été insuffisantes, on rapporte aussi des cas de non-respect des engagements pris dans le cadre des opérations d'indemnisation. Il est aussi indispensable de sensibiliser les riverains de l'Oubangui aux effets socio-environnementaux du projet afin que ceux-ci se préparent au mieux à des stratégies d'adaptations. Les mesures compensatoires doivent aussi être au niveau des attentes locales. Des fonds pour les impacts résiduels du projet devraient être prévus afin de compenser les effets sociaux qui subsistent après l'aménagement.

Conclusion du troisième chapitre

Des actions envisageables en matière de gestions et d'aménagements ont été proposées sur les barrages de Mobaye, de Boali et de Palambo.

À Mobaye, nous avons recommandé la réhabilitation des stations hydrométéorologiques qui ne sont plus fonctionnelles depuis 1993. L'arrêt d'observation de ces stations constitue de véritables difficultés pour les travaux de recherches sur la problématique des effets du demi-barrage sur l'hydrologie de l'Oubangui. Nous proposons d'approfondir les recherches actuelles sur l'impact spatial du demi-barrage sur le processus hydrosédimentaire de l'Oubangui. Pour autant, nous recommandons une étude d'impact de l'extraction des sables sur le bilan sédimentaire de l'Oubangui à Bangui. Afin de pérenniser la pêche, nous avons proposé la pratique d'une pêche saisonnière calquée sur le modèle du Delta Intérieur du Niger. Nous avons également proposé la mise en place d'un plan d'aménagement et de gestion local des ressources en eau de l'Oubangui entre les deux Etats riverains de l'Oubangui à Mobaye.

A Boali, nous proposons la restauration des dispositifs d'auscultation afin de mieux surveiller le comportement du barrage pour minimiser d'éventuels risques de rupture. Des propositions en matière de limitation de l'envasement du lac de barrage ont été également faites.

A Palambo, nous avons insisté sur la réalisation d'une étude d'impact environnemental avant la mise en œuvre du projet. Un Plan de Gestion Environnemental et Social du barrage devrait être inclus dans les Termes de références du projet. Cela permettrait de minimiser les effets socio-environnementaux du projet et d'optimiser les bénéfices escomptés.

Conclusion partielle

Cette troisième et dernière partie aborde principalement la problématique du transfert d'eau interbassin. Deux sites ont été proposés à cet effet : le site de Palambo sur l'Oubangui et le site de Bria sur la Kotto. A Palambo, le projet prévoit d'ériger un barrage-réservoir permettant de dériver l'Oubangui vers le lac Tchad via les rivières Tomi, Fafa, Ouham et Chari. Les études de faisabilités ont souligné de nombreux avantages escomptés du projet, entre autres, la préservation de l'écosystème du lac Tchad, la production d'énergie hydroélectrique, la promotion de la sécurité en Afrique subsaharienne, la promotion de l'intégration économique régionale à travers le développement des infrastructures de transports routiers et fluviaux, la lutte contre la saharanisation du bassin du Congo. En revanche, il n'existe pratiquement pas d'études d'impact environnemental du projet sur l'Oubangui. En fonction des recueils d'expérience du barrage-réservoir de Boali sur la rivière Mbali, nous avons prospecté les effets environnementaux potentiels du barrage planifié à Palambo sur l'Oubangui. Les résultats mettent en évidence l'influence significative du barrage sur la dynamique fluviale. Le barrage de Palambo altérerait en effet le régime d'écoulement de l'Oubangui. Un régime artificiel sous contrôle des « lâchers d'eau » se substituerait au régime naturel. De ce fait, la rivière connaîtrait moins d'avulsion en aval. Les activités humaines liées à l'eau, notamment la pêche et l'extraction de sable, seraient également impactées. De même, une rupture dans le continuum fluvial serait observée dès la fermeture du barrage. À l'échelle interbassin, l'écosystème des rivières Tomi, Fafa, Ouham et Chari seraient affectées par les travaux de la dérivation. Des perspectives d'aménagements et de gestions durables ont été proposées afin de minimiser les impacts potentiels du projet.

En définitive, les avantages et inconvénients de cet aménagement nous ont permis de conclure que ce projet est sans doute indispensable pour promouvoir le développement de l'Afrique Centrale, toutefois il constitue une sérieuse menace pour les riverains de l'Oubangui dont les moyens de subsistances actuelles sont très fonction du régime hydrologique. Ce projet serait réalisable dans l'avenir lorsque tous les peuples de l'Afrique Centrale sont prêts à abandonner leurs pratiques traditionnelles pour s'ouvrir totalement à la mondialisation. Mais à l'heure actuelle, ce projet reste utopique dans la mesure où l'Afrique Centrale demeure encore le théâtre des conflits inter-religieux, inter-ethnique, interétatiques, voué à un grand échec.

Conclusion *Générale*

L'intérêt de la thèse

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à évaluer les effets des barrages sur le bassin de l'Oubangui. Notre hypothèse principale avancée au départ est que : « *la présence des barrages (existants ou projetés) sur l'Oubangui, comme la présence de tous ouvrages hydrauliques en rivière, altère significativement le régime d'écoulement* ». Il convient d'abord de mentionner que le bassin de l'Oubangui, avec ses 643 900 Km², est l'un des bassins tropicaux les moins aménagés du globe malgré un potentiel hydroélectrique non exhaustif estimé à plus de 2 000 MW. L'essentiel de l'énergie produite par les installations en place est consommé dans la ville de Bangui, la capitale politique de Centrafrique. Le reste du territoire se contente de l'énergie traditionnelle (ex : la biomasse). La principale source d'énergie produite sur le bassin de l'Oubangui demeure l'hydroélectricité ; celle-ci est produite depuis les sites de Mobaye et de Boali. En plus du potentiel hydroélectrique, le bassin regorge d'autres potentialités énergétiques qui ne sont pas encore mises en valeur. C'est le cas de l'énergie solaire, l'uranium, et des énergies fossiles comme le pétrole et le lignite. De nombreux sites ont déjà fait l'objet d'études de faisabilité techniques afin de mettre en valeur leurs potentialités énergétiques. En revanche, la dimension environnementale n'a jamais été prise en compte dans ces études préliminaires. De plus, le bassin de l'Oubangui est mal observé depuis l'arrêt des missions scientifiques de l'IRD (ex ORSTOM) en Centrafrique à cause des instabilités politico-sociales récurrentes. Le bassin de l'Oubangui est sans doute moins favorable à la réalisation des recherches scientifiques et pourtant sa connaissance est nécessaire à la prise en compte des variabilités hydrologiques sur le bassin du Congo, deuxième plus grand bassin fluvial et forestier au monde après le bassin Amazonien. En effet, l'Oubangui est l'un des deux affluents majeurs du fleuve Congo. Il est de loin la rivière la plus instable de tous les cours d'eau du bassin du Congo, mais sa dynamique fluviale est peu connue. L'intérêt que porte cette thèse est double : premièrement il s'agit de déterminer les enjeux environnementaux sur l'Oubangui car ce bassin a fait très peu l'objet de recherches appliquées au cours de ces dernières décennies ; et deuxièmement, il s'agit d'évaluer l'influence des aménagements hydrauliques sur le bassin de l'Oubangui. La méthodologie globale utilisée pour atteindre ces objectifs est présentée comme suit :

Etape 1 – Acquisition des données :

Nous avons opéré au diagnostic hydrologique de nos sites d'études afin de recueillir des données hydrométéorologiques (débit, pluviométrie, température, cote de retenue ...), sédimentologiques (MES et charge de fond ...), physico-chimiques (PH, Conductivité, Oxygène dissous ...), morphologiques (photographies aériennes, images satellitales, Carte topographique de l'IGN ...), topo-bathymétriques (profils en travers, profondeur du chenal ...). Des enquêtes de terrain sur questionnaire ont aussi complété nos diagnostics.

Etape 2 – Traitement des données :

Les données recueillies ont été analysées dans divers laboratoires (Laboratoire CEDETE, LHL, LACCEG, LNBTP...). Les données de débits par exemple ont été traitées sur le logiciel Khronostat de l'IRD, les photographies aériennes ont été photo-interprétées sur SIG (ArcGIS 10.2), et les Images satellitales classifiées sur ENVI 5. Les données traitées ont été interprétées selon les normes en vigueur. Les résultats obtenus au moyen de ces analyses ont permis de mettre en évidence les enjeux environnementaux contemporains sur le bassin de l'Oubangui, et d'évaluer les effets des barrages (existants et projetés) sur ce bassin.

1) Les enjeux environnementaux contemporains sur le bassin de l'Oubangui

La dynamique fluviale de l'Oubangui et de ses affluents n'est connue que dans le passé à travers les travaux remarquables des hydrologues de l'IRD. Cependant, la dynamique hydrologique récente de l'Oubangui a fait l'objet de très peu de travaux scientifiques permettant d'appréhender les enjeux environnementaux actuels sur le bassin. Les résultats de nos recherches soulignent deux enjeux majeurs dans le fonctionnement hydrologique récent de l'Oubangui, les enjeux liés aux changements climatiques et les enjeux liés aux aménagements fluviaux.

a) Les enjeux liés aux changements climatiques

Le bassin de l'Oubangui est entré dans une phase sèche depuis 1970 entraînant un déficit d'écoulement de 30% à la station hydrométrique de Bangui. L'ensablement et le recul de la navigabilité sur l'Oubangui sont associés à ce déficit d'écoulement. Le haut-Oubangui n'est plus navigable de nos jours. Seul le bas-Oubangui et une partie du moyen-Oubangui sont navigables en saison de hautes eaux après une série de dragages effectuée par les voies navigables. Le dragage permet d'approfondir les passes navigables à l'endroit des seuils sableux pour disposer d'un tirant d'eau supérieur ou égal à 0,90 m. Au site de Bangui, le trop-plein des sables est extrait de manière artisanale pour être commercialisé. L'impact de cette activité sur le bilan sédimentaire de l'Oubangui n'est cependant pas encore étudié.

b) Les enjeux liés aux aménagements fluviaux

Le potentiel hydroélectrique non exhaustif de l'Oubangui est estimé à plus de 2 000 MW, mais celui-ci est quasiment inexploitable. Le bassin fait face à une croissance urbaine sans précédent depuis la période de décolonisation. Un enjeu important pour les développeurs est de mettre en valeur les potentialités hydrauliques de l'Oubangui à travers la construction des barrages-réservoirs pour produire de l'hydroélectricité. Considérée comme une source d'énergie propre et renouvelable, l'hydroélectricité est de plus en plus décriée pour son impact écologique en rivière. On reproche de nos jours aux barrages hydroélectriques de réduire principalement la richesse écologique des cours d'eau et de provoquer le déplacement des populations autochtones. Les barrages en rivière sont considérés comme des obstacles majeurs à la continuité hydrosédimentaire et biologique des rivières court-circuitées. Par ailleurs, il a été démontré que les effets des barrages en rivière dépendent grandement de la particularité de chaque barrage, c'est-à-dire de leur taille, de leur type et de leur mode de gestion en rivière. Deux barrages hydroélectriques sont aménagés sur le bassin de l'Oubangui : le barrage de Mobaye et celui de Boali. D'autres barrages sont planifiés sur l'Oubangui à l'image du barrage de Palambo. Des études de cas ont été réalisées dans le cadre de cette thèse en vue d'évaluer l'impact de chacun de ces barrages sur notre bassin d'étude. Les résultats sont présentés succinctement dans les trois pages suivantes.

2) Les impacts des barrages de l'Oubangui

Trois types de barrages ont été évalués sur l'Oubangui. D'abord un petit barrage dans la localité de Mobaye, puis un barrage classique équipé d'un lac artificiel dans la localité de Boali, et enfin un méga-barrage qui est planifié à Palambo dans le cadre d'un projet de dérivation d'eau.

a) À l'échelle du barrage de Mobaye :

Les résultats obtenus permettent de souligner l'influence du barrage sur la morphologie fluviale locale de l'Oubangui. L'établissement de l'ouvrage en travers en 1989 s'est accompagné d'un certain changement dans la géométrie hydraulique de l'Oubangui à l'endroit de Mobaye. Deux niveaux de changements sont à distinguer :

- ✓ un changement en amont : celui-ci est induit par la formation de la retenue d'eau, cela résulte de l'élargissement du chenal par la retenue créée par le barrage. De ce fait, la submersion s'est faite par l'inondation des terres résidentielles et agricoles situées sur les plaines inondables de l'Oubangui. Les populations victimes sont délocalisées et indemnisées à la suite de la submersion de leurs terres. Certaines d'entre elles se sont reconverties en pêcheurs ou en commerçants.
- ✓ Un autre changement en aval : ce changement est induit par une érosion progressive observée en aval immédiat du barrage, cela se traduit par un déficit en surface sédimentaire et une rétraction légère de la largeur du chenal. La stabilité pluviométrique observée dès la décennie 1990 a aussi contribué au processus érosif enregistré en aval immédiat du barrage.

En revanche, le barrage de Mobaye ne modifie pas significativement le régime hydrologique de l'Oubangui, car l'hypothèse d'une rupture dans la distribution interannuelle du débit (Q_{ma} , Q_{max} et Q_{min}) a été retournée nulle. Le barrage de Mobaye semble être au premier abord un ouvrage hydraulique « transparent », celui-ci n'influence quasiment pas sur le continuum fluvial de l'Oubangui. Sa structure hydraulique en « demi-lit » lui permet d'assurer la continuité hydrosédimentaire en toute saison. Toutefois, ces résultats méritent d'être critiqués au regard de la qualité des données hydrologiques et morphologiques utilisées. L'absence de cassure dans la distribution interannuelle des débits ne signifie pas que le demi-barrage est totalement transparent.

Nous avons observé un décalage temporel dans le calendrier hydrologique de l'Oubangui après sa régulation à Mobaye. Avant l'établissement du barrage, l'année hydrologique correspond à la période *avril-mars* et le pic de crues correspond au mois d'*octobre*, mais depuis la mise en eau du barrage, l'année hydrologique migre progressivement entre *mai-avril* avec un pic de crues qui migre lui aussi vers le mois de *novembre*.

Au-delà de l'Oubangui, le fait nouveau de la thèse est que nos résultats nous permettent de démontrer que tous les petits barrages, en l'occurrence, les demi-barrages, ne constituent pas forcément un obstacle majeur au continuum fluvial. Un demi-barrage altère plus ou moins la géométrie hydraulique locale d'une rivière, mais celui-ci admet une certaine transparence dans l'écoulement et dans le transit sédimentaire.

b) À l'échelle du barrage de Boali :

À Boali, nos résultats mettent en évidence l'impact du barrage sur la dynamique hydrologique de la rivière Mbali. L'établissement du barrage a entraîné des changements dans l'occupation du sol. La surface forestière a diminué de 15% à cause du déboisement et de dégradation du versant de la Mbali. Le versant est désormais exposé au ruissellement et aux aléas d'érosions. Les matériaux drainés sur le versant vont se décanter dans le lac de barrage contribuant à son envasement. Ces sédiments exogènes se sont mélangés avec des sédiments endogènes pour compromettre la capacité de stockage du lac de barrage. Les sédiments endogènes sont issus de la minéralisation des matières organiques piégés lors de l'ennoisement du milieu. Le taux de décantation dans ce réservoir de 250 millions de mètres cube est estimé à 0,8 cm/an. L'accumulation sédimentaire dans le réservoir induit en aval du barrage une carence sédimentaire ainsi qu'une perte d'habitat. La rivière Mbali ne coule désormais que sur sa roche mère.

En outre, une variation d'écoulement est enregistrée en aval à cause des pulsations de la vanne du barrage. Une migration légère semble s'effectuer dans le calendrier hydrologique de la rivière Mbali après sa régulation. L'établissement du barrage de Boali cloisonne aussi le tronçon fluvial de la Mbali. A ce titre, un habitat lacustre s'est établi dans le réservoir se substituant à l'habitat fluvial, cela a engendré l'invasion de nouvelles espèces de poissons, en l'occurrence, le tilapia. Les crocodiles ont également élu domicile dans ce nouveau faciès lentique. Sur le plan sociétal, le barrage a contribué positivement au développement de la

commune de Boali qui, jadis était totalement rural. La pêche dans le lac de barrage est une activité très prometteuse et emploie de nombreux autochtones y compris les éleveurs peuhls.

Ce travail de recherche à hauteur de Boali fait figure de pionnier car il est le premier à apporter quelques éléments de réponses à la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Mbali à travers un diagnostic hydro-limnologique du complexe hydraulique de Boali.

c) À l'échelle du barrage projeté à Palambo :

À Palambo, nos prospections nous ont permis de prédire les impacts du projet sur l'hydrologie du bassin de l'Oubangui. Cette mégastructure pourrait entraîner localement des variations dans l'écosystème aquatique de la commune de Boali. La forêt dense tropicale perdrait une partie de sa surface végétale, cela exposerait le versant au ruissellement et à l'érosion. Les matériaux érodés seront accumulés dans la retenue contribuant à sa sédimentation. La retenue envahirait un milieu naturel et quelques villages. Des espaces agricoles seraient submergés. Les matières piégées se décomposeraient pour se décanter dans la retenue. Les espèces locales semi-rhéophiles (ex : les Lates, les Mormyrus, les Distichodus) vont se décliner au profit des espèces limnophiles affectant les eaux calmes. L'ouvrage en travers formerait une barrière au continuum fluvial de l'Oubangui. Les effets sur les flux hydriques de cette barrière concerneraient les variations du régime hydrologique. Un « régime artificiel », sous la commande des lâchers d'eau des vannes du barrage, se substituerait au « régime naturel » contrôlé par la pluviométrie. L'artificialisation du régime d'écoulement de l'Oubangui aura des effets sur l'écosystème aquatique et sur les activités humaines (ex : pêche, agriculture, extraction de granulats ...). En aval, la rivière connaîtrait moins de mobilité latérale, ce qui sera conséquent pour le cycle vital des communautés riveraines. Sur les flux sédimentaires, les effets du barrage se traduiraient par une rupture dans le transport solide, réduisant la fourniture sédimentaire à la confluence avec le fleuve Congo. De même, les activités humaines, notamment l'extraction des granulats à Bangui seraient impactées. L'habitat des espèces psammophiles telles que l'hirondelle serait aussi impacté.

Rappelons que l'un des objectifs principaux de cet aménagement concerne le transfert d'eau vers le lac Tchad via les rivières *Tomi*, *Fafa*, *Ouham* et *Chari*. Ce transfert modifierait la dynamique fluviale de ces rivières, en l'occurrence, la Tomi qui servira de canal de dérivation. La dérivation de l'Oubangui vers le lac Tchad entraînerait une

modification physique dans le réseau hydrographique du bassin de l'Oubangui et de celui du lac Tchad.

Ce qui apparaît comme nouveauté dans notre recherche à Palambo est le fait que ce travail est le premier à s'intéresser sur les enjeux du projet de transfert d'eau interbassin à l'échelle de l'Oubangui, car la plupart des travaux abordant cette problématique traitent exclusivement l'étude d'impact dudit projet sur le lac Tchad. La rivière Oubangui est moins étudiée dans le cadre de ce transfert d'eau, or c'est l'Oubangui qui sera régulée pour cette fin de dérivation. En outre, l'Oubangui est une rivière nourricière pour ces riverains et le support de plusieurs activités pour les peuples Ngbandi. De surcroît, l'Oubangui est l'un des deux gros contributeurs du fleuve Congo, qui est le second fleuve au monde après le fleuve Amazone en termes de puissance fluviale.

Perspectives générales

Ce travail de thèse ouvre un certain nombre de perspectives de travail, dans le but notamment d'affiner les résultats obtenus au cours de ces quatre années de recherches. En effet, le bassin de l'Oubangui présente de nombreuses contraintes en matière de recherches scientifiques et pourtant, il est l'un des premiers à être observé en Afrique. Malgré les difficultés rencontrées, nos recherches ont abouti à des résultats encourageants. Nous avons étudié de manière inédite les « enjeux environnementaux » de tous les barrages hydrauliques sur le bassin de l'Oubangui. L'étude inclut les barrages fonctionnels, en particulier le barrage de Mobaye et le barrage de Boali, et les barrages projetés (le cas du barrage de Palambo). À l'image de tous les travaux de recherches scientifiques, les résultats de cette recherche comportent des imperfections, mais offrent néanmoins la possibilité de comprendre les effets du barrage de Mobaye sur la rivière Oubangui, du barrage de Boali sur la rivière Mbali, et du futur barrage de Palambo sur la rivière Oubangui. Ces résultats ouvrent d'immenses voies à d'autres recherches sur l'hydrologie de l'Oubangui, notamment sur les effets d'anthropisations de l'Oubangui et ses affluents.

En termes de perspectives générales pour cette recherche, nous proposons d'affiner nos résultats obtenus lors des recherches ultérieures, mais cela nécessite préalablement de réhabiliter certains réseaux d'observations hydrométéorologiques sur le bassin de

l'Oubangui. Un protocole de suivi hydrosédimentaire pourrait également être mis en place à l'échelle de Mobaye et de Boali afin de suivre, de quantifier et de modéliser avec précision, les flux hydrosédimentaires en amont-aval de ces barrages. L'apport récent des Drones hydrauliques, des ULM, des ADCPro, des Pitt-Tags en hydrologie a permis une avancée spectaculaire dans l'observation des rivières. Le déploiement de quelques-uns de ces matériels contribuerait à avancer les recherches sur le bassin de l'Oubangui.

En termes de vulgarisation, nous proposons en outre de faire des expéditions sur l'Oubangui qui pourraient déboucher sur la réalisation d'un atlas, d'un ouvrage et d'un colloque national voire international etc.

Références

Bibliographiques

ARTICLES ET OUVRAGES SCIENTIFIQUES

Aigouy S., Anthiniac P., Couturier B., & al. (2010) – *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*, Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR). Revue Française de Géotechnique, Vol 3 2011, N°136. 264 p.

Alber A., Braud S. (2013) – *Synthèses des connaissances & proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau*. DREAL Centre, 76 p.

Alcayaga H. (2013) – *Impacts morphologiques des aménagements hydroélectriques à l'échelle du bassin versant*. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble. 155 p.

Al Amrawy M., & Ballais J-L. (2014) – *Les risques naturels dans le gouvernorat d'Assouan (Égypte) : le rôle du Haut Barrage* », Physio-Géo, Volume 8 | -1, 121-148.

Aldomany M. (2017) - *L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin)*. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. 333 p.

Amat J-P., Dorize L., Le Cœur C. (1996) – *Eléments de Géographie Physique*. Collection Grand Amphi. Ed. Bréal. 416 p.

Amoussou E., Camberlin P., & Mahé G., (2012) – *Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique)*. Hydrological Sciences Journal, 57 (2), 1–13.

Amoros C & Petts G. (1993) – *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Paris, 300 p.

Ancey C. (2014) – *Risques Hydrologiques et Aménagement du Territoire*. Notes de cours. LHE, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Anctil F. & Coulibaly P. (2004) – *Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow*. J. Clim., 17, 163-173. URL : [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2)

Anger B. (2014) – *Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière*, Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie. 604 p.

Ardoin-Bardin S. (2004) – *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier 2. 440 p.

Arnaud F. (2012) – *Approches géomorphologiques historiques et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne)*, Thèse de Doctorat de l'Université de Lumière Lyon 2. 280 p.

Arnold, J.G. (1998) – *Large area hydrologic modelling and assessment part I: model development*. Journal of the American Water Resources Association, 34(1): 73–89.

Arnold J.G. Kiniri J.R Srinivasan R. & al. (2012) – *Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation*. Version 2012. 650 p. Url : <https://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>

Assani A., Gravel E., Buffin-Bélanger & al. (2005) – *Impacts of dams on the annual minimum discharges according to artificialised hydrologic regimes in Quebec (Canada)*. Revue des Sciences de l'eau. 18/1(2005) 103-127.

Assani A., Lajoie F., & Laliberté C. (2007) – *Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec*. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 20, n° 1, 2007, p. 127-146. URI: <http://id.erudit.org/iderudit/015741ar> DOI: 10.7202/015741ar.

Aubaile-Sallenave F. (2014) – *La mousson, pluie des agriculteurs et vent des marins*. Revue d'ethnoécologie. URL : <http://journals.openedition.org/ethnoecologie/1834> ; DOI : 10.4000/ethnoecologie.1834.

Aubry L. (2012) – *Analyse des impacts du barrage de Rawdon sur l'évolution Hydro-morphologique de la rivière Ouareau*, Mémoire de Master de l'Université de Québec, Canada. 66 p.

Ayeb H. (2001) – *L'Égypte et le barrage d'Assouan. Que serait l'Égypte sans ce très grand barrage ?* Revue : Hérodote, 2001/4 (N°103), p. 137-151. DOI : 10.3917/her.103.0137. URL : <https://www.cairn.info/revue-herodote-2001-4-page-137.htm>

Bacchi V. (2011) – *Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles*, Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble. 209 p.

Barraud R. & Germaine M-A. (2017) – *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau. Controverses et représentations*. Eds. QUAE. Collection : Update Sciences & Technologies. 240 p.

Bartout P. (2006) – *Pour un référentiel des zones humides intérieures de milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France)*. Typologies-Régionalisation. Thèse de doctorat de l'Université de Limoges. 500 p.

Bartout. P., (2012) – *Les étangs du Limousin : des zones humides face au développement durable*. Ed. Les Monédières. 294 p.

Bartout P. (2015) – *LES TERRITOIRES LIMNIQUES. Nouveau concept limnologique pour une gestion géographique des milieux lenticques*. HDR de l'Université d'Orléans. 444 p.

- Bartout P. & Touchart L. (2016)** – *La notion de limnité est-elle suffisante pour caractériser l’empreinte spatiale et sociétale des plans d’eau ?* Revue géographique de l’Est, vol.56, n°1-2. URL : <http://rge.revues.org/5766>
- Basson M.S. (1994)** – *Probabilistic Management of Water Resource and Hydropower Systems, Highlands Ranch (Colo., USA)*. Water Resources Publications, 424 p.
- Bazin M. & Gascon A. (2015)** – « *Grands barrages et frontières dans les pays du Sud* », Bulletin de l’association de géographes français, 92-2 | 2015, mis en ligne le 22 janvier 2018, consulté le 09 juillet 2018. URL : <http://journals.openedition.org/bagf/540>
- Beck T. & Corbonnois J. (2016)** – *Analyse du temps de résilience d’un cours d’eau à moyenne énergie (la Moselle amont) suite aux importantes altérations anthropiques de la deuxième moitié du vingtième siècle*. BSGlg, 67, 2016, 195-208.
- Bethemont J. (2000)** – *Les grands fleuves : Entre Nature et Société*, Armand Colin, 255 p.
- Béto R. (2012)** – *Utilité de la télédétection et le SIG aux enjeux environnementaux induits par la construction du barrage hydroélectrique: cas de la M’Bali*. Mémoire d’études de Master 2 au Maroc. 88 p.
- Belleudy P. & Philippe Lefort P. (2001)** – *La continuité sédimentaire et sa rupture*. Revue : La Houille Blanche. N° 8, 2001.
- Bioteau T., & al. (2002)** – *Evaluation des risques de pollution diffuse par l’azote d’origine agricole à l’échelle de bassins versants : intérêts d’une approche par modélisation avec SWAT*. Ingénieries - E A T, IRSTEA édition 2002, p. 3 - p. 12. <hal-00465486>.
- Blanchon D. (2006)** – *Marchés de l’eau et hiérarchies territoriales en Afrique de Sud In : La mondialisation côté Sud : Acteurs et territoires*. IRD Éditions, Marseille. <http://books.openedition.org/irdeditions/6721>. DOI : 10.4000/books.irdeditions.6721.
- Blanchon D. (2006)** – *La politique de l’eau en Afrique du Sud : le difficile équilibre entre développement durable et valorisation optimale de la ressource*. Revue : Développement durable et territoires ; Dossier 6 | 2006, URL : <http://developpementdurable.revues.org/1735> ; DOI : 10.4000/developpementdurable.1735.
- Blanchon D. (2008)** – *Le complexe hydropolitique sud-africain : connexions, déconnexions, reconnexions ?* (n°71), p. 61-72. URL: www.cairn.info/revue-flux-2008-1-page-61.htm.
- Boulvert Y. (1987)** – *Carte Oro-hydrographique de la République Centrafricaine au 1/1000 000*. Collection notice explicative N° 106, Ed. ORSTOM. Paris 1987. 124 p.
- Boulvert. Y., (1990)** – *Avancée ou recul de la forêt centrafricaine Changements climatiques, influence de l’homme notamment des feux*. In Paysages Quaternaires de l’Afrique Centrale Atlantique. Ed. ORSTOM.

Bouquiaux L. & Thomas J.M. (1977) – *Le peuplement Oubanguien hypothèse de reconstruction des mouvements migratoires dans la région oubanguienne d'après des données linguistiques, ethno-linguistiques et de tradition orale dans L'expansion bantoue*, Viviers 4-16 avril 1977, Paris, vol. III, SELAF, 1980, p. 807-824.

Boun-Heng M., (2013) – *La sédimentation dans les lacs de barrage à Java, Indonésie processus, rythmes et impacts*. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 301 p.

Boyeldieu P. & Diki-Kidiri M. (1982) – *Domaine Ngbandi*, SELAF, Paris, 105 p.

Boyeldieu P. (2011) – *Les langues nilo-sahariennes*. PUF, pp 185-190.

Brandt S. (2000a) – *Classification of geomorphological effects downstream of dams*. Catena Volume 40, Issue 4, August 2000, pp 375-401. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00093-X)

Brandt S. (2000b) – *Prediction of downstream geomorphological changes after dam construction: a stream power approach*. Water Resources Development, 16 (3) :343-367.

Bravard J-P. (1986) – *La Basse vallée de l'Ain : Dynamique fluviale appliquée à l'écologie*. 27 p.

Bravard J-P (1990) – *Observations nouvelles sur la Dynamique Fluviale et l'alluvionnement de la Saône à l'Holocène, entre Villefranche et Anse (Rhône)*. In: Revue Géographique de l'Est, tome 30, n°1,1990. Géoarchéologie des paysages : Genèse des fonds de vallées de l'Est de la France (Géomorphologie. Quatenaire) pp. 57-76; doi : 10.3406/rgest.1990.2181. URL : http://www.persee.fr/doc/rgest_0035-3213_1990_num_30_1_2181

Bravard J-P. (1991) – *La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux: Quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ?* La houille blanche/N° 7/8-1991. pp. 515-522. URL: <https://doi.org/10.1051/lhb/1991047>

Bravard J-P., Petts. G., (1993) – *Interférences avec les interventions humaines*. In : Hydrosystèmes fluviaux. Masson, pp 233 - 253.

Bravard J-P & Petit F. (1997) – *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial*, ed. Armand Colin, Collection U, Paris 222 p.

Bravard J-P. (2016) – *Aménagement hydroélectrique et continuité de la charge de fond : contribution à une mise en perspective historique dans des bassins alpins affluents du Rhône*. BSGlg, 67, 2016, 181-194.

Brown H.I. (1996) – *The methodological roles of theory in sciences*. In: Rhoads B.L. & C.E. Thorn [eds.], Proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology, 27-29 September 1996, 3-20.

Brune G.M. (1953) – *Trap efficiency of reservoirs*. Transactions of the American Geophysical Union.34 (3) : 407-418.

Cailleux A. (1954) – *Limites dimensionnelles des noms des fractions granulométriques*. Bull. Soc Géol. Fr, 4, 643-646. DOI: 10.2113/gssgfbull.S6-IV.7-9.643. Published on January 1954, First Published on January 01, 1954.

Callede J., Boulvert Y., & Thiebaut J-P. (2010) – *LE BASSIN DE L'OUBANGUI : Monographie hydrologique*. Ed. IRD. 310 p.

Carmouze J.-P., Durand J.-R. & Lévêque C., (1983) – *Lake Chad, Ecology and Productivity of a Shallow Tropical Ecosystem*. The Hague, Dr W. Junk, Monographiae Biologicae vol. 53, 575 p.

Carling P.A. (1988) – *Channel change and sediment transport in regulated UK rivers*. *Regulated Rivers: Res. Manage.* 2, 369–387

Carlini M., (2006) – *Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : Le cas des étangs-lacs en Limousin*, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 362 p.

Carozza J.-M. & Puig C. (2014) – *Les changements de tracés des cours d'eau d'après les sources historiques et géomorphologiques dans la plaine du Roussillon entre le 12^{ème} et le 15^{ème} siècle*. Table ronde : archéologie et histoire Romaine. Eds. Monique Mergoïl, pp 297-312, 2012.

Censier C. (1993) – *Mise en place et évolution du réseau hydrographique de la partie septentrionale du bassin du Congo*. In : Colloque grands bassins fluviaux péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone. ORSTOM. Paris.

Censier C. (1995) – *Caractérisation de processus d'érosion régressive par analyse sédimentologique comparée des sables du chenal et des barres du cours inférieur de l'Oubangui*. Actes de la conférence de Paris, mai 1995. IAHS Publ. no. 238, 1996. Ed. IRD. 15 P. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010009816.pdf

Chapuis M. (2012) – *Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés: éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille. 253 p.

Claude N. (2012) – *Processus et flux hydrosédimentaires en rivière sablo-graveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France)*. Thèse de Doctorat, Université de Tours. 366 p.

Chevallier P. (1996) – *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement : mélanges à la mémoire de Jean Rodier*. Wallingford : AISH, 1996, (238), 435 p. (Publication-AISH ; 238). Journées Hydrologiques de l'ORSTOM : Conférence de Paris, (FRA), 1995/05/02-04. ISBN 0-947571-99-X, ed. Pouyaud Bernard.

- Church M. (1995)** – *Geomorphic response to river flow regulation : case studies and time-scale*. Regulated Rivers : Ressources Management, 11 :3-22.
- Church M. (2002)** – *Geomorphic thresholds in riverine landscapes*. Freshwater Biology, 47 : 541-558.
- Churchill, M. (1948)** – *Discussion of "Analysis and use of reservoir sedimentation data"*. Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference. Bureau of Reclamation, US Department of the Interior, Washington, DC.
- Cimprič A. (2011)** – *Les transformations des représentations symboliques relatives à l'eau*. Revue : Cahiers d'études africaines. <http://journals.openedition.org/etudesafricaines/16884>
- Cojan I. & Renard M. (2006)** – *Sédimentologie*, 2ème édition, Dunod.
- Colliard C-A. (1996)** – in *Barrages internationaux et Coopération*. Conac F. (dir). Eds : Karthala. 384 p.
- Conac F. (dir). (1996)** – *Barrages internationaux et Coopération*. Eds : Karthala. 384 p.
- Corbonnois J., Jacquemot T., Giovannacci L., & al. (2011)** – *Les indicateurs de l'évolution actuelle des lits fluviaux. Etude de cours d'eau du Nord-Est de la France*, Revue Géographique de l'Est, URL : <http://rge.revues.org/3427>
- Cottet M. (2010)** – *La perception des bras morts fluviaux : Le paysage, un médiateur pour l'action dans le cadre de l'ingénierie de la restauration. Approche conceptuelle et méthodologique appliquée aux cas de l'Ain et du Rhône*. Thèse de doctorat de l'Université Jean Moulin Lyon 3. 361 p.
- Daïwe N. & Ngatcha B. (2018)** – *Etude de l'envasement du lac de Dang (Ngaoundere, Cameroun) et estimation des transports solides en suspension*. Revue : Pangea. Volume spécial : Géosciences & Développement. Impacts de l'homme et du climat sur les milieux sahéliens. N° 47-48, 2018.
- Damon J. (2011)** – *L'urbanisation mondiale en perspective positive*. Ed. Études, tome 414 (6), 739-749. <https://www.cairn.info/revue-etudes-2011-6-page-739.htm>.
- Dampierre E. (1967)** – *Un ancien royaume Bandia du Haut-Oubangui*. Compte-rendu par Michel Dion. Revue française de Sociologie. Volume 9, Numéro 4 pp. 576-579.
- Decaillau. B. (2004)** – *Reliefs et tectonique récente*, Vuibert, 262 p.
- Degoutte G. (1997)** – *Petits barrages. Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. CFBG. CEMAGREF Edition, 179 p.
- Degoutte G. (2004)** – *Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre*, Collection Ouvrages pédagogiques, Edition ENGREF.

- Degoutte G. (2006)** – *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Ed. Tec et Doc - Lavoisier, 394 P.
- Degoutte G. (2012)** – *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières (2^o Éd.) : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées*. Ed. Tec et Doc - Lavoisier, 542 p.
- Delus C-L. (2011)** – *Hydrosystèmes et enjeux de gestion*, Revue Géographique de l'Est, vol. 51 / 3-4 |. URL : <http://rge.revues.org/3487> <http://rge.revues.org/3487>
- Delus C-L. (2011)** – *Les étiages définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires*. Cybergeog : European Journal of Geography. URL : <http://cybergeog.revues.org/24827> ; DOI : 10.4000/cybergeog.24827.
- Demangeot J. (1999)** – *TROPICALITE : géographie physique intertropicale*. Armand Colin, 340 p.
- Demangeot J. (1945)** – *Éléments de dynamique fluviale d'après Maurice Pardé*. In: Annales de Géographie, n^o 293, Volume 54. 1945. pp.1-12. URL : http://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1945_num_54_293_12937
- Depret T. (2014)** – *Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du cher*, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 529 p.
- Dickson N.E., Carrick J-L., Brown L.E. (2012)** – *Flow regulation alters alpine river thermal regimes*. Journal of Hydrology. 464–465: 505–516.
- Doudje K., Tchindjang M. & Moupeng B. (2014)** – *Development of the bed and major Chari river bank at N'Djamena since Holocene*. Geo-Eco-Trop., 2014, 38, 1, n.s. : 75-84.
- Drapier L., Lespez L. & Germaine M-A. (2017)** – in : *Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau. Controverses et représentations*. Eds. QUAE. Collection : Update Sciences & Technologies. 240 p.
- Drissa-Soro T., Soro N., Oga M-S. & (2011)** – *La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)*, Physio-Géo, Volume 5 | -1, 55-73.
- Dubreuil P. (1974)** – *Initiation à l'analyse hydrologique*, MASSON & Cie. Paris. 226 p.
- Duchemin E., Leduc G., & Raymond M. (2003)** – *L'évaluation des impacts environnementaux : Un outil d'aide à la décision*. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/5094> en ouvrage: Ed. Multimondes. 427 p.
- Durfour S. (2005)** – *Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône)*. Thèse de Doctorat de l'Université Jean Moulin Lyon 3, 243 p.

- Dussart B. 1966** – *LIMNOLOGIE : l'étude des eaux continentales*, Paris, Ed. Gauthiers-Villars, 678 p, rééd. 1972, Boubée.
- Eichert B-S., & al. (1985)** – *Méthodes de calcul pour les études hydrologiques concernant l'aménagement des eaux*. Etudes et Rapports d'Hydrologie. UNESCO, 134 p.
- El Ouni M. (2009)** – *Comportement des barrages, Auscultation et Modélisation*, Institut National Agronomique de Tunisie. 32 p.
- Epelde A., Cerro I., Snchez-Pérez J-M. & al. (2015)** – *Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality*. Hydrological Sciences Journal. Volume 60, 2015 - issue 5. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967692>
- Euzen A., Jeandel C. & Mosseri R. (2015)** – *L'eau à découvert*. CNRS éditions. Coll. Sociétés. 368 p.
- Fauconnier B. (1957)** – *Le problème des affouillements à l'aval des barrages*. Mars-Avril 1958, N° 2, La houille Blanche. 22 p.
- Faye C., Sow A., & Ndong J-P. (2015)** – *Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal*, Physio-Géo, Volume 9 | -1, 17-35.
- Faye C. (2015)** – *Impact du changement climatique et du Barrage de Manantali sur sa dynamique du régime hydrologique du fleuve Sénégal à Bakel (1950-2014)*. BSGLG, 64, 2015, 69-82. 14 P. Varia, URL : <http://popups.ulg.ac.be/0770-7576/index.php?id=4044>.
- Feizoure C-T. Censier C. Lang J. & al. (1993)** – *Evolution interannuelle de la dynamique sédimentaire d'une barre sableuse d'un fleuve de régime tropical humide : le site de Pama sur l'Oubangui (République Centrafricaine)*. In : colloque sur les grands bassins fluviaux péri-Atlantiques. Ed. Boulègue, Paris 11/22-24.
- Ferry L., Mietton M. Muther N., & al. (2012)** – *Extraction de sables et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali)*. Revue : Géomorphologie 3/ 2012 (n° 3), p. 351-368, URL : <http://geomorphologie.revues.org/9966> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.9966
- Formal J. (2014)** – *Mise en place du modèle SWAT sur un petit bassin versant agricole : Application au bassin versant du ruine (Charente)*, Mémoire de fin d'étude de Master, IRSTEA. 88 p.
- Frecaut R. (1982)** – *Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales (Tome1)*. Publications de l'Université Nancy 2, 148 p.
- Gaeuman D., Schmidt J-C. & Wilcock P.R. (2005)** – *Complex channel response to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah*. Geomorphology, 64 : 185-206.

Gaeuman D. & Jacobson R.B. (2006) – *Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large sand bed river*. Journal of Geophysical Research, 111, F02005, 14 p.

Galland F. (dir). 2012 – *Eau et Conflictualités*. Préface par Frérot Antoine. Eds : Choiseul. 121 p.

Gassman P.W., Reyes M.R., & al. (2007) – *The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 50 no 4, 2007, pp, 1211-1250.

Gaume E. (2002) – *Eléments d'analyse sur les crues éclair*. Thèse de Doctorat l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec ; 360 p.

Gaussen H. & Legris P. (1963) – *La délimitation des zones tropicales humides*. Revue : Annales de Géographie. N°393, pp. 513-528.

Gautier E., Touchart L. (1999) – *FLEUVES ET LACS : Synthèse*. Armand Colin, 96 p.

Gautier G., Corbonnois J., Petit F., & al. (2011) – *Multi-disciplinary approach for sediment dynamics study of active floodplains*. Géomorphologie : relief, processus, environnement. Vol. 15 - n° 1, 2009. URL : <http://geomorphologie.revues.org/7506> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.7506.

Gautier E., Grivel S., Garcia C., & al. (2016) – *Analyse comparée de la dynamique des îles fluviales de trois grands cours d'eau – Lena, Napo et Loire*. BSGLg, 67, 2016, 125-141.

Gilet L., Gob F., Virmoux C., & al. (2018) – *Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de Pierre Glissotte (Massif du Morvan, France)*. Revue : *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 24 - n° 1 | 2018, 7-29. DOI: 10.4000/geomorphologie.11946. URL: <http://journals.openedition.org/geomorphologie/11946>.

Gilvear D. J. (2002) – *Hydrology and the ecological quality of Scottish river ecosystems*. Revue Geomorphology. Science of The Total Environment. Volume 294, Issues 1–3, 22. 2002, pp 131-159.

Gilvear D. J. (2004) – *Patterns of channel adjustment to impoundment of the upper River Spey, Scotland (1942-2000)*. River Research and Applications 20(2): 151-165.

Ginocchio R. & Violet P-L. (2012) – *L'énergie hydraulique, 2^{ème} édition*. Ed. Lavoisier/Tec & Doc. Collection EDF, R&D. 632 p.

Githui F., Mutua F., & Bauwens W. (2009) – *Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): case study of Nzoia catchment, Kenya*. Hydrological Sciences Journal. Volume 54, 2009. Issue 5. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.5.899>

Giresse P., Malounguila-Nganga D., & Moguedet G. (1990) – *La succession des paléoenvironnements quaternaires des plateformes continentales du sud du Gabon, du Congo, du Cabinda et du Zaïre (pléistocène supérieur et holocène)*. In *Paysages quaternaires de l’Afrique Centrale Atlantique*. Ed. ORSTOM.

Giret A. (2004) – *Le risque hydrologique*. In: *L’information géographique*. Volume 68 n°1, pp. 14-26. URL : http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ingeo_0020-0093_2004_num_68_1_2923

Giret A. (2007) – *Géographie de l’écoulement fluvial*. Eds : L’Harmattan. 354 p.

Graf W. (1987) – *Fluvial Processes in Dryland Rivers*. Ed. Springer-Verlag. 346 p.

Gram P-E. & Schmidt J-C. (2005) – *Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: Sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah and Colorado*. *Revue Geomorphology* 71 (2005) 156 – 181.

Grivel S. (2008) – *La Loire des Iles, du Bec d’allier à Gien : Rythmes d’évolution et enjeux de gestion*. Thèse de doctorat de l’Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis. 518 p.

Grivel S. & Gautier E. (2012) – « *Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19^e siècle à aujourd’hui* », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 615, mis en ligne le 24 juillet 2012, URL : <http://cybergeo.revues.org/25451>

Guigo M., & al. (1991) – *Gestion de l’environnement et études d’impact*. Masson Géographie. 231 p.

Gurnell A., Petts G. (1995) – *Changing River Channels*. Ed. Wiley. 442 p.

Hade A. (2002) – *Nos lacs, les connaître pour mieux les protéger*, Éditions FIDES, préface de Pierre Dansereau. 359 p.

Hingray B., Picouet C., & Musy A. (2009) – *Hydrologie : Une science pour l’ingénieur*. Presses Polytechniques universitaires Romandes. 600 p.

Holling C.S. (1973) – *Resilience and Stability of Ecological Systems*. *Annual Review of Ecology and Systematics* Vol. 4:1-23 ; <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A. (1989) – *Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest*. *Journal of Hydrology*, 110, pp 349-367.

Hubert P., Servat E., Paturel J-E & al. (1998) – *La procédure de segmentation, dix ans après*. In. Water Ressources Variability in Africa during the 20th Century : International Conference, Abidjan (CIV), 1998/11/16-19.

Ibanez C., Prat & Canicio (1996) – *Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary*. Regulated Rivers-Research & Management 12 (1): 51-62. doi:10.1002/(SICI)1099-1646(199601)12:1<51::AID-RRR376>3.0.CO; 2-I.

Intes A., Arnaudin H. (1987) – *Esquisse sédimentologique du lagon*. in : "Contribution à l'étude de l'atoll de Tikehau : IV", pp 71-100.

Ichoku C, Lee J, Churchill O. (2018) – *The Lake Chad Basin's water-cycle dynamics and its significance for the Congo Basin*. AGU-Chapman, Conference on hydrologic research in the Congo basin. Washington (USA), 25-27 september 2018.

Jantzi H., Carozza J-M., Probst J-L., & al. (2017) – *Ajustements géomorphologiques du chenal de la moyenne Garonne en aval de Toulouse au cours des 200 dernières années (sud-ouest, France)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement. URL : <http://geomorphologie.revues.org/11692> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11692.

Joussaume S. (2000) – *Climat d'hier à demain*, CNRS Editions, Broché, 144 p.

Kiari H. (2014) – *Impacts des variations du niveau du lac Tchad sur les activités socio-économiques des pêcheurs de la partie nigérienne*. Thèse de doctorat de l'Université d'Abdou Moumouni de Niamey, et de l'UMR GEAU de Montpellier. 314 p.

Kiari H. (2018) – *Variability of the northern pool of Lake Chad and activities of local populations*. AGU-Chapman, Conference on hydrologic research in the Congo basin. Washington (USA), 25-27 september 2018.

Knighton D. (1998) – *Fluvial forms and processes*. Ed. Arnold. 383 p.

Koulinski V. (1993) – *Étude de la formation d'un lit torrentiel*, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble 1. 538 p.

Kondolf G. (1997) – *Hungry water : effects of dams and gravel mining on river channel*. Environmental management, 21 (4) : 533-551.

Kondolf G., Montgomery D., Piegay H. & al, (2003) – *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons. 560 p

Lane E. (1955) – *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, volume 81, pp 1-17.

Laganier R. & Fassetta G-A. (2009) – *LES GEOGRAPHIES DE L'EAU : Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème*. ed. L'Harmattan, 298 p.

- Laraque A., Mahé G., Orange D. & al. (2001)** – *Bassin du fleuve Congo : La nature des sols module les effets de la sécheresse. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during XXth Century* », Journal of Hydrology, Fiches d'actualité scientifique. Ed. IRD.
- Laraque A., Pandi A., Yambélé A., al. (2012)** – *Evolutions récentes des débits du Congo, de l'Oubangui et de la Sangha*. Geo-Eco-Trop., 37, 1: 93-100.
- Larue J-P., (2014)** – *Profils longitudinaux et ruptures de pente : enseignements géomorphologiques en Bretagne du sud* », Revue Physio-Géo, URL : <http://physio-geo.revues.org/3798> .
- Latapie A. (2011)** – *Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne*. Thèse de Doctorat de l'Université François-Rabelais de Tours. 279 p.
- Leblanc M., Favreau G., Maley J. & al., (2006)** – *Reconstruction of Mega lake Chad using shuttle radar topographic mission data*, palaeogeog., palaeoclim., palaeoecol. 239:16-27.
- Leduc P. (2013)** – *Étude expérimentale de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses*. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble. 258 p.
- Lejot J., Piégay H., David P., & al. (2011)** – *Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux : exemples d'applications et enjeux actuels*. Revue : Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2/2011, 157-172. URL : <http://geomorphologie.revues.org/9362> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.9362.
- Lemoalle J., Magrin G. (2014)** – *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possible*. Ed. IRD, Coll. Expertise collégiale, bilingue français-anglais, 638 p.
- Lespez L. & Germaine M-A. (2016)** – *La rivière désaménagée ? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages en Europe de l'ouest et en Amérique du nord-est*. Revue : BSGLG, 67, 2016, 223-254.
- Lévêque C. (2016)** – *Quelles rivières pour demain ? Réflexions sur l'écologie et la restauration des cours d'eau*. Quae, 287 p. ISBN 978-2-7592-2424-1
- Leroux M. (1983)** – *Le climat de l'Afrique tropicale*. Ed. Champion, Paris, 633 p.
- Lescure S., Arnaud-Fassetta G., Le Cœur C., & al., (2015)** – *Évolution hydro géomorphologique holocène de la Garonne maritime - Focus sur les sites de Langoiran et de l'Isle-Saint-Georges (Gironde, France)* », Revue : Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 21 – n° 1 | 2015, 57-72.
- Le Ster M. (2012)** – *Les Conflits liés à l'eau autour du Lac Turkana : Le cas des violences armées entre les Turkana et les Dassanetch*. Dynamiques environnementales : L'eau en Afrique : source de conflits ? N° 29/2012 ; in : Christian Bouquet, David Blanchon.

Lévêque C. (2005) – *Les conséquences des barrages sur l'environnement*. In Colloque « irrigation et développement durable. Paris. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-09/010036125.pdf

Mercier J-L. (2013) – *Indices granulométriques et lois de distributions*, Géomorphologie : relief, processus, environnement. URL : <http://geomorphologie.revues.org/10357> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.10357.

Magalligan F-J., & Nislow K-H. (2005) – *Changes in hydrologic regime by dams*. *Geomorphology*, 71 : 61-78.

Magrin G., (2011) – *Faut-il vraiment « sauver » le lac Tchad ? « L'Afrique plurielle : paradoxes et ambitions »* FIG Saint-Dié-des-Vosges, CIRAD. 57 p.

Magrin G. (2015) – *Double alchimie au lac Tchad : ou comment transformer la ressource en pénurie et la pénurie en ressources*. Publications de la Sorbonne. Ressources mondialisées. Essais de géographie politique, p.167-197, Territoires en mouvement. « hal-01237540 ».

Malavoi J-R. (1989) – *Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie*. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (1989) 315 : 189-210. 22 p.

Malavoi J-R. & Souchon Y., (1996) – *Dynamique fluviale et dynamique écologique*. La houille Blanche. N° 6/7. 10 p.

Malavoi J-R., & Bravard J-P. (2010) – *Eléments d'hydromorphologie fluviale*. ONEMA. *Physio-Géo* : URL : <http://physio-geo.revues.org/1532>. 224 p.

Malavoi J-R. & Salgues D. (2011) – *Arasement et dérasement de seuils. Aide à la définition de cahier des charges pour les études de faisabilité. Compartiment hydromorphologie et hydroécologie*. ONEMA, CEMAGREF. 83 p.

Malavoi J-R., Garnier C-C., Landon N. & al. (2011) – *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. ONEMA. 216 p.

Maleval V., (2010) – *Le Lac de Saint-Pardoux : Évolution du littoral et sédimentation lacustre*, Presses Universitaires Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, Collection Nature & Sociétés, 170 p.

Maleval V & Pitois F. (2017) – *Fonctionnement hydrosédimentaire et bilan sédimentaire du lac de Saint-Germain-de-Confolens (Charente, France) : paramètres géomorphologiques à prendre en considération dans la gestion du lac*. *Revue : Physio-Géo*, Volume 11. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/5544>; DOI: 10.4000/physio-geo.5544.

Maley J. (1993) – *Chronologie calendaire des principales fluctuations du Lac Tchad au cours du dernier millénaire. Le rôle des données historiques et de la tradition orale*. In Barreteau D. And Von Graffenried c. (eds) *datation et chronologie dans le bassin du lac Tchad*. Paris, IRD, pp. 161-163.

Mannes S., Robinson C-T., Uehlinger U. & al. (2009) – *Les effets écologiques d'un programme de restauration hydrologique d'une rivière artificialisée*, Revue de Géographie Alpine | Journal of Alpine Research, URL : <http://rga.revues.org/437> ; DOI : 10.4000/rga.437.

Marston R., Mills J., Wrazien D., & al. (2005) – *Effects of Jackson Lake Dam on the Snake River and its floodplain, Grand Teton National Park, Wyoming, USA*. Revue Geomorphology 71 (2005) 79 – 98.

Martins D. (2008) – *Aménagements hydroélectriques et impacts sur la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Le cas du haut Paraná, Brésil*. Thèse de Doctorat de l'Université de Lumière Lyon 2. 243 p.

Mathis D. (2016) – *Introduction Etangs : paysages, pays et territoires*, Revue Géographique de l'Est, vol.56 / n°1-2 | 2016, URL : <http://rge.revues.org/5711>

Maupin A. (2011) – *Le bassin transfrontalier du fleuve Zambèze en Afrique australe: des eaux conflictuelles ?* Revue : Les Cahiers d'Outre-Mer, 255. URL : <http://com.revues.org/6305> ; DOI : 10.4000/com.6305

Mehyong S. & Ndong R. (2011) - *L'électrification de l'Afrique équatoriale française (AEF) dans la période de l'après seconde guerre mondiale : aménagements hydroélectriques et rivalités interterritoriales*. Revue historique. 2011/1 (n° 657), p. 93-118. DOI 10.3917/rhis.111.0093. <https://www.cairn.info/revue-historique-2011-1-page-93.htm>

Melun G. (2012) – *Evaluation des impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité hydrosédimentaire et écologique sur l'Yerres aval*. Thèse de l'Université de Paris 7 Diderot, 336 p.

Mercier J-L. (2013) – *Indices granulométriques et lois de distributions », Géomorphologie : relief, processus, environnement*. URL: <http://geomorphologie.revues.org/10357> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.10357.

Mestraud J.-L. (avec la collaboration de Bessoles B.) (1982) – *Géologie et ressources minérales de la République centrafricaine. Etat des connaissances à la fin 1963*. Mém. BRGM, 60, Orléans, 186 p.

Meyer A-M. (2018) – *La Grande Rivière Artificielle de la Libye : huitième merveille du monde ou folie d'un dictateur ?* Revue : Dynamique Environnementale. ISSN électronique : 2607.2653, 14/05/2018, <https://dei.hypotheses.org/715>.

Meylan P., & Musy A., (1999) – *Hydrologie fréquentielle*. Ed. HGA Bucarest, 415 p.

Minot J-B. (2005) – *L'étude du barrage du lac et du bassin versant de la Mbali : interrelations entre un lac et un environnement anthropique en Afrique subtropicale* ; Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes ; 228 p.

Molle F. (2015) – *in : L'eau à découvert. Dir : Euzen A., Jeandel C. & Mosseri R. (2015)* – CNRS éditions. Coll. Sociétés. 368 p.

Molet L. (1971) – *Aspects de l'organisation du monde des Ngbandi (Afrique centrale)*. Journal de la Société des Africanistes Volume 41, N° 1 pp. 35-70.

Mubiala M. (1995) – *L'évolution du droit des cours d'eau internationaux à la lumière de l'expérience africaine, notamment dans le bassin du Congo-Zaïre*. Ed. PUF. Broché. 175 p.

Musy A. & Higy C. (2004) – *Hydrologie : Une science de la nature*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 314 p.

Nabet F. (2013) – *Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée*. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris. 442 p.

Nabet F., Grivel S., & Gautier E. (2016) – *Le rôle des aménagements sur la réponse topographique d'un cours d'eau à différents événements hydrologiques, la Loire moyenne, Géomorphologie : relief, processus, environnement*. URL : <http://geomorphologie.revues.org/11398> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11398.

Nanson G. & Knighton A. (1996) – *Anabranching rivers : their cause, character and classification*. Earth Surface Processes & Landforms, 21:217–239.

Navratil O. (2005) – *Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : Une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. 328 p.

Ngaressesem & al. (2014) – *La population du lac Tchad d'après les recensements : densification et attraction différenciée*. In : Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles. (Dir : Magrin & Lemoalle). 638 p.

Nguimalet C-R. (2007) – *Population et croissance spatiale : diagnostic et implications pour une gestion urbaine de Bangui (République centrafricaine)*. In : Workshop on Urban Population, Development and Environment Dynamics in Developing Countries. Nairobi, Kenya. 18 p.

Nguimalet C-R., & Orange D. (2012) – *Dynamique hydrologique récente de l'Oubangui à Bangui (Centrafrique) : Impacts anthropiques ou climatiques ?* Geo-Eco-Trop., 37, 1 : 101-112. 12 p.

Nguimalet, C.R. (2017) – *Changements enregistrés sur les extrêmes hydrologiques de l'Oubangui à Bangui (République Centrafricaine) : analyse des tendances*. Revue des Sciences de l'Eau, 30(3) (2017), 183-196.

Nzango C. (2016) – *Gestion sédimentaire d'un hydrosystème ensablé : l'exemple du bassin du Congo-Oubangui*. Colloque international sur la Gestion des sites soumis à forte

sédimentation. 6-7 Décembre 2016, ESNM, Le havre (France). Synthèse sur la Revue Houille Blanche : <https://www.shf-lhb.org/fr/articles/lhb/abs/2017/02/contents/contents.html>

Nzango C., Touchart L. Bartout P & al., (2017) – *Signatures hydrologiques du demi-barrage de Mobaye sur la continuité hydrosédimentaire de l'Oubangui (Bassin du Congo)*. Colloque Sur « le Transport Solide et Morphodynamique en Rivière ». IRSTEA-Lyon. Synthèse sur la Revue « la Houille Blanche » : <https://doi.org/10.1051/lhb/2017064>

Nzango C. Bartout P., Touchart L. (2018) – The predictable effects of the interbasin water transfer project (IBWT) on the hydrological regime of Ubangui. AGU-Chapman, Conference on hydrologic research in the Congo basin. Washington (USA), 25-27 september 2018.

Olive L. & Olley (1997) – *River regulation and sediment transport in a semi arid river : The Murrumbidgee River, New South Wales, Australia*. IAHS Publications-Series and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences 245 :283-290.

Olivry J-C., Bricquet J-P., Thiebaut J-P. & al. (1988). – *Transport de matière sur les grands fleuves des régions intertropicales: les premiers résultats des mesures de flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo*. In : Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium, December 1988). IAHS Publ. N° 174. 13 p.

Olley J. & Wallbrink P. (2004) – *Recent trends in turbidity and suspended sediment loads in the Murrumbidgee. River, NSW, Australia*. Sediment Transfer through the Fluvial System. V. Golosov, V. Belyaev and D. E. Walling. Wallingford, Int Assoc Hydrological Sciences: 125-129.

Orange D. (1996) – *Transports de matières dans un bassin fluvial tropical humide en zone de forêt : l'UELE au Zaïre*. Sciences Géologiques Bulletin, 49 : (1-4), 71-88 ISSN 0302-2692.

Oulianoff N. (1939) – *Influence de la structure tectonique sur l'écoulement des glaciers*. Les Études Rhodaniennes. Vol. 15 n°1, pp 163-165.

Parkinson D., Petit F., Perpinien G., & al. (1999) – *Habitats de reproduction des poissons et processus géomorphologiques dans des rivières à fond caillouteux. Essai de synthèse et applications à quelques rivières du bassin de la Meuse*. Bulletin de la Société géographique de Liège, 36, 1999, 31-52. 22 P. URL: <http://popups.ulg.ac.be/0770-7576/index.php?id=2745>.

Parrot E., Piégay H. & al. (2014) – *Caractérisation du continuum sédimentaire à large échelle*. Observatoire des sédiments du Rhône. Action 2, Version finale. 129 p.

Pech P. & Regnaud H. (1992) – *Géographie Physique*. Ed. PUF, pp 237-251.

Pépin E. (2010) – *Interactions géomorphologiques et sédimentaires entre bassin versant et piémont alluvial. Modélisation numérique et exemples naturels dans les Andes*, Thèse de l'Université de Toulouse, 292 p.

Petit F., Perpinien G. & Deroanne C. (2000) – *Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse*. Revue Géographique de l'Est, vol. 40 / 1-2 | 2000. URL : <http://rge.revues.org/4203>

Petit S. (2006) – *Reconstitution de la dynamique du paysage alluvial de trois secteurs fonctionnels de la rivière allier (1946-2000), Massif central, France* » Géographie physique et Quaternaire, vol. 60, n° 3, 2006, p. 271-287.

Petts G.E. (1979) – *Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction*. Prog. Phys. Geogr. 3, 329–362.

Petts G.E. (1984) – *Impounded rivers : perspectives for ecological management*. Chichester : John Wiley & Sons. Volume: 10 ; issue: 1, pp. 143-145. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913338601000116>.

Petts G.E. & Gurnell A.M. (2005) – *Dams and Geomorphology : research progress and future directions*. Geomorphology, 71 :27-47.

Phillips J. D., Slattery M.C. & Musselman Z.A. (2005) – *Channel adjustments of the lower Trinity River, Texas, downstream of Livingston Dam*. Earth Surface Processes and Landforms 30(11): 1419-1439.

Piégay H., Arnaud D., Souchon Y. (2003) – *Effets de la végétation riveraine sur la géométrie des lits fluviaux : études de cas dans le Massif central (France)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 9 (2), 111-127.

Pourriot R. & Meybeck M. (1995) – *Limnologie générale*, Collection d'écologie 25, Masson, Paris. 956 P.

Recking A., Richard D., & Degoutte G., (2013) – *Torrents et rivières de montagne dynamique et aménagement*. Ed Quae, 336 p.

Reounodji F., Sylvestre F., Issa S. (2014) – *Histoire du peuplement et logiques de mobilité*. In : Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles. (Dir : Magrin & Lemoalle). 638 p.

Rey J. (2010) – *Modalités du remblaiement sédimentaire des paléochenaux holocènes identifiés dans la partie occidentale du delta du Rhône (petite camargue, France)*. Revues : Quaternaire, 21, (1), 2010, p. 101-111.

Robert E. (2012) – *La mise en eau du barrage de Bagré, révélatrice et amplificatrice de conflits préexistants (Burkina Faso)*. Dynamiques environnementales : L'eau en Afrique : source de conflits ? N° 29/2012 ; in : Christian Bouquet, David Blanchon.

Roche E. (1991) – *Evolution des paléoenvironnements en Afrique centrale et orientale au Pléistocène supérieur et à l'Holocène. Influences climatiques et anthropiques*. Bulletin de la Société géographique de Liège, 27, 1991, 187-208.

Rodier J. (1967) – *Caractères généraux des régimes hydrologiques des grands fleuves d'Afrique tropicale dans l'hémisphère nord*. Bulletin de la Section de Géographie, Tome 80, Paris.

Rodrigues S. & Claude N. (2010) – *Le transport solide de la Loire : des sédiments sans cesse en mouvement*. Géosciences, 12:110.

Rollet A.-J. (2007) – *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de doctorat de l'Université Jean Moulin (Lyon 3). 305 p.

Rollet A.-J., & Piegay H. (2013) – *De l'intérêt de la quantification pour la gestion des systèmes fluviaux : exemple de la basse vallée de l'Ain*. Revue : Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol 19 - n°1, 63-78. 20 P. URL : <http://geomorphologie.revues.org/10132> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.10132.

Rousselot J. 2012 – *Le Projet Grand Inga*. Revue : Dynamiques Environnementales. N° 29, L'eau en Afrique : Source de conflits ? pp 175-180. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10132>.

Royet P. (2015) – in : *L'eau à découvert*. Dir : **Euzen A., Jeandel C. & Mosseri R. (2015)** – CNRS éditions. Coll. Sociétés. 368 p.

Rundqvist J., Pelikan B., Denis V., & al. (2005) – *Petite Hydroélectricité: Guide Technique pour la Réalisation des Projets*, ESHA 2005.

Runge J. (2002) – *Holocene Landscape history and paleohydrology evidenced by stable carbon Isotope (Delta C-13) analysis of alluvial sediments in the Mbari valley (Central Africa Republic)*. Catena, Volume 48, numéros 1–2 , pp 67-87. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00010-3)

Runge J. (2007) – *Of deserts and forests, Late Quaternary landscape and climate history of Central Africa. Des déserts et des forêts, histoire du paysage et du climat de l'Afrique Centrale au Quaternaire Supérieur. Von Wüsten und Wäldern, Spätquartäre Landschafts- und Klimageschichte Zentralafrikas*. Geo-Eco-Trop, 2007, 31: 1-18.

Runge J. & al. (2017) – *The African Neogene - Climate, Environments and People: Palaeoecology of Africa*. CRC Press. Taylor & Francis Group. SBN 9781138062122. 224 p.

Rutherford D. (2007) – *Les trois approches de Malthus pour résoudre le problème démographique*. Revue : Population. Vol. 62, p. 253-280. DOI : 10.3917/popu.702.0253. URL : <https://www.cairn.info/revue-population-2007-2-page-253.htm>

Salvador P.-G. (1991) – *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère*. Thèse de Doctorat de l'Université de Lyon 3, 498 p.

Sambou S., Diémé Y., Touré K. & al. (2009) – *Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique*. Revue : Sécheresse. Vol 20, N° 1 : 104-111.

Sanjuan T. & Béreau R. (2001) – *Le barrage des Trois Gorges. Entre pouvoir d'État, gigantisme technique et incidences régionales*. Revue : Hérodote, N° 102, 19-56. URL : <https://www.cairn.info/revue-herodote-2001-3-page-19.htm> DOI : 10.3917/her.102.0019.

Savoie P. (2003) – *Impacts du barrage des Trois Gorges sur le développement durable de la Chine*. Revue : Vertigo, Volume 4 Numéro URL : <http://vertigo.revues.org/3899> ; DOI : 10.4000/vertigo.3899.

Savy B. & Touchart L. (2003) – *Les lacs à déstratificateur thermique et le cas de Mas Chaban (Charente, France) / Lakes and air bubble system : the exemple of the Mas Chaban reservoir (Charente, France)*. In: Revue de géographie alpine, tome 91, n°1, 2003. URL: /web/revues/home/prescript/article/rga_0035-1121_2003_num_91_1_2232.

Servat E., Paturel J-E., Lubès-Niel H., & al. (1999) – *De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne*. Revue des Sciences de l'eau. Volume 12, N° 2. 363-387. URI : id.erudit.org/iderudit/705356ar.

Sherrard J. & Erskine W. D. (1991) – *Complex response of a sand-bed stream to upstream impoundment*. Regulated Rivers: Research & Management 6(1): 53-70.

Schwartz D. (1991) – *Les paysages de l'Afrique centrale pendant le Quaternaire ;*. IRD édition. 6 p.

Schwartz D. (2003) – *Changements climatiques holocènes en Afrique centrale : relations avec le peuplement humain : quoi de neuf ? Peuplements anciens et actuels des forêts tropicales*. In : actes du séminaire-atelier. Paris : IRD, 157-168. (Colloques et Séminaires). Peuplements Anciens et Actuels des Forêts Tropicales : Séminaire-Atelier, Orléans (FRA), 1998/10/15-16. ISBN 2-7099-1534-0.

Schumm S. & Lichty R. (1965) – *Time, space and causality in geomorphology*. American Journal of Science, 263:110–119.

Schumm S. (1969) – *River metamorphosis*. Journal of the Hydraulics division 95 (1): 255-274.

Schumm S. (1977) – *The Fluvial System*. Ed. John Wiley & Sons. 338 p.

Schumm S. (1981) – *Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 31:19–29.

Schumm S., Mosley P., Weaver W. (1987) – *Experimental Fluvial Geomorphology*. Ed. John Wiley & Sons. 413 p.

Sebag D., Durand A., Garba Z., Lang J. & al. (2006) – *Dynamique sédimentaire et diagenétique d'un lac interdunaire holocène en milieu subaride (N'Guigmi, Lac Tchad, Niger)*. Africa Geoscience Review, Vol. 13, No. 4, pp. 409-423, 2006.

Servant M. & Servant S., (1983) – « *Paleolimnology of an Upper Quaternary Endorheic Lake in Chad Basin* », in Carmouze J.-P., Durand J.-R. & Lévêque C., Ed, 1983, Lake Chad, Ecology and Productivity of a Shallow Tropical Ecosystem. The Hague, Dr W. Junk, Monographiae Biologicae vol. 53, 575 p.: 11-26.

Singer E. & Gangloff M. (2011) – *Effets d'un petit barrage sur la croissance des moules d'eau douce dans un ruisseau de l'Alabama (États-Unis)*. FreshWater Biology. Volume 56, Numéro 9. Pages 1904-1915. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02608.x>

Steinmann R., Garcia J-P., Dumont A. & al. (2017) – *Aspects méthodologiques de l'approche intégrée des comblements postglaciaires : apports pour la reconstitution de la dynamique fluviale de la Loire au cours de l'Holocène*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 23, n° 1 | 2017, 83-104. URL : <http://geomorphologie.revues.org/11650> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11650

Taïbi A.N., Mohamed Barry M., Jolivel M. & al. (2009) – *Enjeux et impacts des barrages de Diama (Mauritanie) et Arzal (France) : des contextes socio-économiques et environnementaux différents pour de mêmes conséquences*. Revue : Norois. URL : <http://norois.revues.org/1536> ; DOI : 10.4000/norois.1536.

Tardy. Y. (1986) – *Le cycle de l'eau : Climats, Paléoclimats et Géochimie globale*. Ed. Masson. 264 p.

Tardy Y. & Probst J-M. (1992) – *Sécheresses, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis cent ans*. Ed. Sécheresse ; Synthèse Vol 3 : 25-36.

Touchart L., (2000a) – *Les Lacs : Origine et Morphologie*, L'Harmattan, ISBN : 2-7384-9800-0, 210 p.

Touchart L. (2000b) – *Qu'est-ce qu'un lac ? (What is a lake ?)*. In : Bulletin de l'Association de géographes français. Volume 77 Numéro 4 pp. 313-322. URL : http://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_2000_num_77_4_2179

Touchart L. (2001) – *De la température de l'eau à la Géographie des Lacs* ; HDR de l'Université de Limoges, 480 p.

Touchart L. (2002) – *LIMNOLOGIE PHYSIQUE ET DYNAMIQUE, Une géographie des lacs et des étangs* ; ed. L'Harmattan, 396 p.

Touchart L. (2003) – *Hydrologie : Mers fleuves et lacs* ; ed. Armand Colin ; 192 p.

Touchart L. & Bartout P. (2010) – *The influence of monk equipped ponds on the quality of basin head streams, the example of water temperature in Limousin and Berry (France)* ; Lakes, Reservoirs and Ponds ; Romanian Journal of Limnology ; 4 ; Bucharest ; pp : 81-108.

Touchart L., Bartout P. (2011) – *La gestion du risque thermique en étang : le cas de la dérivation*. Riscuri si catastrofe, 9, 149-161/.

Touchart L., Bartout P., & Nedjai R. (2014) – *La géographie Limnologique en France : conjugaison de l'espace et du temps pour la compréhension des relations homme-milieu*. Revue BSGLg, 62, 2014, 81-91.

Touchart L. & Bartout L. (2018) – *Le limnosystème est-il un concept géographique ?* Annales de Géographie - N°719 1/2018, ed. Armand Colin. pp 29-58.

UNESCO (2010) – *Le patrimoine mondial dans le bassin du Congo*. Convention du Patrimoine Mondial. 64 p.

Vanoni V. (1975) – *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers, Reston. 726 p. <https://doi.org/10.1061/9780784408230>

Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W. & al. (1980) – *The River Continuum Concept*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37 (1), 130-137.

Vatan A. (1967) – *Manuel de sédimentologie* ; Ed. Technip, 397 p.

Vayssière A., Depret T., Castanet C. al. (2016) – *Etude des paléoméandres holocènes de la plaine alluviale du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher)*, Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol.22 - n° 2 | 2016, 163-176.

Verstraeten G. & Poesen J. (1999) – *The nature of small scale flooding, muddy floods and retention ponds sedimentation in central Belgium*. Geomorphology, 29 : 275-292.

Verstraeten G. & Poesen J. (2000) – *Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds : methods and implications for the assessment of sediment yield*. Progress in Physical Geography, 24 (2) : 219-251.

Victoria P. (2012) – *in : Eaux et conflictualités*. Préface par Frérot Antoine. Eds : Choiseul, pp 83-87.

Viel P. (2015) – *Espace de liberté des cours d'eau : s'inspirer des meilleures pratiques pour définir un cadre de gestion Québécois*. Mémoire de Maîtrise de l'Université de Sherbrooke. 85 p.

Wackermann G. & Rougier H. (2010) – *L'eau : Ressources et usages*. Eds : Ellipses. Collection : Carrefours. 270 p.

- Wasson J-G., Malavoi J-R., Maridet L., & Al. (1998)** – *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières* ; Ed. Cemagref, coll. « études » : Gestion des milieux aquatiques, n° 14, 1580 p.
- Webb B.W. & Walling D.E. (1996)** – *Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation*. Applied Geography, 16, 211–227.
- Webb B.W. & Walling D.E. (1997)** – *Complex summer water temperature behaviour below a UK regulating reservoir*. Regulated Rivers : Research and Management, 13 (5) : 463-477.
- Wentworth C-K. (2004)** – *A scale grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, 30 : 377-392.
- Wesselink A., Orange D., Feizoure C. & al. (1996)** – *Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide: l'Oubangui (République Centrafricaine)* ; L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement: (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publ, no. 238, 1996.
- Wiederkehr E., Dufour S., & Piégay H. (2010)** – *Localisation et caractérisation semi-automatique des géomorphosites fluviaux potentiels. Exemples d'applications à partir d'outils géomatiques dans le bassin de la Drôme (France)*, Revue : Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 16 - n° 2 | 2010, 175-188.
- Wiederkehr E. (2012)** – *Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Elaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône*. Thèse de doctorat de l'ENS de Lyon. 288 p.
- Wiley J. (2007)** – *Large Rivers : Geomorphology and Management*. Ed. Gupta Avijit. 689 p.
- Williams G.P. & Wolman G.P. (1984)** – *Downstream effects of dams on alluvial rivers*. USGS Circular 781, 48 p.
- Wolman M.G. (1954)** – *A method of sampling Coarse River bed material*. Transactions of the American Geophysical Union, 35 (6) : 951-956.
- Wolman M.G. (1956)** – *Two problems involving river channels and their background observations*. Northwest University. Geogr. 14 : 67-107.
- Wintenberger C., (2015)** – *Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse. Etudes in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne*. Thèse de l'Université François-Rabelais de Tours. 357 p.
- Yang S., Milliman D. Li P. & al. (2011)** – *50,000 dams later : érosion of the Yangtze river and its delta*. Global and Planetary Change 75 (1-2) : 14-20.

Rapports, Circulaires, et autres Documents

AFNOR (1997) – *Qualité de l'eau. Recueil des normes françaises. Tome 2, 2^{ème} édition.* Editée par l'Agence Française de Normalisation. pp. 95-103.

Beto R. (2012) – *Utilité de la Télédétection et le SIG aux enjeux Environnementaux induits par la construction du barrage hydroélectrique: cas de la M'Bali.* Mémoire de fin d'étude en Master 2 au Centre Régional Africain des Sciences et Technologie de l'Espace (Maroc). 88 p.

Bouka B., Mpounza M. (2009) – *Réalité du changement climatique en Afrique centrale : cas du fleuve Congo.* Source: ATC Fluvial, CIFOR Forest.

Boulvert Y., (1937) – *Un siècle de Cartographie topographique et thématique en Centrafrique.* Ed. ORSTOM.

CBLT (2015) – *Audit Environnemental Conjoint sur l'Assèchement du Lac Tchad. Rapport d'Audit Conjoint.* 30 p.

CIMA + International. (2011) – *Étude de faisabilité du projet de transfert d'eau de l'Oubangui au lac Tchad : rapport principal.* 93 p.

Braud S., Alber A., (2013) – *Synthèses des connaissances & proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau.* DREAL Centre. 76 p.

Boubakari M. – *l'une des réponses à la pénurie d'eau dans le bassin du Lac Tchad : Le Projet de transfert d'Eau de l'Oubangui au lac Tchad.* CBLT. 18 p.

Boyeldieu P. (1977) – *Structures sociales et particularismes linguistiques en pays de langue Ngbandi', Eléments pour une étude.* Rapport d'une mission en Centrafrique.

Bozza A. (2012) – *Modélisation du risque de ruissellement et inondation à Port-au Prince,* Rapport de stage, 56 p.

Breuil C. (1996) – *Revue du secteur des pêches et de l'aquaculture: République centrafricaine FAO.* Circulaire sur les pêches N° 912 FIPP/C912.

Bruel. G., (1900) – *Oubangui et les environs de Mobaye. 1 : 50 000 ;* Document cartographique manuscrit.

Bruel G. (1900) – *Oubangui : Voie de pénétration dans l'Afrique Centrale.*

Buffin-Balanger T. (2012). *L'hydrogéomorphologie : une science pour mieux comprendre la dynamique des cours d'eau.* In : Forum régional sur l'eau en Chaudière-Appalaches à Montmagny. 55 P.

Bruel G. – *L'Oubangui, rapides de Zinga Oubangui Chari : Portions navigables Oubangui et les environs de Mobaye.*

CARHYCE (2010) – *Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle stationnelle.*

Champredonde R. (2006) – *Modélisation, Spatialisation de l'étendue d'une crue, Applications au bassin de Lèze*, Rapport de Stage Master en Eaux Sols Environnement, 28 p.

Coyine et Bellier (1986) – *Barrage sur la M' Bali*, Avant – Projet détaillé.

Dacharry M. & Laganier R. (2001) – *Un siècle d'hydrogéographie française*. Colloque International OH2 « Origines et Histoire de l'Hydrologie », Dijon, 9-11 mai 2001.

Galliot N. (2007) – *La dynamique géomorphologique du Méandrage de la basse vallée de la bruche (Bas-Rhin) : approche historique*. Mémoire de Master Recherche de l'ENGEES. 69 p.

Gbazi R. (2006) – *Sites hydroélectriques en RCA*, Ministères des mines et énergies et de l'hydraulique de Centrafrique, 90 p.

Ginneken M-V. (2009) – *Les inondations urbaines à Bangui en République Centrafricaine. Rapport d'évaluation de la situation actuelle et mesures pour réduire la fréquence et atténuer les impacts futurs*. 128 p.

Hallot E., Benoit M., Stasse G., & al. (2012) – *L'envasement du Lac de Butgen Bach (Ardenne, Belgique)*. Séminaire de Géographie de l'Université, Société Géographique de Liège. 19 p.

Klik A., Dostal T., Krasa J. & al. (2010) – *Soil erosion and sediment transport measurement and assessment*. CTU Prague ; 36 p.

Lanfranchi R. & Schwartz D. (1990) – *PAYSAGES QUATERNAIRES DE L'AFRIQUE CENTRALE ATLANTIQUE, La couverture pédologique de l'Afrique centrale atlantique*, ORSTOM, Paris.

Laraque A., Olivry J.-C., Orange D. & al. (1997) – *Variations spatio-temporelles des régimes pluviométriques et hydrologiques en Afrique Centrale du début du siècle à nos jours*. Colloque FRIEND de l'UNESCO. Slovenia. IAHS , 246: 257-263.

Magrin G. (2013) – *La disparition du lac Tchad : où mène la Political ecology ?* Séminaire Hydrosystèmes et Hydropolitiques. 7 p.

Malavoi. J-R., & al., (1998). *Détermination de l'espace de Liberté des cours d'eau*. Guide Technique N° 2. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. 42 p.

Malavoi J. (2001) – *Protocole de mesures granulométriques pour une approche globale du fonctionnement de la Loire*. Rapport technique, Plan Loire Grandeur Nature.

Malavoi J. (2010) – *Petits ouvrages transversaux : quelques éléments techniques sur les avantages et inconvénients de l'effacement*. In Colloque sur les Ouvrages hydrauliques. Cholet (France), 2010.

Mathieu C. (2009) – *Les principaux sols du monde. Voyage à travers l'épiderme vivant de la planète de la terre.* Eds. Tec & Doc. Lavoisier. 252 p.

Megevand C. al. (2013) – *Dynamiques de déforestation dans le bassin du Congo. Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt.* Rapport de la Banque Mondiale. 201 p. <http://dx.doi.org/10.1596/978-0-8213-9827-2>

Ngocko S. (2015) – *Effets du barrage sur l'hydrogéomorphologie de l'Oubangui à Mobaye en Centrafrique.* Mémoire de recherche de Master de l'Université de Yaoundé 1. 156 p.

Nguimalet C-R. & Boulvert Y. (2006) – *Les crues historiques de l'Oubangui et leurs implications dans la gestion de l'eau di site de Bangui, capitale de la république Centrafricaine.* In colloque : Interactions Nature-Société, analyse et modèles.

Nguimalet C-R. (2007) – *Population et croissance spatiale : diagnostic et implications pour une gestion urbaine de Bangui (République centrafricaine).* Workshop on Urban Population, Development and Environment Dynamics in Developing Countries at Nairobi (Kenya).

Nguimalet C-R., & Orange D. (2015) – *Caractérisation de la Baisse Hydrologique de la Rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine.* In Colloque International sur l'Hydrologie des Grands bassins fluviaux de l'Afrique, Hammamet, Tunisie.

Note d'information sur le projet de Transfert des Eaux du fleuve Oubangui au lac Tchad ; *Direction du Cabinet du Ministère du Développement Rural, République Centrafricaine*

Nzango C. (2014) – *Influence de la variabilité du régime hydrologique sur la morphodynamique du bassin du Congo : Application sur l'Oubangui,* Mémoire de master 2 de l'Université d'Orléans. 70 p.

ONEMA (2012) – *Pourquoi Restaurer ? La dynamique fluviale, à l'origine de la biodiversité et du bon état écologique.* ONEMA, 25 p.

ONEMA : Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau, 104 p.

Orange D. (1993) – *Le suivi des hauteurs d'eau de l'Oubangui au Sofitel de Bangui.* In Bulletin de l'IRD et ses partenaires en Centrafrique. Numéro 1, Mars 2013.

Orange D., Olivry J-C., Censier C. (1995) – *Variations et Bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui (de 1987 à 1992).* In : colloque des grands bassins fluviaux à Paris.

Orange D., Feizouré C., & Wesselink A. (1995) – *Variabilités hydrologiques de l'Oubangui à Bangui.* In : Actes des Journées Scientifiques FRIEND-AOC, Cotonou, 1995/12. Paris : UNESCO, 20 p.

Pagès J-M. & al. (2003) – *Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité,* ADEME, Editions Rouland. 159 p.

Parent V. (2013) – *Suivi hydrogéomorphologique d'un cours d'eau étouffé par un aménagement d'urgence : cas du cours d'eau Bonhomme-Morency au Bas-Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de Maîtrise de l'Université du Québec à Montréal. 178 p.

Pandi A. Ibiassi G. Tondo B. & al. (2009) – *Impact de la variabilité des écoulements sur la navigabilité de l'Oubangui, un affluent du fleuve Congo*. Annales de l'Université Marien Ngouabi, 2009 ; 10 (1) 75-81.

PNUD (2017) – *Rapport de diagnostic du secteur énergétique de la République Centrafricaine. Analyse et diagnostique issue de la revue documentaires sur le secteur de l'énergie en République Centrafricaine*. (Coord : Bindo M.). 66 p.

Renseignements sur les conditions de navigabilité du fleuve Congo et rivières du bassin Congo-Oubangui-Sangha ; service commun d'entretien des voies navigables, Juin 1996.

Renaud J. (2004) – *Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie): Vers une modélisation des transferts de phosphore*. Rapport de stage de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne. 75 p.

Salou G. (2009) – *Estimation des apports au lac Saint-Charles à l'aide du modèle hydrologique Swat*. Mémoire de Maîtrise de l'Université Laval. 73 p.

Saxer S. (2008) – *Rapport d'étude : Compréhension du phénomène de l'ensablement de la Haute Vallée de l'Aude*. Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières. 130 p.

Schwartz D. (2003) – (2003). *Changements climatiques holocènes en Afrique centrale. Relations avec le peuplement humain. Quoi de neuf?* Colloque et Séminaire sur les peuplements anciens et actuels des forêts intertropicales. Groupe Ecofit. Ed. IRD.

Sedick A. (2013) – *Etat de lieux du projet de Transfert D'Eau de l'Oubangui au Lac Tchad. ; in : Séminaire régional sur l'Engagement parlementaire sur la question du Lac Tchad*. 45 p.

Thiebault M. (2010) - *Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT*. Mémoire de stage d'ingénieur de l'ENGEES. 55 p.

Tixier (1954) – *Etude du seuil de Mobaye*. ORSTOM. 7 p.

Valette L., Chandesris A., Souchon Y. (2013) – *Protocole AURAH-CE Audit Rapide de l'hydromorphologie des cours d'eau. Méthode de recueil d'informations complémentaires à SYRAH-CE sur le terrain*. Version 2.0, Pôle ONEMA/IRSTEA, Hydroécologie des cours d'eau. 46 p.

Vasquez. J., (2014) – *Hydraulique générale*. Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains, Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'Environnement de Strasbourg. Formation CES/MASTERE. 69 p.

WCD (2000) – *World Commission on Dams. Dams and Development. A new framework for decision-making*. URL : <https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world-commission-on-dams-final-report.pdf>. 356 p.

Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H. (2010) – *Intégration de données extraites des orthophotos de l'IGN pour la caractérisation et la modélisation de l'habitat aquatique*. Rapport final ; Zone Atelier du Bassin du Rhône.

Webographies :

AIE Agence Internationale de l'Energie <https://www.iea.org/>

Bureau d'étude BEI ERE (Bureau d'Etudes Industrielles Energies Renouvelables et Environnement) <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0809/bei/beiere/groupe5/node/59>

CBLT: <http://www.cblt.org/fr>

CIBG Commission Internationale des Grands Barrages <http://www.icold-cigb.net/FR/registre-des-barrages/synthese-generale.asp>

CICOS : Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha <http://www.cicos.int/>

CFSR: <https://globalweather.tamu.edu/>

DNM = <http://www.hydrosciences.fr/sierem/produits/index.asp?frame=nationaux>

Gie SCEVN = <http://gie-scevn.com/>

Hebdomadaire Jeune Afrique, consulté le 06 avril 2015, Url : <http://www.jeuneafrique.com/Article/ARTJAJA2541p015.xml0/projet-eau-lac-tchad-assechement-le-lac-tchad-un-projet-qui-prend-l-eau.html>

ICOLD ou CIGB en Français est la Commission Internationales des Grands Barrages.

IEA (International Energy Agency). Rapport 2010. World Energy Outlook 2010. Url: <https://www.iea.org/newsroom/news/2010/november/world-energy-outlook-2010.html>

Le lac Tchad n'est pas la mer d'Aral. Par Magrin Géraud, 2007, consulté le 07 avril 2015
Url : <http://mouvements.info/le-lac-tchad-nest-pas-la-mer-daral/>

Hydrosciences Montpellier : SIEREN (Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation). <http://www.hydrosciences.fr/sierem/consultation/choixaccess.asp>

SO Hyban: <http://www.so-hybam.org/index.php/fre>

Liste de acronymes

***AIE** = Agence Internationale de l'Energie (IEA en Anglais)*

***AEF** = Afrique Equatoriale Française, (Pays membres : Gabon, Centrafrique, Tchad et Congo-Brazzaville).*

***AERM** = Agence de l'Eau Rhin Meuse*

***AFNOR** = Association Française de Normalisation*

***AFD** = Agence Française de Développement*

***AMESD** = African Monitoring of Environment for Sustainable Development*

***BAD** = Banque Africaine de Développement*

***BEI** = Banque Européenne d'Investissement*

***BM** = Banque Mondiale*

***CBLT** = Commission des Bassins du Lac Tchad*

***CICOS** = Commission Internationale du Bassin Congo-Oubangui-Sangha*

***CIGB** = Commission Internationale de Grands Barrages*

***CFSR** = Climate Forecast System Reanalysis*

***D50** = Diamètre médian d'une charge sédimentaire*

***DEA** = Diplôme d'Etudes Approfondi*

***DCE** = Directive Cadre Européenne sur l'Eau*

***DEM** = Digital Elevation Model*

***DMN** = Direction Nationale de la Météorologie de Centrafrique*

***EIE** = Etude d'Impact Environnemental*

ENSO = *El Niño Southern Oscillation*

EQM = *Erreur Quadratique Moyenne*

ETM+ = *Enhanced Thematic Mapper Plus*

ETP = *Evapotranspiration potentielle*

FAO = *Food and Agriculture Organisation*

FEM = *Fonds pour l'Environnement Mondial*

G₂₀ = *Groupe des vingt*

GERD = *Grand Ethiopia Renaissance Dam*

GES = *Gaz à effet de serre*

GIE-SCEVN = *Groupement d'Intérêt Économique chargé de l'entretien des voies navigables d'intérêt commun aux deux États Congo et Centrafrique.*

GIRE = *Gestion Intégrée des Ressources en Eau*

GIZ = *(Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), est l'agence de coopération internationale allemande pour le développement*

GW ; MW = *Gigawatt ; Mégawatt*

Ha = *Hectare*

HRU = *Unité de Réponses Hydrologiques dans le modèle SWAT*

IC = *Indice de concavité*

IS = *Indice de Standardisation*

IGN = *Institut Géographique National*

IRD = *Institut de Recherche et Développement*

IRSTEA = *Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture*

Km, Km², Km³ = respectivement *Kilomètre, Kilomètre carré, Kilomètre cube*

KWh = *Kilowatt par heure*

LIDAR = *Light Detection And Ranging* »

m³/s = *mètre cube par seconde*

MD = *Matières Dissoutes*

MES = *Matière en Suspension*

Mm = *Millimètre*

MNT = *Modèle Numérique de Terrain*

MOD = *Matières Organiques Dissoutes*

NDVI = *Indice de végétation par différence normalisé*

OIEau = *Office International de l'Eau*

OMM = *Organisation Météorologique Mondiale*

ONEMA = *Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques*

ONG = *Organisation Non Gouvernementale*

ONU = *Organisation des Nations Unies*

OSFT = *Observation Spatiale des Forêts Tropicales*

PCH = *Petite Centrale Hydraulique*

PE = *Petites Entreprises*

PGES = *Plan de Gestion Environnemental et Social*

PHE = *Repères des Plus Hautes Eau*

PME = *Petite et Moyenne Entreprise*

PNUD = *Programme des Nations Unies pour le Développement*

Q ou ***Ql*** = Flux liquide

Qs = Flux solide

Qma, Qmax, Qmin, Qmj, Qmaxj = respectivement Module annuel, Débit maximum, Débit minimum, Débit moyen journalier et Débit maximum journalier

Qmorph = Débits morphogènes

Rh = Rayon hydraulique

SAGE = Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SDAGE = Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIG = Système d'Information Géographique

SNEL = Société Nationale d'Electricité du Congo Belge

SOCATRAF = Société Centrafricaine de Transport Fluvial

SO HYBAN = Service d'Observation géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans les bassins de l'Amazonie, de l'Orénoque et du Congo

SUB - Sous Bassin dans le modèle SWAT

SWAT = Soil and Water Assessment Tool

TEE = Tractionel Electobel Engineering

THR = Très Haute Résolution

TDS = Matières Minérales Dissoutes

TDRs = Termes De Références

TM = Thematic Mapper

TOM = Territoire d'Outre-Mer

ULM = Ultra Léger Motorisé

***I'UA** = Union Africaine*

***UNESCO** = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

***USDA** = United States Department of Agriculture*

***USGS** = United States Geological Survey*

***UTM** = Universal Transverse Mercator (Projection Transverse Universelle de Mercator)*

***WCD** = World Commission on Dams*

***WGS** = World Geodetic System*

***WWF** = World Wide Fund for Nature*

***ZCIT** = Zone de Convergence Intertropicale ou le Pot au noir*

Liste des figures

Figure 1 – Bon état écologique des cours d'eau. Source: Agence de l'eau Artois Picardie....	10
Figure 2 – Le bassin du Congo et ses principaux cours d'eau	14
Figure 3 – Le Grand Inga et les projets de connexion internationale. Source : Rousselot (2012).....	15
Figure 4 – Les deux options du transfert interbassin proposées par CIMA+. (Source : Lemoalle & Magrin, 2014).....	17
Figure 5 – Représentation de la Dynamique fluviale selon Buffin-Bélanger (2012).....	30
Figure 6 – Diagramme classique de Hjulström (1935) ; <i>In</i> Pinto-Martins, 2008	30
Figure 7 – Les deux principaux modes de transport sédimentaires en rivière.....	31
Figure 8 – Distribution longitudinale de la morphologie fluviale. [D'après Montgomery & Buffington, 1997 ; in Liebault, Renaitre & Pateuil, 2013].....	32
Figure 9 – Classification de styles fluviaux en fonction de la sinuosité et du nombre des Chenaux. [Rust, 1978 ; Bravard & Petit, 2000].....	33
Figure 10 – Succession de Radiers- mouilles en longueur et largeur d'un chenal.....	34
Figure 11 – Espace de liberté d'un cours d'eau (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse).....	34
Figure 12 – Emboîtement schématisé de l'hydrosystème fluvial [Amoros & Petts, 1993].....	36
Figure 13 – Principe de l'équilibre dynamique (d'après Lane, 1955) basé sur le Bilan entrées-sorties d'un système fluvial.....	37
Figure 14 – Temps de Réponses d'un système fluvial aux modifications brutales d'une variable de contrôle [Knighton, 1984 ; in : Rollet, 2007].....	39

Figure 15 – Différents cas d'évolution du style fluvial : (1) sans changement de forme, (2) changement de forme, (3) changement de forme et un retour à la forme initiale, (4) changement du style fluvial. (Source: Sear, 1996 ; in Nabet, 2013).....	40
Figure 16 – Schéma des ajustements morphologiques des sections en travers en réponse aux modifications des débits liquides par rapport à la capacité de transport. Le trait gris correspond à la section en travers originelle avant l'implantation du barrage, et le trait noir correspond à la section après les effets du barrage. Source: Brandt (2000a).....	41
Figure 17 – Principe d'un aménagement hydroélectrique : a) une centrale au fil de l'eau ; b) les équipements d'une centrale hydroélectrique (Source : ADEME, 2003).....	43
Figure 18 – Taux de décantation d'une retenue par Brune (1953).....	57
Figure 19 – Bassin d'étude : a) Le Bassin du Congo-Oubangui ; b) Confluence Uélé-Mbomou, début de l'Oubangui.....	62
Figure 20 – Sectorisation de l'Oubangui en tronçon homogène. [Callède & al. (2010) ; adaptée].....	63
Figure 21 – Gradient longitudinal de la vallée de l'Oubangui.....	64
Figure 22 – Profil en travers de l'Oubangui à Mobaye (<i>aval du rapide de Mobaye</i>).....	65
Figure 23 – Profil en travers de l'Oubangui à Bangui (<i>aval du rapide de Ouango</i>).....	66
Figure 24 – Profil en long de l'Oubangui de la source (Uélé) à la confluence avec le fleuve Congo [Boulvert, 1987 ; Callède & al (2010), adapté par Nzango. C].....	67
Figure 25 – Profil en long, Style fluvial et Lithologie de l'Oubangui.....	68
Figure 26 – Courbe Granulométrique de l'Oubangui à Bangui	72
Figure 27 – Carte Géologique du bassin de l'Oubangui. (UNESCO, 1987).....	74
Figure 28 – Régime hydrologique de l'Oubangui pour l'année hydrologique 1974-1975 aux stations de Mobaye (Pk 1250), de Bangui (Pk 1600) et de Zinga (Pk 1670).....	78
Figure 29 – Module interannuel de l'Oubangui à la station de Bangui en année civile (1939-2011).....	79

Figure 30 – Corrélation croisée entre les débits de l’Oubangui à Bangui et à Mobaye sur la période de 1939 à 1993.....	80
Figure 31 – Module interannuel de l’Oubangui à la station de Mobaye en année civile (1939-2011)	81
Figure 32 – Module interannuel de la Mbali à Boali en année hydrologique (1951-1993).....	82
Figure 33 – Indice de standardisation d’écoulement de l’Oubangui à la station de Bangui.....	83
Figure 34 – Les débits maximums de crues de l’Oubangui à Bangui en année civile.....	84
Figure 35 – Les débits minimums d’étiages de l’Oubangui à Bangui en année civile	87
Figure 36 – Position annuelle de la ZCIT. Source NASA	91
Figure 37 – Tendances d’écoulement de part et d’autres de 1970.....	94
Figure 38 – Portions navigables sur le bassin de l’Oubangui en 1931. Source : Archives de l’Institut Cartographique de Paris. Adapté.....	95
Figure 39 – Suivi diachronique du lit de l’Oubangui au secteur fonctionnel de Bangui.....	97
Figure 40 – Seuil de Zinga, principal obstacle à la navigation sur l’Oubangui-Congo.....	100
Figure 41 – Carte d’occupation du sol à Bangui.....	103
Figure 42 – Croissance urbaine de la ville de Bangui.....	106
Figure 43 – L’aménagement hydroélectrique de Boali sur la rivière Mbali.....	107
Figure 44 – Le régime d’écoulement de la rivière Kotto à la station de Bria.....	109
Figure 45 – Protocole de suivi en plan de la morphologie fluviale.....	125
Figure 46 – Sites d’échantillonnages sédimentologiques sur l’Oubangui à Mobaye.....	126
Figure 47 – Mobilité en plan du chenal de l’Oubangui à Mobaye.....	128
Figure 48 – Evolution morphosédimentaire de l’Oubangui à Mobaye... ..	129
Figure 49 – Totaux Pluviométriques de l’Oubangui à Bangui en millimètre.....	130

Figure 50 – Evolution interannuelle du Q_{ma} de l’Oubangui à Mobaye en année civile.....	131
Figure 51 – Evolution interannuelle du Q_{max} de l’Oubangui à Mobaye en année civile	132
Figure 52 – Evolution interannuelle du Q_{min} de l’Oubangui à Mobaye en année civile.....	133
Figure 53 – Morphologie fluviale de l’Oubangui à Mobaye. Image Spot 2010.....	135
Figure 54 – Le barrage de Boali sur la rivière Mbali.....	139
Figure 55 – Bassin versant contrôlé par le barrage de Boali.....	141
Figure 54 – Occupation du sol à Boali 3 entre 1986 – 2010.....	149
Figure 57 – Carte de l’aléa d’érosion des sols du bassin versant de la Mbali contrôlé par le barrage. Beto (2012).....	150
Figure 58 – Evolution de la cote de retenue du barrage depuis 1992.....	151
Figure 59 – Evolution de la hauteur d’eau de la rivière Mbali en aval du barrage de Boal...	151
Figure 60 – Régime hydrologique mensuel de la rivière Mbali en aval du barrage de Boali.....	152
Figure 61 – Schéma théorique du changement d’habitat aquatique.....	155
Figure 62 – Evolution de la surface du lac Tchad. NASA 2002.....	164
Figure 63 – TRANSAQUA, unie idée pour le Sahel. Source BONIFICA (1982).....	165
Figure 64 – Projet « TRANSAQUA », une idée pour le Sahel. (Source BONIFICA ; adapté).....	166
Figure 65 – Variations historiques du niveau du lac Tchad au cours du dernier millénaire. Source: Maley (1993).....	168
Figure 66 – Situation du lac Tchad autour de 2010. [Lemoalle & Magrin, 2014]	170
Figure 67 – Evolution de la surface en eau du lac Tchad entre 1970-2015. Source: Lemoalle & Magrin (2014).....	171
Figure 68 – Schéma du cycle hydrologique (Documentation SWAT).....	181

Figure 69 – Quelques données SIG générées par ArcSWAT à l'échelle du bassin contrôlé par le barrage-planifié de Palambo.....	183
Figure 70 – Comparaison des valeurs du débit simulé à celles du débit observé	184
Figure 71 – Résultats de la calibration finale.....	186
Figure 72 – Les barrages-réservoirs de Palambo et de Boali sur le bassin versant de l'Oubangui.....	190

Liste des tableaux

Tableau 1 – Classification des styles fluviaux de l’Oubangui.....	69
Tableau 2 – Classification de l’Indice Standardisé (IS) sur l’Oubangui à Bangui.....	83
Tableau 3 – Résultats de l’analyse des débits fréquents des crues de l’Oubangui à Bangui.....	86
Tableau 4 – Résultats de l’analyse du Temps de retour des crues de l’Oubangui à Mobaye...86	
Tableau 5 – Nature et sources de données utilisées.....	121
Tableau 6 – Résultats du Test d’Hubert sur les trois paramètres hydrologiques étudiés.....	135
Tableau 7 – Paramètres physico-chimiques analysés à l’intérieur du lac M’Bali.....	156
Tableau 8 – Les caractéristiques des différents états du Lac Tchad [Lemoalle & Magrin, 2014].....	182
Tableau 9 – Données d’entrée du bassin de l’Oubangui appliquées au modèle SWAT.....	185
Tableau 10 – Ajustement des 26 paramètres hydrologiques les plus sensibles du modèle....	171

Liste des photographies

Photo 1 – Résultats d’analyses des flux particulaires exportés par l’Oubangui à Yakoma (Pk 1100) et à Bangui (Pk 1600).....	70
Photo 2 – Paléochenal sur la rivière Pama, affluent du moyen-Oubangui (18°19'18.66"E et 4°27'54.00"N). Source: Google Earth.	76
Photo 3 – Paléochenal sur la rivière Oubangui dans la localité de Boburu (17°49'50.00"E et 1°1'49.02"N). Source: Google Earth.....	77
Photo 4 – Baliseur Oubangui à quai au siège du SCEVN de Bangui. Cliché Nzango C.....	99
Photo 5 – Ensablement de l’Oubangui :	101
Photo 6 – Extraction et commercialisation de sables sur l’Oubangui à la tête de l’île Mbongo.....	102
Photo 7 – Le demi-barrage de Mobaye sur l’Oubangui.....	105
Photo 8 – Site de l’Oubangui à Palambo lors des basses eaux. Cliché : Boulvert (1987).....	108
Photo 9 – Pont inachevé sur l’Oubangui à Mobaye. Cliché : Nzango, 2016.....	117
Photo 10 – Pêche à la nasse sur l’Oubangui.....	120
Photo 11 – Pêche au filet au niveau du ressaut hydraulique en aval du barrage de Mobaye.....	120
Photo 12 – Interface du logiciel KhronoStat.....	123
Photo 13 – Environnement lithique de Boali.....	140
Photo 14 – Les mesures d’auscultations sur le barrage de Boali. Source: ENERCA.....	143
Photo 15 – Un point de forage dans la commune de Boali. Cliché : Nzango, 2015.....	144
Photo 16 – Photographie du site de carottage sur la Mbali (cliché : Nzango, 2015).....	146
Photo 17 – La rivière Mbali à 11 Km en aval du barrage de Boali.....	154
Photo 18 – Chute de la Mbali à environ 12 Km en aval du barrage de Boali.....	193

Annexes

Annexe 1 : Protocole de la réalisation des Profils en Travers sur l'Oubangui.

Profil en travers du Site N°							
Date de levé:		Cours d'eau:					
Transect N°							
N°sur GPS	Altitude ou Profondeur	Distance (m)	Distance cumulée	Unité topograph	Unité Morpho	Occupation	Végétation
							

Fiche de terrain pour la réalisation des profils transversaux
Field sheet for the realization of the transverse profiles

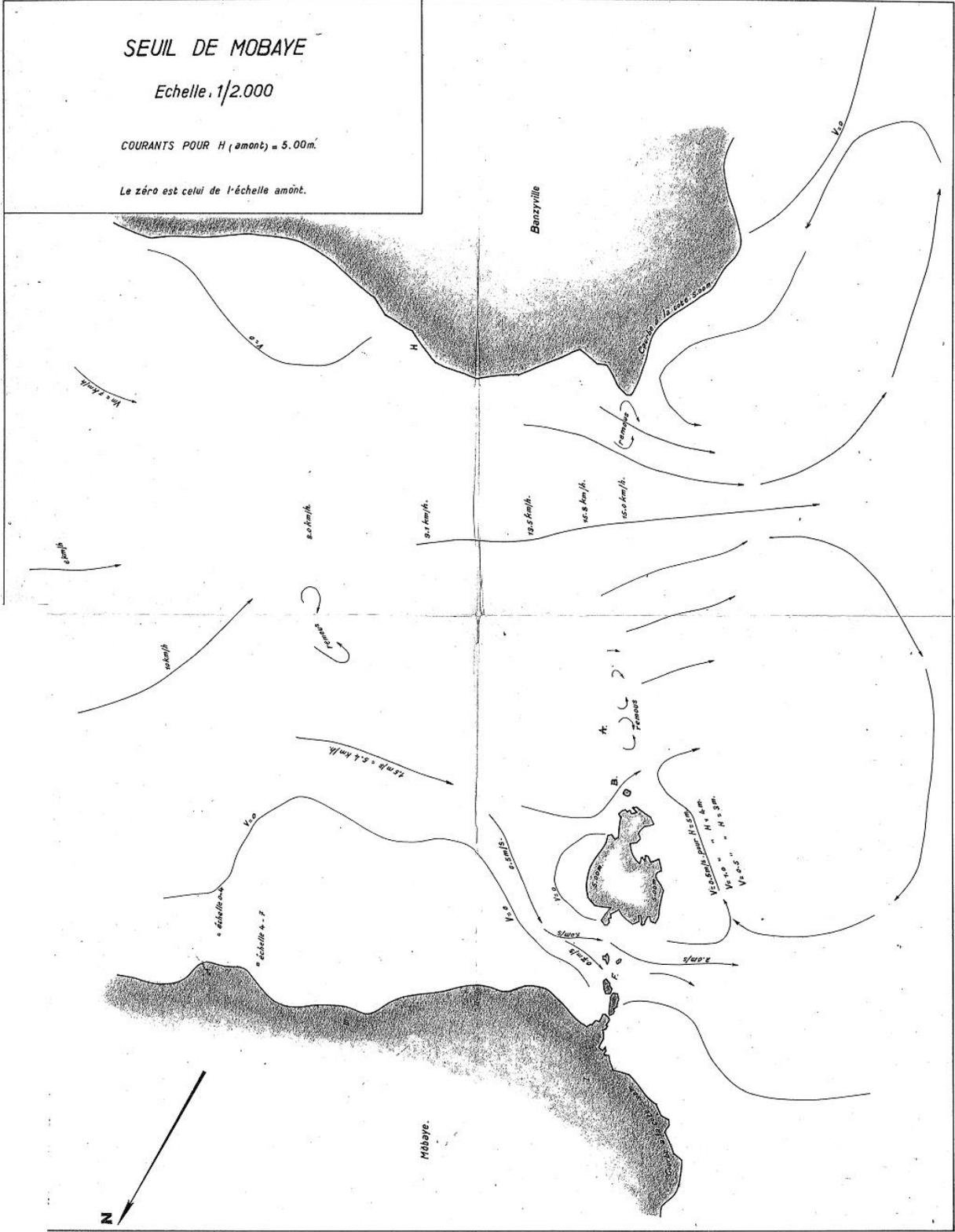
Annexe 2: Protocole l'analyse granulométrique utilisée

Site:	Date		
Sables	Modules AFNOR Tamis (mm)	Poids refusé (g)	Refus en %
	19	0,063	
	20	0,08	
	21	0,1	
	22	0,125	
	23	0,16	
	24	0,2	
	25	0,25	
	26	0,315	
	27	0,4	
	28	0,5	
	29	0,63	
	30	0,8	
Graviers	31	1	
	32	1,25	
	33	1,6	
	34	2	
	35	2,5	
	36	3,15	
	37	4	
	38	5	
	39	6,3	
	40	8	
Galets	41	10	
	42	12,5	
	43	16	
	44	20	
	45	25	
	46	31,5	
	47	40	
	48	50	
	49	63	



Echelle de la classification granulométrique définie par AFNOR
Scale of the particle size classification defined by AFNOR

Annexe 3 : Etude de la vitesse d'écoulement au niveau du rapide de Mobaye réalisée par Tixier (1954), Ingénieur Hydrologue de l'ORSTOM (ex IRD).



Annexe 4 : Fiche d'enquêtes réalisées auprès des riverains de l'Oubangui

Objectifs : Appréhender la perception des riverains sur les barrages de l'Oubangui. Le *Questionnaire* est repartis en cinq thèmes et distribué aux acteurs (pêcheurs, cultivateurs, commerçants etc.), les avis recueillis ont été dépouillés et traité sous *Microsoft Office Excel*.

Fiche d'enquêtes

N° de fiche : Lieu : Date : Acteur sondé :

Thème 1 : Quelle est votre perception du barrage de Mobaye ?

Favorable	Autres	Non favorable
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Remarques :

Thème 2 : Etes-vous satisfait des services du barrage de Mobaye ?

Oui	Autres	Non
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Remarques :

Thème 3 : Quelle est votre appréciation de la politique d'indemnisation post-aménagement ?

Bien	Moyen	Médiocre
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Remarques :

Thème 4 : Quel est l'impact du barrage sur la production piscicole ?

Positif	Autres	Négatif
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

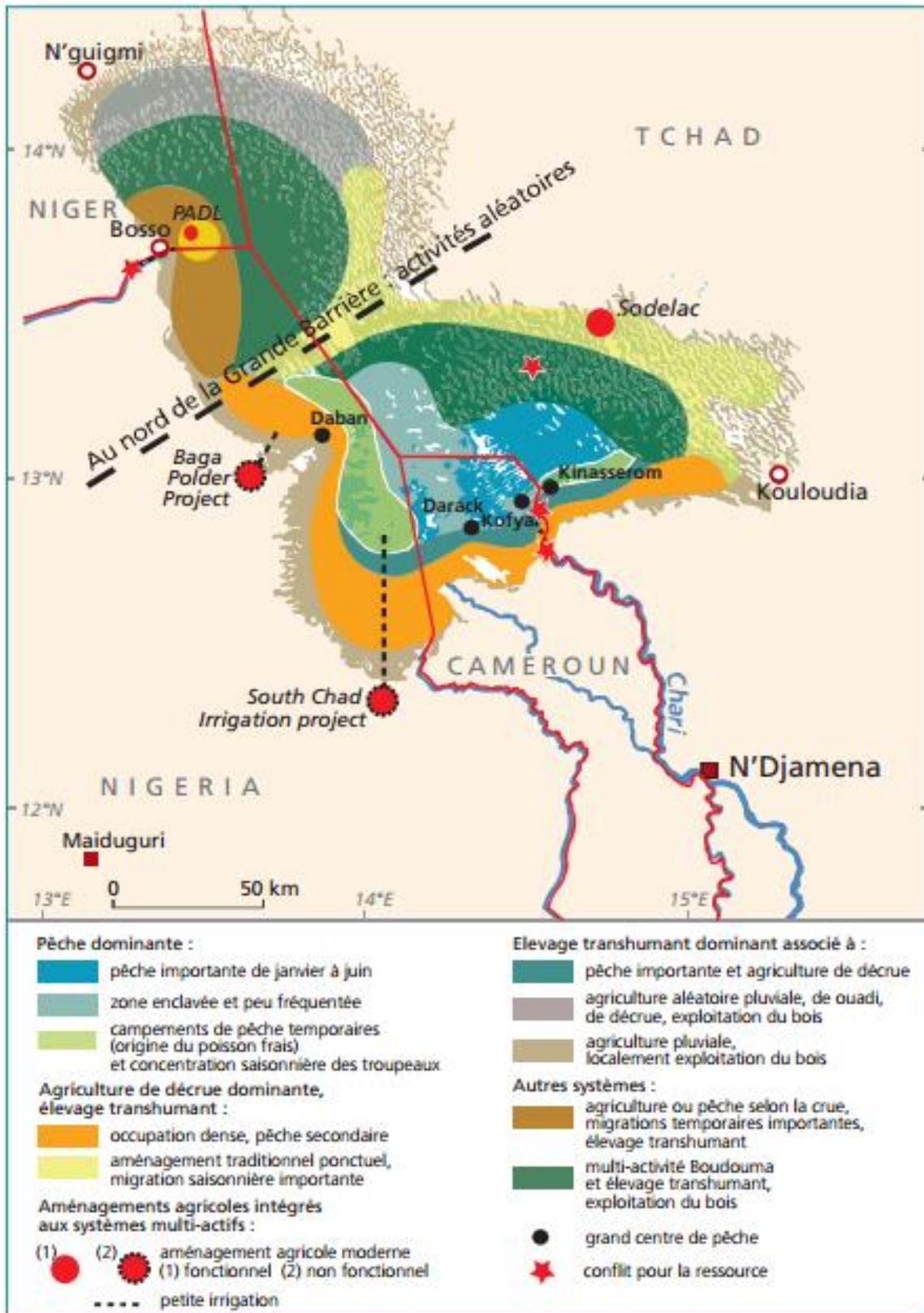
Remarques :

Thème 5 : Quelle est votre perception du projet PTEIB ?

Favorable	Autres	Non favorable
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Remarques :

Annexe 5 : Les espaces multifonctionnels autour et dans le Lac Tchad. Source : Raimond & Rangé, 2014



Annexe 6 : Liste des stations hydrométriques du bassin de l'Oubangui (Callède & al., 2010)

Numéro	Station	Rivière	Latitude nord	Longitude est	Superficie km ²
Haut Oubangui					
1	1060700220 Zémio	Mbomou	05°02'	025°09'	27 700
2	1060700205 Bangassou	Mbomou	04°43'	022°49'	119 050
3	1060700215 Ouango	Mbomou	04°19'	022°34'	141 000
4	1060702305 Obo	Mbokou	05°24'	026°30'	5 960
5	1060701605 Kéré	Kéré	05°21'	025°45'	3 790
6	1060702805 Demba	Ouara	05°06'	024°29'	19 590
7	1060702802 Bogou	Ouara	05°53'	025°21'	7 330
8	1060701310 Rafai	Choko	04°58'	023°55'	52 060
9	1060702210 Loungouba	Mbani	04°44'	022°41'	23 600
10	1060702205 Fodé	Mbani	05°29'	023°19'	13 900
11	1060707305 Pascale (Bakouma)	Mpatou	05°43'	022°48'	365
12	1060704005 Djéma	Ngoangoa	06°03'	025°18'	7 580
Moyen Oubangui					
13	1060700108 Kamba	Oubangui	04°08'	022°26'	315 000
14	1060700112 Limassa	Oubangui	04°14'	022°02'	398 500
15	1060700114 Mabaya (Aval)	Oubangui	04°18'	021°11'	403 800
16	1060700115 Mabaya (Aval)	Oubangui	04°18'	021°11'	403 800
17	1060700110 Kouango	Oubangui	05°00'	019°59'	435 000
18	1060700118 Palambo	Oubangui	04°42'	018°57'	484 500
19	1060700105 Bangui	Oubangui	04°22'	018°35'	488 500
20	1060700120 Zinga	Oubangui	03°43'	018°35'	521 900
21	1060700116 Mongoumba	Oubangui	03°38'	018°36'	553 900
22	Libenge	Oubangui	03°38'	018°38'	553 900

Numéro	Station	Rivière	Latitude nord	Longitude est	Superficie km ²
Affluents du Moyen Oubangui					
23	1060701820 Bac Yalinga	Kotto	07°10'	022°46'	29 700
24	1060701804 Bia	Kotto	06°32'	022°00'	60 590
25	1060701807 Ira-Banda	Kotto	05°56'	022°08'	70 430
26	1060701810 Kem bé	Kotto	04°36'	021°55'	77 750
27	1060701815 Nganda	Kotto	04°19'	022°04'	81 000
28	1060705505 Ouadda	Pipi	08°04'	022°24'	2 500
29	1060705810 Makamat	Boungou	06°44'	021°58'	16 800
30	1060701103 Alinda	Bangui-Katé	05°03'	021°12'	4 560
31	1060702703 Bakala	Ouaka	06°12'	020°23'	15 700
32	1060702705 Eambani	Ouaka	05°06'	020°40'	29 730
33	1060702707 Eambala	Ouaka	05°13'	020°11'	39 200
34	1060701505 Ngoko	Kémo	05°45'	019°25'	5 180
35	1060705705 Sibut	Tomi	05°44'	019°05'	2 610
36	1060705303 Bossélé (km 105)	Ombella	05°10'	018°52'	3 020
37	1060702505 Balla-Katé (Togbo)	Mpoko	06°02'	017°28'	200
38	1060702520 Boudélé	Mpoko	05°38'	017°50'	3 670
39	1060702515 Bossélé-Bali	Mpoko	04°32'	018°28'	10 460
40	1060702510 Bangui (Bimbo)	Mpoko	04°22'	018°29'	25 630
41	1060703605 Ouda Kota	Kokoué	05°49'	017°33'	575
42	1060705005 Bodoupa	Njo	05°42'	017°36'	387
43	1060703203 Botassana	Boué	05°35'	017°36'	87
44	1060705905 Yangama	Yangama	04°38'	018°33'	169

Numéro	Station	Rivière	Latitude nord	Longitude est	Superficie km ²
45	1060704603 Boali (Poste)	Mbali	04°49'	018°07'	4 596
46	1060704604 Boali (I.C.O.T)	Mbali	04°53'	018°02'	4 410
47	1060704605 Boali (Pirogues)	Mbali	04°53'	018°02'	4 410
48	1060707505 Bodanga	Mbi	04°55'	017°38'	2 260
49	1060703905 Bombé	Lessé	04°06'	018°14'	1 300
50	1060706505 Bimo	Kapou	04°18'	018°17'	
51	1060702026 Zaoro-Yanga	Lobaye	05°10'	016°37'	5 280
52	1060702012 Kédingué-Yawa	Lobaye	04°21'	017°04'	11 170
53	1060702021 Ngotto	Lobaye	04°03'	017°21'	15 480
54	1060702023 Safa (Terres rouges)	Lobaye	03°39'	018°06'	29 600
55	1060702016 Mbata	Lobaye	03°40'	018°18'	30 300
56	1060702008 Batalimo	Lobaye	03°41'	018°27'	30 700
57	1060702020 Mongoumba	Lobaye	03°41'	018°32'	31 100
58	1060704505 Bambio	Mbaézé	03°57'	017°00'	4 930
59	1060704203 Boda	Louame	04°19'	017°28'	510
Bas Oubangui					
60	Dongo	Oubangui	02°43'N	018°24'	
61	Dongou	Oubangui	02°02'N	018°04'	
62	Impfondo	Oubangui	01°37'N	018°03'	
63	Mobenzélé	Oubangui	00°54'N	017°50'	
64	Lilanga	Oubangui	00°14'N	017°51'	
65	Ndjoundou	Oubangui	00°19'S	017°42'	

Annexe 7 : Le site d'ENERCA à Mobaye (cliché Nzango, 2016).



Annexe 8 : Montage et pilotage du drone sur la rivière Mbali



**Annexe 9 : Phase d'aménagement du barrage de Boali sur la rivière Mbali (cliché
Boby Simplicie, ENERCA)**



Table des Matières

Avant-Propos.....	2
Résumé.....	4
Sommaire.....	6
Introduction.....	7

Partie 1 – Cadres Thématiques et Physiques de l'étude

Chapitre 1 – Cadre Thématique de l'étude.....26

A- Bases Conceptuelles en Hydrologie (Fluviale).....	27
1- Introduction à l'hydrologie fluviale (tropicale).....	27
2- Le système fluvial et l'équilibre dynamique.....	29
3- L'équilibre dynamique et les Ajustements fluviaux.....	37
B- Etat connaissances sur les impacts des barrages.....	42
1- Taille et type des barrages dans le monde.....	42
2- Les barrages et les conflictualités dans le monde.....	44
3- Les impacts des barrages en rivière.....	52
3.1- <i>Impacts des barrages sur les flux liquides</i>	53
3.2- <i>Impacts des barrages sur les flux solides</i>	56
3.3- <i>Les impacts des barrages sur le franchissement des poissons migrateurs et sur la dissémination des graines végétales</i>	57
3.4- <i>Les impacts sociétaux des barrages</i>	58

Chapitre 2 – Cadre Physique du bassin de l'Oubangui.....61

A- Contexte Géographique.....	62
B- Contexte Géomorphologique.....	64
C- Contexte Géologique	73
D- Contexte Hydroclimatique.....	78
E- Cadre réglementaire du bassin de l'Oubangui.....	88

Chapitre 3 – Les enjeux environnementaux contemporains sur l’Oubangui.....90

A- Les Enjeux liés aux changements climatiques.....91

- 1- Les effets des forçages hydroclimatiques sur l’Oubangui.....92
- 2- Déficit d’écoulement et impact sur la navigabilité de l’Oubangui.....94
- 3- Les ajustements morphologiques de l’Oubangui aux forçages hydroclimatiques.....96

B- Les Enjeux liés aux aménagements fluviaux.....98

- 1- Les aménagements pour l’amélioration des conditions navigables.....98
- 2- Les aménagements pour la production hydroélectrique.....104
 - 2.1- *Le barrage sur l’Oubangui à Mobaye*.....104
 - 2.2- *Le barrage sur la rivière Mbali à Boali*.....105
 - 2.3- *Le projet d’aménagement du barrage de Palambo sur l’Oubangui*.....107
 - 2.4- *Le projet d’aménagement du barrage de Bria sur la rivière Kotto*.....109

Partie 2 – Etudes d’impact hydraulique des barrages sur le bassin de l’Oubangui

Chapitre 1 – Etudes de cas du demi-barrage de Mobaye.....115

A- Les spécificités du demi-barrage de Mobaye.....116

- 1- Structure hydraulique du demi-barrage.....116
- 2- Quelles contributions sociales de l’ouvrage hydroélectrique de Mobaye ?.....118

B- Méthodologie de l’étude d’impact du barrage de Mobaye.....121

- 1- Nature Sources de données utilisées.....121
- 2- Analyse et Traitement de données de débits.....122
- 3- Analyse et Traitements des données planimétriques (photo-interprétation).....124
- 4- Autres Sources de données.....126

C- Résultats127

- 1- Une morphologie fluviale impactée127
- 2- Un régime hydrologique « non altérée ».....131
- 3- Un ouvrage « transparent » sur la continuité sédimentaire.....133
- 4- Discussions.....135

Chapitre 2 – Etudes de cas du barrage-réservoir de Boali.....	138
A- Le complexe hydraulique de Boali.....	139
1- Le barrage de Boali et son environnement lithique.....	139
2- Contributions sociales de l’ouvrage.....	143
B- Méthodologie de l’étude d’impact du barrage de Boali.....	145
1- Données collectées.....	145
2- Traitement de données.....	146
C- Résultats.....	148
1- Impacts du barrage sur le paysage fluvial de Mbali.....	148
2- Impacts du barrage sur les flux liquides.....	150
3- Impacts du barrage sur les flux sédimentaires	152
4- Impacts du barrage sur l’habitat des poissons.....	154

Partie 3 – Prospective environnementale des barrages planifiés sur l’Oubangui

Chapitre 1 – Le projet de dérivation de l’Oubangui vers le lac Tchad.....	162
A- Objectifs et Justificatifs du projet PTEIB.....	163
1- Historique du projet de transfert interbassin.....	165
2- La problématique de l’assèchement du lac Tchad.....	167
B- Les effets potentiels du projet PTEIB	173
1- Les effets bénéfiques escomptés.....	173
2- Les controverses autour du projet.....	175
Chapitre 2 – Etudes d’impacts prévisibles du barrage de Palambo sur l’Oubangui.....	179
A- Essai de Modélisation hydrologique des effets du barrage planifié à Palambo sur l’Oubangui.....	180
1- Modélisation hydrologique avec l’outil SWAT.....	180
2- Simulation.....	184
3- Calibration.....	184
4- Validation.....	187

B- Apports de « l’extrapolation hydrologique » à l’évaluation des effets prévisibles du barrage de Palambo.....	188
1- La mise en œuvre de la méthode.....	188
2- Parallélisme entre le barrage projeté à Palambo et le barrage de Boali.....	189
3- Résultats de l’extrapolation.....	191
3.1- <i>Les impacts locaux du barrage projeté.....</i>	<i>191</i>
3.2- <i>Les impacts régionaux du barrage projeté.....</i>	<i>191</i>
3.3- <i>Les impacts interbassin du projet.....</i>	<i>194</i>
Chapitre 3 – Perspectives d’aménagement et de Gestions durables des barrages sur l’Oubangui.....	197
A- Perspectives de Recherches et de Gestions des Barrages de Mobaye et Boali.....	198
1- Actions envisageables à Mobaye.....	198
2- Actions envisageables à Boali.....	200
B- Perspectives d’Aménagement et de Gestion du barrage planifié à Palambo.....	204
1- Intégration de la dimension environnementale dans l’élaboration du projet.....	204
2- Vers la mise en place d’un Plan de Gestion Environnemental et Social du projet....	204
Conclusion générale.....	211
Références bibliographiques.....	220
Liste des acronymes.....	248
Liste des figures.....	253
Liste des tableaux.....	258
Liste des photographies.....	259
Annexes.....	260
Table des matières.....	271