



**AGROCAMPUS OUEST
Centre de Rennes**

65 rue de Saint-Brieuc CS
84215 35042 Rennes

Bâtiment G-Eau, IRSTEA

361 rue Jean-François Breton,
BP 5095,
34196 Montpellier Cedex 5

Mémoire de Fin d'Études

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques,
Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage ***

Année universitaire* : 2012 - 2013

Spécialité* : Génie de l'Environnement

Spécialisation ou option* : Sols, Eau et Hydrosystèmes

Modélisation hydrodynamique couplée 1D-2D du delta intérieur du fleuve Niger

Par : Marie THIBault

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation *



ou son représentant

Date : .../.../... Signature

Non

Bon pour dépôt (version définitive)

Autorisation de diffusion : Oui

Devant le jury :

Soutenu à Rennes

le : 12/09/2013

Sous la présidence de* : Christophe Cudennec

Maître de stage* : Gilles Belaud

Enseignant référent : Zahra Thomas

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : A. Crave, chercheur à Géosciences Rennes

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

* champs obligatoires

Remerciements

Un grand merci à Gilles Belaud, mon maître de stage, ainsi qu'à André Paquier, concepteur du logiciel Rubar, pour leur aide.

Merci également à mes collègues de l'UMR G-Eau, pour leur bonne humeur et leur amitié. Une pensée particulière pour Andrea, pour son soutien, et parce que ces six mois n'auraient pas été les mêmes sans lui.

Enfin, je remercie ma famille qui m'accompagne tout le long de mon parcours.

Index des illustrations

Illustration 1: Carte du Delta Intérieur du Niger (Expert, 2012).....	2
Illustration 2: Hydrogramme de la crue de 2000-2001 en différents points du delta intérieur du Niger (Roy, 2011).....	3
Illustration 3: Positions des barrages du fleuve dans le Haut Niger. Les pointillés représentent un barrage en projet (le barrage de Talo a été mis en service en 2006). Les débits indiqués sont les débits moyens annuels de la période 1970-1998. (Zwarts et al., 2005).....	6
Illustration 4: Profils transversaux réalisés sur le delta intérieur du Niger.....	8
Illustration 5: Stations hydrologiques de la DNH sur le delta intérieur du Niger.....	10
Illustration 6: Schéma d'une rivière dans une approche unidimensionnelle (Paquier, 2002).....	11
Illustration 7: Réseau du delta en aval du lac Débo.....	16
Illustration 8: Longueur des biefs du réseau aval du lac Débo.....	16
Illustration 9: Profils interpolés des biefs 20 à 26 (vue du dessus).....	17
Illustration 10: Exemples de profils interpolés (premiers profils du bief 22) (vue en coupe).....	17
Illustration 11: Maillage de la zone ouest de la partie aval de Débo (correspondant aux biefs 20 à 25).....	19
Illustration 12: Maillage bidimensionnel de la zone aval du delta intérieur du Niger (au Nord du lac Débo).....	21
Illustration 13: Hydrogrammes de la crue 2000-2001, en aval du modèle 1D seul, en aval du modèle couplé, et mesuré à Tonka.....	22
Illustration 14: Hauteurs d'eau maximales obtenues pour la crue 2000-2001.....	23
Illustration 15: Hauteurs d'eau maximales obtenues pour la crue 2004-2005.....	23
Illustration 16: Comparaison de l'étendue de l'inondation au 25/11/04 : image MODIS (en fond, et zoomée à gauche), et image obtenue par simulation (à droite) (image en fond : 1 cm = 60 km ; encadrés : 1 cm = 14,4 km)	24
Illustration 17: Temps de la hauteur maximale pour la crue de 2000-2001, obtenu par simulation. .	25

Index des tables

Tableau 1: Impacts des ouvrages sur le delta intérieur selon la saison (l'importance de l'impact est relative au débit de la saison) (d'après Marie, 2007).....	7
Tableau 2: Comparaison de la date pour laquelle la surface d'inondation est maximale, entre le modèle et les images MODIS, pour les années 2000-2001 et 2004-2005.....	24

Liste des abréviations

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

DNH : Direction Nationale de l'Hydraulique

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (Radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne)

Liste des annexes

Annexe 1 : Construction du maillage bidimensionnel

Annexe 2 : Image SRTM du delta

Table des matières

Introduction.....	1
I.Présentation du delta intérieur du Niger (DIN).....	2
I.1.Présentation générale	2
I.2. Le climat dans le delta.....	3
I.3.Les caractéristiques hydrologiques du delta.....	3
I.4.Les usages de l'eau dans le delta, et leur évolution.....	4
I.5.Les constructions hydrauliques en place et futures.....	5
I.6.Les données utilisées pour la modélisation hydraulique.....	7
I.6.1.Les données topographiques.....	7
I.6.1.1.La topographie des lits mineurs.....	7
I.6.1.2.La topographie du lit majeur.....	8
I.6.1.3.Les données sur les digues et les ouvrages.....	9
I.6.2.Les données hydrologiques.....	9
I.6.3.Les images satellites de zones en eau.....	11
II.Construction du modèle hydraulique du delta intérieur du Niger	11
II.1.Les différents types de modélisation hydraulique.....	11
II.1.1.Modélisation unidimensionnelle.....	11
II.1.2.Modèles à casiers.....	13
II.1.3.Modélisation bidimensionnelle.....	13
II.1.4.Modélisation couplée 1D-2D.....	14
II.2.Objectif et méthode générale.....	14
II.2.1.La modélisation hydraulique couplée déjà effectuée sur la zone.....	14
II.2.2.Méthodologie employée.....	14
II.2.3.Présentation des outils informatiques utilisés.....	14
II.3.Construction du modèle unidimensionnel.....	15
II.3.1.Construction du réseau géométrique du modèle.....	15
II.3.2.Modélisation bief par bief.....	17
II.3.3.Rassemblement des biefs et simulation 1D seule.....	18
II.3.3.1.Définition des paramètres de simulation.....	18
II.3.3.2.Simulation 1D seule.....	18
II.4.Construction du maillage bidimensionnel et couplage.....	19
II.4.1.Construction du maillage du modèle bidimensionnel.....	19
II.4.2.Définition des paramètres de simulation.....	19
II.4.3.Couplage 1D-2D.....	20
II.5.Calage rétro-actif.....	20
II.6.Validation du modèle couplé.....	20
III.Présentation et interprétation des résultats.....	20
III.1.Analyse des débits.....	21
III.2.Analyse des surfaces d'inondation.....	23
III.2.1.Maximums de hauteurs d'eau.....	23
III.2.2.Etendue maximale des débordements : comparaison avec les images MODIS.....	24
III.2.3.Dynamique de l'inondation.....	25
IV.Discussion et perspectives.....	26
IV.1.Particularités du modèle construit.....	26
IV.2.Origines possibles de la sous-estimation de l'étendue des crues.....	26
IV.3.Perspectives.....	27
Conclusion.....	28
Bibliographie.....	29

Introduction

Les grandes plaines inondables, c'est-à-dire des étendues de terre qui deviennent occupées par un cours d'eau lorsqu'il déborde de son lit, se trouvent au cœur d'enjeux environnementaux, sociaux et économiques. Les réservoirs de biodiversité qu'elles offrent se trouvent bouleversés par les aménagements anthropiques. Le delta intérieur du Niger, situé au Mali, est un exemple de grande plaine inondable dont l'hydrologie a été très fortement modifiée par la construction de barrages en amont, et le sera à nouveau. Cette zone d'environ 40 000 km² joue un rôle économique majeur pour le pays, puisqu'elle concentre les usages liés aux crues et aux décrues : pêche, élevage, agriculture. La maîtrise de l'eau s'écoulant dans le bassin versant du Niger est un élément déterminant dans la sécurisation de la production agricole. A l'avenir, trois facteurs vont modifier la répartition spatiale et temporelle de l'eau lors des crues annuelles : la construction d'aménagements hydrauliques, l'augmentation de la population, ainsi que les changements climatiques, dont on ignore encore les conséquences hydrologiques sur le delta (Ferry et al., 2011).

Il est donc capital de pouvoir comprendre l'influence des changements hydrologiques sur la répartition spatiale des débordements lors des inondations, et sur leur durée, pour pouvoir anticiper les perturbations dans les usages de l'eau. C'est pourquoi il est intéressant de mener une étude hydraulique sur la zone. Un modèle hydraulique permet en effet de lier les caractéristiques hydrologiques, comme le débit à l'amont, aux hauteurs d'eau dans le lit mineur et dans la plaine, aux surfaces inondées aux différentes périodes de l'année, et aux durées des inondations.

L'eau se propage dans le delta intérieur du Niger selon deux modes. Elle s'écoule, d'une part, en suivant une direction privilégiée, par les nombreux chenaux, et, d'autre part, dans le lit majeur, lors des crues, où elle sort de son lit mineur. Le type de modélisation hydraulique qui semble le plus pertinent est donc le modèle couplé 1D-2D, qui permet de décrire à la fois la finesse des écoulements en lit mineur, et les écoulements en lit majeur.

Nous nous proposons, dans le cadre de ce stage effectué au sein de l'Unité Mixte de Recherche G-Eau de Montpellier, de construire un modèle hydraulique couplé 1D-2D de la plaine, puis d'envisager différents scénarios à tester par ce modèle. En première partie, nous étudierons les caractéristiques du delta, ainsi que les données utilisées pour la création du modèle ; dans une seconde partie, nous détaillerons la méthode employée pour construire le modèle ; dans une troisième partie, nous étudierons les résultats actuels obtenus, et nous envisagerons différents scénarios susceptibles d'être modélisés, en particulier, un scénario relatif à la construction du barrage de Fomi.

I. Présentation du delta intérieur du Niger (DIN)

I.1. Présentation générale

La région du delta intérieur du Niger est située au centre du Mali, et forme un grand parallélogramme d'axe SO-NE de 400 km de longueur et 125 km de largeur (Ferry et al., 2011). Elle est située en zone sahélienne semi-aride. Elle correspond à l'extension maximale des eaux lors des inondations annuelles, et comprend des lacs périphériques. La surface inondée peut s'étendre jusqu'à 40 000 km², mais varie beaucoup, puisqu'elle peut n'être que de 5000 km² selon les années (Mullens, 2009). Les villes amont du delta sont Ké-Macina, située sur le Niger, et Douna, sur le Bani, qui se jette dans le Niger. La sortie du delta se trouve à Koryoumé, port fluvial de Tombouctou. La carte ci-dessous présente la région, ainsi que sa situation géographique en Afrique.

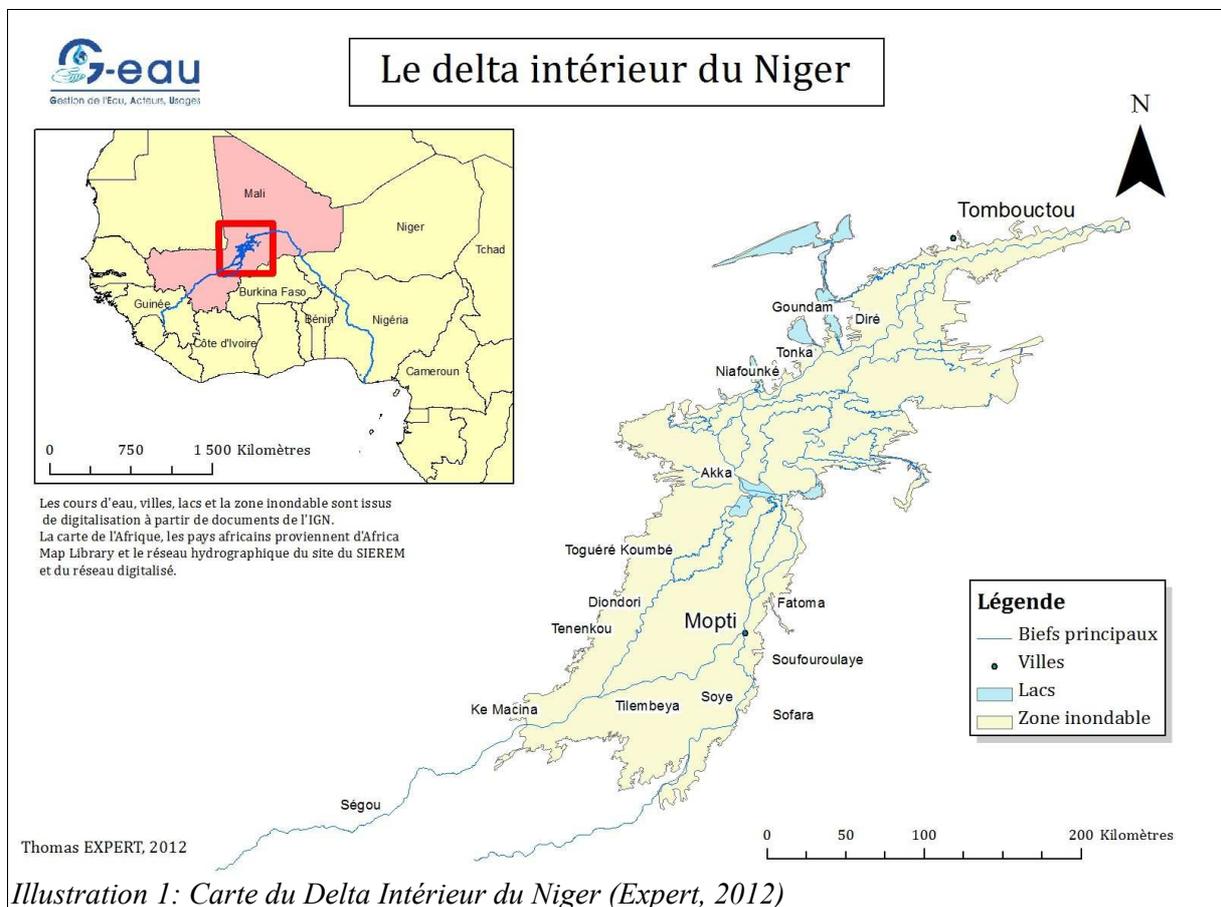


Illustration 1: Carte du Delta Intérieur du Niger (Expert, 2012)

Le delta est formé de nombreuses ramifications, sur un terrain très plat. Sur la surface inondée, on note la présence de nombreux lacs (on compte 17 grands lacs, qui ont tendance à s'assécher au cours du temps) (Marie et al., 2007), sur la rive droite (Korientze, Garou...) comme sur la rive gauche (Oro, Fati, Fauquibine...).

On différencie plusieurs régions :

- Le haut delta, qui s'étend de Ké Macina à la ligne formée par Ténenkou, Kouakourou et Sofara. Il

est alimenté par quelques grands bras : Niger, Diake, Bani, Souman Bani et Mayo Sogona.

- Le moyen delta, qui renferme de vastes plaines inondables.

- Le bas delta, qui couvre 3900 km², et qui comprend les lacs centraux : Waldo Débo, Débo et Korientzé.

- Le nord dunaire, souvent nommé Delta lacustre, qui s'étend du lac Débo jusqu'à Tombouctou. Cette région comporte une vaste zone de dunes parallèles les unes aux autres, et dont les espaces-interdunaires se remplissent au cours de la crue.

I.2. Le climat dans le delta

Le Mali est caractérisé par deux saisons très marquées, une saison sèche, et une saison pluvieuse de 3 à 6 mois (de mai à octobre), avec des vents humides. Les températures les plus élevées sont constatées en avril et mai, et les plus faibles entre décembre et janvier.

La température est le principal facteur d'évaporation, qui est assez forte pendant la période mars-mai.

Les précipitations sont comprises entre 400 et 750 mm dans la partie amont du delta, et entre 150 et 400 dans la partie aval.

Dans les années 1970, le delta a subi une sécheresse très longue (Groupement Coyne et Bellier, 2009).

Les variations climatiques futures restent très méconnues sur le delta.

I.3. Les caractéristiques hydrologiques du delta

La crue annuelle a lieu d'août à novembre, le pic de crue étant atteint vers septembre, selon les lieux sur le delta. En effet, on observe un temps de transfert du pic de crue de l'ordre de 2 mois entre l'amont et l'aval du delta, du fait de la lenteur des écoulements dans la zone, comme le montre la figure suivante :

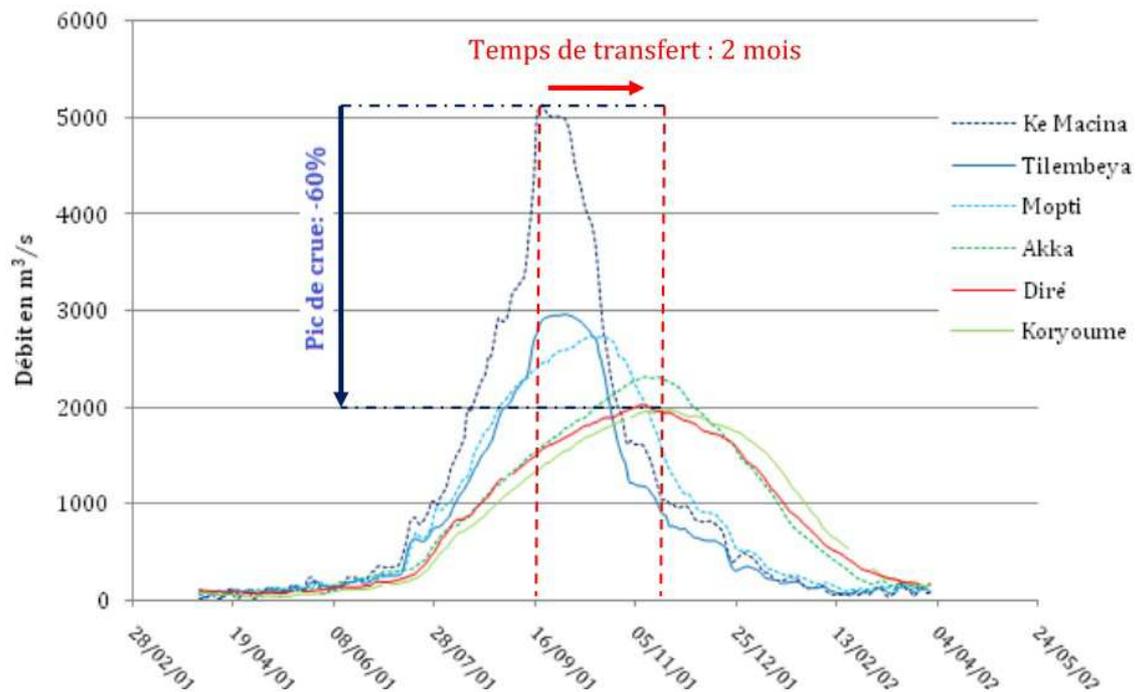


Illustration 2: Hydrogramme de la crue de 2000-2001 en différents points du delta intérieur du Niger (Roy, 2011)

Deux phénomènes se superposent :

- La propagation de l'onde de crue, caractérisée par le temps de transfert du pic de crue entre l'amont et l'aval, qui est d'environ 2 mois.

- L'amortissement de l'onde de crue, caractérisé par la diminution du pic de crue (diminution du débit maximal) de l'amont vers l'aval. L'amortissement est causé par la lenteur des écoulements dans certaines zones, notamment une zone de dunes, au nord-est du delta.

Le débit à l'entrée du delta dépend des ouvrages et de l'utilisation de l'eau en amont (voir plus loin, paragraphe I.5), ainsi que des conditions climatiques. Les pertes de module entre l'amont du delta (Ké Macna et Douna) et Diré sont de l'ordre de 40 %.

Concernant la pluviométrie, [Olivry, 2002] a montré que les précipitations directes ne font que compenser l'infiltration.

Enfin, une caractéristique importante du delta est l'évaporation, qui est de l'ordre de 50 % du volume entrant.

I.4. Les usages de l'eau dans le delta, et leur évolution

Les activités humaines sont très dépendantes des saisons et des crues dans le delta. Les trois usages de l'eau principaux sont l'agriculture, notamment la riziculture, la pêche et l'élevage. (source des données de ce paragraphe : Marie et al., 2007)

- **L'agriculture :**

Une grande partie de l'agriculture du delta est en grande partie de la riziculture. Au Mali, on distingue quatre systèmes de culture du riz :

- La riziculture pluvio-fluviale (système traditionnel) :

Ce système est le système propre à la région du delta. Il ne repose sur aucun aménagement hydraulique. Le riz utilisé est une variété locale de « riz flottant », qui peuvent supporter une submersion de 3 m, à condition que la montée de l'eau ne dépasse pas 5 cm par jour. La rizière n'est pas fixe, mais dépend des conditions annuelles : le riziculteur déplace son champ chaque année en fonction de la hauteur de crue espérée. Ce système est très répandu dans le delta intérieur : il occupait en 2007 une surface de 180 000 à 200 000 ha. Il est caractérisé par des rendements très bas, et une incertitude des rendements, qui sont complètement dépendants des inondations. C'est pourquoi les rizières sont très mobiles, en particulier lors des années de mauvaises crues successives.

- La submersion contrôlée :

Ce type de riziculture repose sur des aménagements financés et gérés par des organismes publics, comme l'Office Riz Mopti (ORM). Il utilise la même variété de riz que pour le système traditionnel. Le principe est de contrôler la submersion au moyen de digues et de prises d'eau, situés à une cote donnée. La culture est donc censée moins dépendre de la crue que dans le système traditionnel. Cependant, ces ouvrages ont été construits à la fin des années 1960, période à laquelle les crues étaient de forte intensité, et relativement régulières. Aujourd'hui, ils sont placés à des cotes trop élevées, ce qui les rend inadaptés aux crues faibles, devenues fréquentes. Ce système de riziculture a donc actuellement des rendements très faibles, et d'autre part, est un système beaucoup moins souple que le système traditionnel.

- L'irrigation en maîtrise totale de l'eau par système gravitaire :

Ce système concerne l'amont du delta. Il s'agit des grands aménagements de l'Office du Niger, qui s'appuient sur les barrages. L'eau est conduite vers les parcelles par un système de canaux. La production représente 80 % de la production annuelle de riz du pays, grâce aux rendements importants. Mais les problèmes posés par ce type d'agriculture se retrouvent à l'aval des aménagements, et donc en particulier dans la région du delta intérieur : les prélèvements sur le fleuve sont très importants (en étiage : plus de 50 % du débit du fleuve, mais également en période de crue).

- L'irrigation en maîtrise totale de l'eau par pompage :

Elle s'est développée avec la réduction de l'intensité des crues et de la pluviométrie, au début des années 1980. Dans le delta, cela concerne la région de Mopti.

En plus de la riziculture, on trouve également une agriculture de décrue, en particulier dans la région des lacs : de fin janvier à début février, quand l'eau de la crue commence à se retirer, sorgho, tubercules ou légumes sont mis en culture. Ces cultures constituent un apport alimentaire de subsistance très important pour les populations locales, et dépendent fortement des superficies inondées.

- **La pêche :**

La pêche provient en très grande majorité du delta intérieur (40 000 à 120 000 t/an). Cette forte production assure au Mali une quasi auto-suffisance en poisson. La pêche se déroule pendant la décrue et l'étiage : elle commence de façon intensive au début de la décrue (novembre / décembre), puis se poursuit jusqu'à la montée de la crue suivante (fin juin). La production halieutique est donc très dépendante de l'inondation, en particulier de son ampleur et de sa durée.

- **L'élevage :**

Le delta intérieur joue un rôle très important dans l'élevage dans ce pays : son cheptel représente 20 % du cheptel national. Cela s'explique du fait des inondations annuelles, qui rendent ses pâturages très productifs. Les pasteurs amènent leurs troupeaux en novembre-décembre, selon la vitesse de la décrue. Ils repartent lorsque le delta devient submergé (août), et partent en transhumance vers les pâturages du Sahel. Ainsi, l'élevage dépend fortement des caractéristiques des crues.

Les différents usages de l'eau du delta intérieur, qui jouent un rôle très important pour l'économie malienne, sont tous très dépendants des inondations : de leur ampleur, de la surface inondée et de la durée de submersion. Ces propriétés des crues sont modifiées par les aménagements anthropiques,

I.5. Les constructions hydrauliques en place et futures

Le Niger est encore aujourd'hui un fleuve relativement peu aménagé, au regard d'autres grands fleuves du monde. Ceci vaut particulièrement pour son cours supérieur et moyen (jusqu'à Niamey), où il n'existe pour l'instant que quatre ouvrages effectifs, tous situés au Mali : les ouvrages de Sélingué, Sotuba, Markala et Talo, dont la figure ci-dessous présente la position géographique.

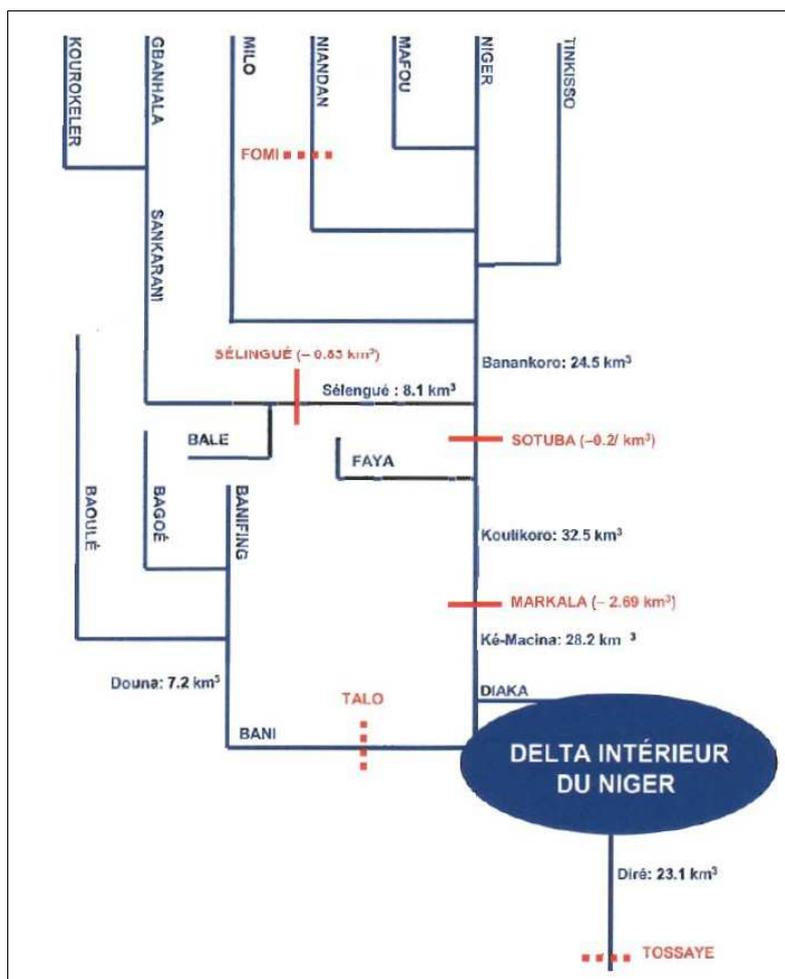


Illustration 3: Positions des barrages du fleuve dans le Haut Niger. Les pointillés représentent un barrage en projet (le barrage de Talo a été mis en service en 2006). Les débits indiqués sont les débits moyens annuels de la période 1970-1998. (Zwarts et al., 2005)

Ces ouvrages ont deux fonctions : la production énergétique et l'irrigation. Le barrage de Sélingué et celui de Sotuba sont dédiés presque exclusivement à la production d'énergie, tandis que la fonction des ouvrages de Markala et de Talo est l'alimentation par gravité des périmètres irrigués par l'Office du Niger. Les impacts des ouvrages de Sélingé, Sotuba et Markala sur les apports en eau à l'aval sont résumés dans le tableau suivant :

Ouvrage	Fonction	Effet sur la disponibilité en eau à l'aval en période de crue	Effet sur la disponibilité en eau à l'aval en période d'étiage
Sélingué	Production d'énergie (stockage / déstockage)	Négatif, assez important (-400 m ³ /s)	Positif, très important (+70 à +120 m ³ /s)
Sotuba	Production d'énergie (au fil de l'eau)	Négligeable	Négligeable
Markala	Prélèvement : irrigation	Négatif, assez faible (-125 m ³ /s)	Négatif, important (-70 m ³ /s)

Tableau 1: Impacts des ouvrages sur le delta intérieur selon la saison (l'importance de l'impact est relative au débit de la saison) (d'après Marie, 2007)

Comme le montre le schéma ci-dessus, d'autres barrages sont en projet. Le projet du barrage de Fomi, en Guinée, qui aurait pour objectif de produire de l'électricité, aurait un fort impact sur le régime des inondations dans le delta intérieur, notamment par son fort écrêtage de la crue.

I.6. Les données utilisées pour la modélisation hydraulique

I.6.1. Les données topographiques

Les relevés topographiques étant relativement peu nombreux au vu du faible dénivelé du terrain, des images satellitaires sont utilisées en complément pour connaître mieux la topographie du terrain, notamment pour la construction du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

I.6.1.1. La topographie des lits mineurs

Le tracé des biefs se fait à partir des cartes IGN au 50 000^{ème} publiées en 1956. La description de la topographie à l'intérieur des lits mineurs se fait à partir de profils en travers :

- Les profils IGN

On possède les relevés terrain de l'IGN, réalisés en 1982. On ne connaît pas les incertitudes (XY et altitude) de cette source de données.

- Les profils ADCP

Ces profils ont été réalisés lors de deux campagnes de mesure, en 2008 et 2009 (Belaud et al., 2009). L'instrument utilisé est un profileur de vitesse à effet doppler ADCP. Il est utilisé pour connaître le débit d'un cours d'eau, et permet en même temps de savoir la profondeur. En repérant l'altitude des berges, soit par GPS, soit par rapport à une borne altimétrique, on peut définir l'altitude du fond dans le système altimétrique de référence NGAO (Paris, 2010).

L'illustration 4 montre la localisation des points de relevés des profils dans le delta :

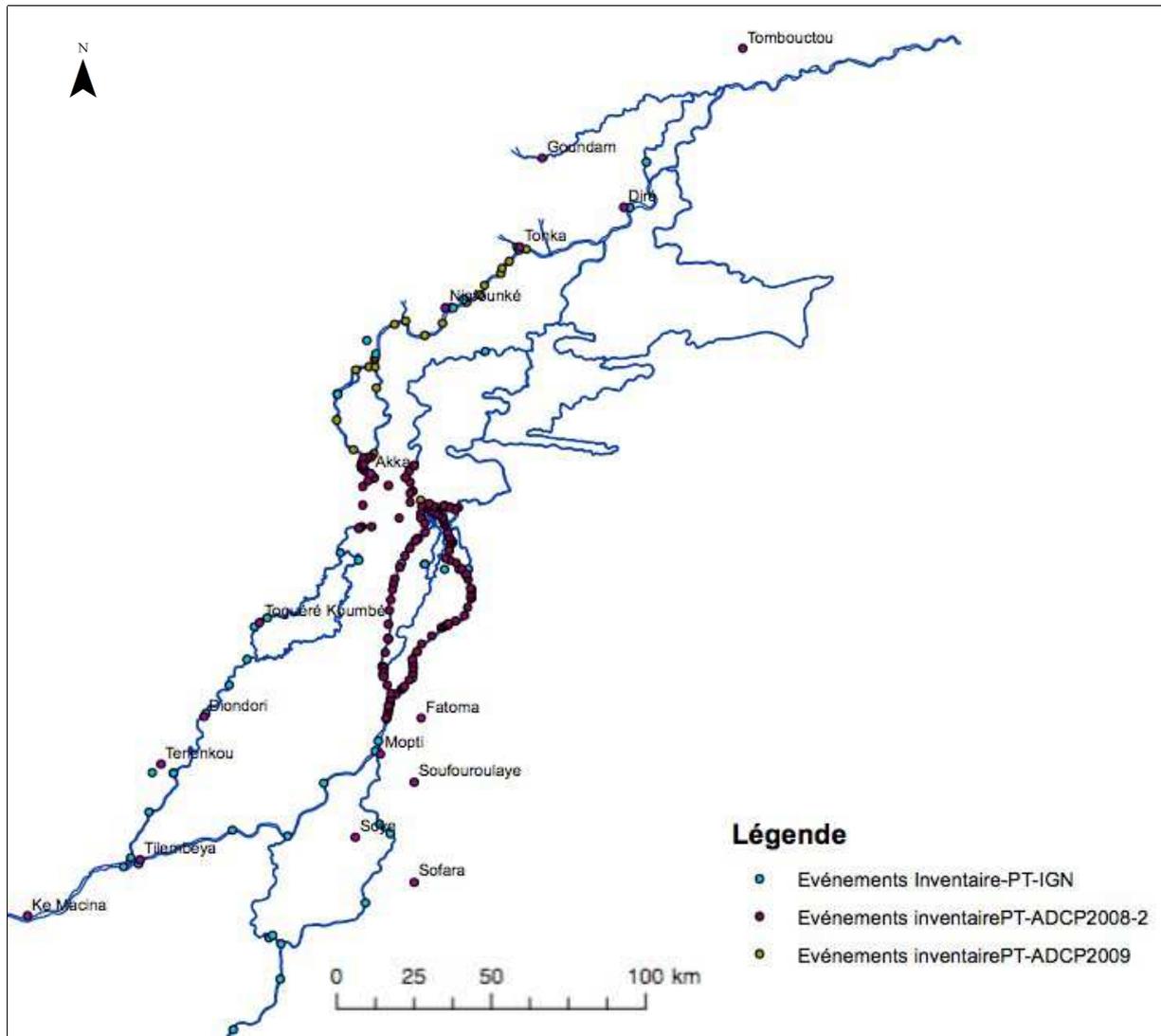


Illustration 4: Profils transversaux réalisés sur le delta intérieur du Niger

I.6.1.2. La topographie du lit majeur

Le lit majeur est l'ensemble du delta qui n'a pas été représenté par le réseau, et qui est inondable. Pour pallier le manque de données topographiques de terrain, on choisit d'utiliser également des données d'origine satellitaires dans le MNT.

- Les données topographiques de terrain

On possède quelques points cotés relevés par l'IGN, au niveau des rares aménagements humains sur le delta : digues ou routes, et casiers rizicoles. Ces données, bien qu'on n'en connaisse pas l'incertitude exacte, sont considérées de bonne qualité.

- Les données topographiques satellitaires

On utilise les données topographiques satellitaires SRTM3, distribuées par la NGA et la NASA. Brutes, elles correspondent à un MNT de résolution spatiale 90m, avec une incertitude altimétrique à 90 % de l'ordre de 5 m. Ces données sont ensuite retravaillées pour gagner en précision altimétrique et planimétrique. On obtient alors un MNT d'une incertitude altimétrique de 1,5 m sur l'amont du delta, et de 1,8 m sur l'aval (Paris, 2010). Malgré les améliorations, les incertitudes du MNT obtenu restent importantes.

I.6.1.3. Les données sur les digues et les ouvrages

Les digues sont localisées à l'aide des cartes IGN au 50 000^{ème} et au 200 000^{ème}. Le même travail est effectué pour les ouvrages (vannes, buses), en s'appuyant sur Google Earth®. Par manque de temps, ces aménagements ne seront pas implémentés dans le modèle hydraulique.

I.6.2. Les données hydrologiques

Les données de débits et de hauteurs d'eau proviennent des stations de la Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali (DNH), localisées sur l'illustration 5 :

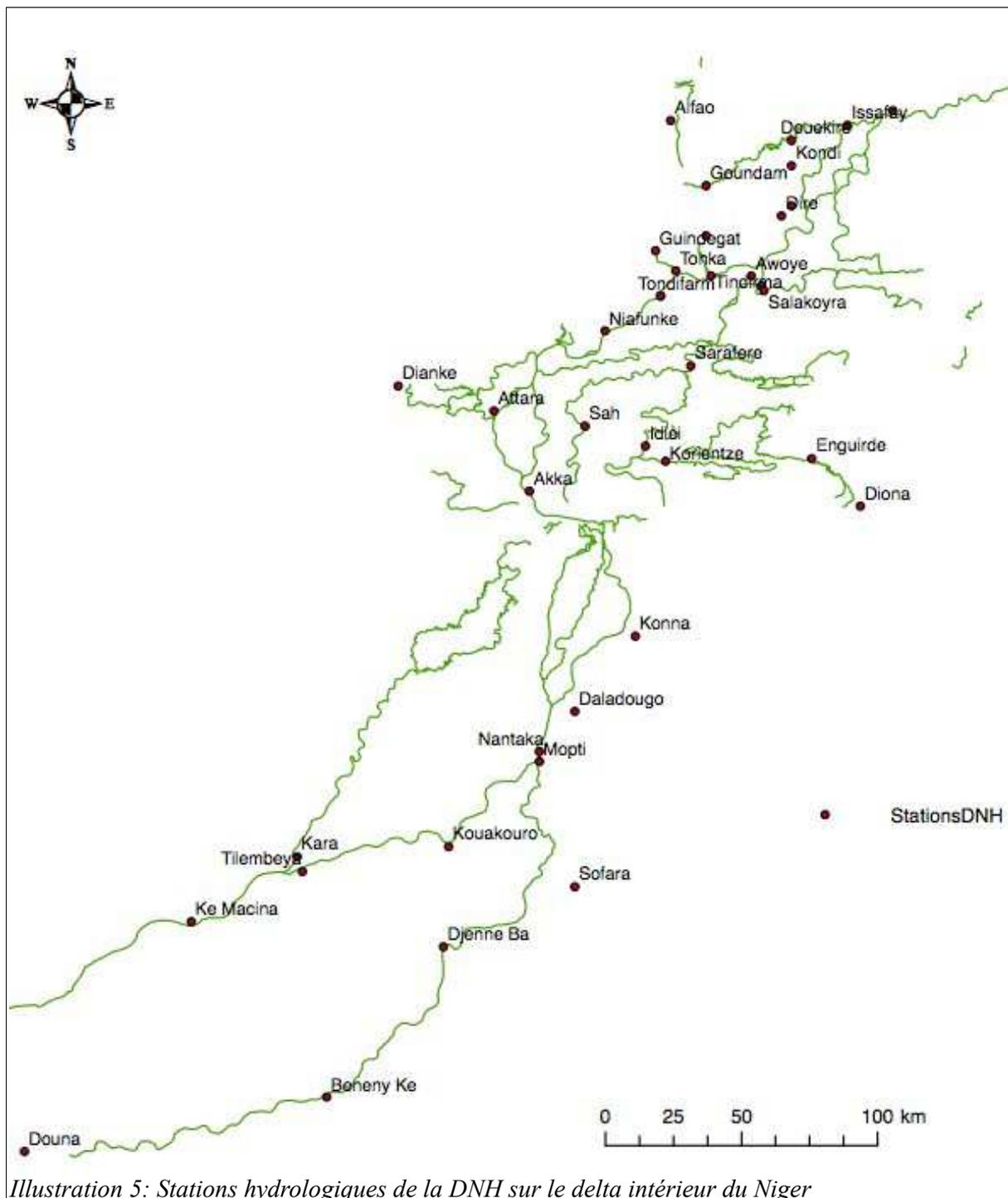


Illustration 5: Stations hydrologiques de la DNH sur le delta intérieur du Niger

Les données pluviométriques sont relevées par le service Climatologie de la Direction Nationale de la Météorologie de Bamako, qui possède 20 postes pluviométriques sur le delta. Elles ne sont pas encore intégrées au modèle, tout comme l'évaporation.

Les crues utilisées pour le calage du modèle sont les crues de 2000-2001 et 2004-2005. Ce sont des crues pour lesquelles on possède des images MODIS. La crue de 2000-2001 est une crue moyenne à forte, celle de 2004-2005 est une crue faible. Ainsi, on a deux crues d'ampleur différente pour créer un modèle adaptable à différents types de crue.

1.6.3. Les images satellites de zones en eau

Des images satellites sont utilisées pour le suivi des surfaces en eau au cours d'une crue. Elles sont obtenues par le capteur MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer). Un travail a été effectué en 2008 (Oleksiak, 2008) pour traiter en binaire les surfaces en eau, à une fréquence temporelle de 8 jours. Elles seront utilisées pour la validation du modèle couplé obtenu. La difficulté dans l'utilisation de ces images réside dans la présence de nuages, qui les bruitent.

II. Construction du modèle hydraulique du delta intérieur du Niger

Avant de détailler les différentes étapes de la méthode employée dans le cas du modèle, étudions les différentes sortes de modélisations hydrauliques qui existent.

II.1. Les différents types de modélisation hydraulique

Les modélisations hydrauliques reposent pour la plupart sur les équations de Barré Saint-Venant, simplifiées. Selon le résultat de la modélisation que l'on veut obtenir, et selon les caractéristiques de la zone étudiée, on peut choisir d'utiliser une modélisation unidimensionnelle, bidimensionnelle ou couplée unidimensionnelle-bidimensionnelle.

Le delta intérieur du fleuve Niger a été modélisé de différentes façons. Les principales particularités de la zone qui influent sur le choix de la modélisation sont les suivantes :

- le peu de données hydrologiques et topographiques possédées pour établir le modèle ;
- la très forte platitude de la région, qui rend les écoulements très lents, et donne plus d'impact à la précision des mesures topographiques ;
- les débordements importants en lit majeur ;
- la présence de nombreuses cuvettes, dont les caractéristiques géométriques ne sont pas connues.

II.1.1. Modélisation unidimensionnelle

On étudie les écoulements dans une rivière, pouvant être schématisée dans un plan (Ox, Oy, Oz) :

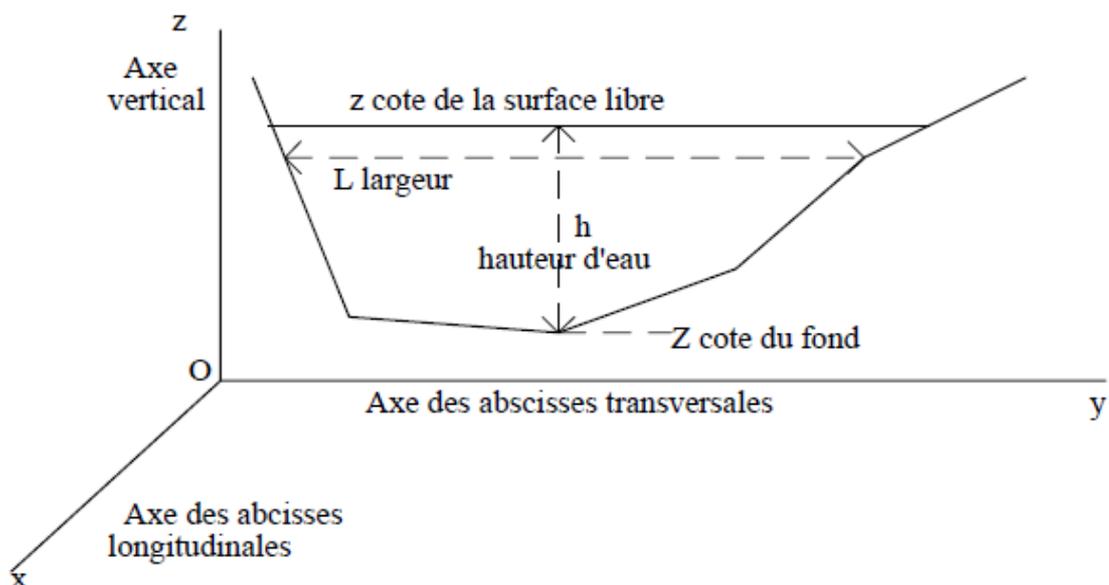


Illustration 6: Schéma d'une rivière dans une approche unidimensionnelle (Paquier, 2002)

Les modélisations des écoulements en rivière reposent sur deux principes :

- le principe de conservation de la masse : tout volume d'eau entrant dans un pavé étudié se retrouve soit dans ce pavé, ce qui se traduit par une augmentation du volume d'eau dans le pavé, soit dans le flux sortant. On peut ensuite remplacer le volume par la masse en estimant la masse volumique de l'eau constante (hypothèse de fluide incompressible) ;

- le principe de conservation de la quantité de mouvement.

Ainsi, ces principes se traduisent en unidimensionnel par les deux équations de Saint Venant suivantes :

$$(1) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$(2) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/S)}{\partial x} + gS \frac{\partial h}{\partial x} = gS(J_f - J_e) + (\varepsilon - 1)qU$$

Avec :

- t : le temps

- x : l'abscisse longitudinale

- h : la cote de la surface libre

- S : la section mouillée

- Q : le débit

- β : le coefficient de quantité de mouvement ou de Boussinesq. β est un coefficient correcteur (valeur proche de 1) qui prend en compte la répartition réelle des vitesses à l'intérieur de la section en travers.

- J_e : la pente énergétique, qui correspond aux pertes de charge dues aux frottements

- J_f : la pente de fond

- U : la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section

- q : le débit d'apport latéral

- ε : nombre bouléen : il vaut 0 si le débit latéral est sortant, et 1 si le débit latéral est entrant.

Le terme J_e peut être explicité par la relation de Chézy :

$$J_e = \frac{U^2}{C^2 R_h}$$

Avec :

- R_h : le rayon hydraulique

- C : le coefficient de résistance de Chézy.

Ce coefficient peut être exprimé par la formule empirique de Manning-Strickler suivante :

$$C = K_s R_h^{1/6}$$

où K_s est le coefficient de Strickler.

Pour modéliser une rivière en une dimension, il faut que les dimensions (horizontale et verticale) des sections en travers soient petites devant la dimension longitudinale. Les hypothèses suivantes doivent être vérifiées :

- la pente longitudinale doit être faible
- les courbes doivent être peu accusées
- les accélérations verticales doivent être faibles

- la vitesse longitudinale doit être homogène dans la section en travers (même si le coefficient β permet en partie de prendre en compte l'hétérogénéité de la vitesse longitudinale).

Par conséquent, la présence de lits multiples pose problème dans la modélisation unidimensionnelle. On peut alors modéliser la rivière par plusieurs modélisations 1D, une pour chaque lit, et en faisant la jonction entre les lits par des relations débits-niveaux d'eau.

La modélisation unidimensionnelle est adaptée dans le cas de cours d'eau dont le lit mineur est clairement délimité, et où les débordements ne sont pas très importants.

En revanche, dans le cas du delta intérieur du Niger, une modélisation unidimensionnelle seule ne semble pas suffire, du fait des débordements importants : il faut intégrer une autre dynamique d'écoulement que celle du lit mineur : celle du lit majeur.

II.1.2. Modèles à casiers

Le modèle à casiers consiste à rajouter au modèle unidimensionnel des zones de stockage en cas de débordements. Ces réservoirs sont régis par des lois de remplissage/vidange.

Ainsi, le lit mineur est modélisé par des sections en travers, ainsi qu'une partie du lit majeur, si on peut le modéliser par un lit composé. Ces zones couvertes par des profils en travers sont donc étudiées par la résolution des équations de Barré Saint Venant unidimensionnelles. Le reste du lit majeur, lui, est représenté par des casiers, séparés du lit majeur actif, et ne participant pas à l'écoulement : les vitesses doivent être nulles dans les casiers (Proust, 2006). Chaque casier est caractérisé par une loi géométrique reliant la capacité de stockage de la zone et le niveau d'eau. On utilise des liaisons hydrauliques représentant les différents obstacles ou lieux de passage de l'eau, comme des digues, des remblais ou des déversoirs, pour relier les casiers au lit mineur et entre eux.

Ce type de modélisation se trouve à mi-chemin entre la modélisation unidimensionnelle et la modélisation bidimensionnelle, puisqu'elle distingue le lit mineur des zones d'inondation ne participant pas à l'écoulement.

Historiquement, il a précédé la modélisation bidimensionnelle, mais est actuellement toujours très utilisé, car il est moins complexe que celle-ci. Il se prête particulièrement bien à l'étude de crues de cours d'eau très endigués, dont les zones de stockage de la crue (champs d'expansion) participent peu à l'écoulement.

Ce type de modèle a été établi sur le delta intérieur, en 1977 par SOGREAH tout d'abord, puis revu (dernière version en 1995). Il représente le réseau du delta intérieur du Niger de façon assez sommaire, puisque sa topographie ne contient qu'un profil tous les 20 km en moyenne (SOGREAH, 2005). Il utilise l'outil CARIMA. Les crues de référence utilisées ont été les crues de 1969-1970 et 1975-1976.

II.1.3. Modélisation bidimensionnelle

Cependant, dans le cas des crues, il y a variation de la structure de la rivière, avec créations et disparitions de bras au cours du temps, disparition d'îles... De plus, lorsqu'il y a débordement, il n'y a plus un axe de direction de flux privilégié, comme ce doit être le cas en modélisation unidimensionnelle (axe longitudinal). Cela impose donc de passer à une modélisation de type bidimensionnelle, qui repose sur les mêmes hypothèses, sauf celle de l'axe privilégié d'écoulement, et qui est portée par les équations de Saint Venant bidimensionnelles.

La plaine d'inondation n'est alors plus décrite par un ensemble de profils en travers, mais par un maillage, qui peut être créé plus ou moins fin selon les zones, dont chaque nœud est associé à une cote de fond, et où différents coefficients de frottement sont attribués selon les zones. On distingue en effet différents types de zones pour le choix du maillage et des coefficients de frottement :

- le lit mineur, où l'on choisit un maillage orienté selon l'axe de l'écoulement ;
- le lit majeur, dont le maillage est choisi désorienté, de façon à ne pas influencer sur l'écoulement ;

- les linéaires de digues, dont le maillage doit être plus raffiné.
Une telle modélisation a été réalisée sur le delta en 2011 (Roy, 2011).

II.1.4. Modélisation couplée 1D-2D

Les calculs étant beaucoup plus lourds pour la résolution des équations de Saint Venant bidimensionnelles, le temps de calcul peut être beaucoup trop long. Si de plus le lit de la rivière à modéliser est marqué, malgré les débordements, on peut alors envisager de coupler les deux approches : unidimensionnelle et bidimensionnelle.

C'est ici l'étude qui paraît la plus appropriée. En effet, dans le delta central, les lits principaux sont marqués, en particulier concernant le Niger / Bara Issa.

Une modélisation hydraulique couplée 1D-2D du delta intérieur du Niger a été conduite à l'aide du modèle LISFLOOD-FP (Zahera, 2011). Elle utilise des données SRTM pour la topographie, et se veut donc simple (pas d'utilisation de profils de lits mineurs). L'objet de notre étude est la réalisation d'une modélisation couplée qui s'appuie, pour la description des lits mineurs, sur des relevés topographiques (profils IGN et ADCP) ; ce travail a été commencé en 2012, jusqu'à Mopti (Expert, 2012).

L'intérêt par rapport au projet LISFLOOD-FP et au modèle 2D antérieur est double : d'une part, affiner la description des écoulements en lit mineur ; d'autre part, améliorer les temps de calcul, qui sont très importants dans le modèle bidimensionnel (de l'ordre de plusieurs semaines pour une crue).

II.2. Objectif et méthode générale

II.2.1. La modélisation hydraulique couplée déjà effectuée sur la zone

La partie amont du delta, qui s'étend jusqu'à Mopti, a déjà fait l'objet d'une modélisation hydraulique couplée 1D-2D de la même nature que celle à réaliser. Il reste donc la partie en aval de Mopti jusqu'à Tombouctou à modéliser.

II.2.2. Méthodologie employée

• Hypothèses de la modélisation

Pour utiliser les équations de Barré Saint-Venant, la zone d'étude doit vérifier les conditions suivantes : avoir une pente faible, et des variations lentes de débit. Ces hypothèses sont vérifiées sur le delta.

• Etapes de la modélisation

La construction du modèle couplé consiste en plusieurs étapes :

- La première étape consiste en la construction du modèle unidimensionnel. Tout d'abord, il faut définir le réseau hydraulique sur lequel s'appuyer ; ensuite, il faut tracer la géométrie des biefs définis par ce réseau, en utilisant les profils IGN et ADCP que l'on a. Puis, il faut définir le maillage 1D, formé par les profils, ainsi que les conditions initiales, bief par bief. On peut ensuite regrouper les différents biefs, pour obtenir un modèle unidimensionnel multibief.
- La seconde étape est la construction du maillage bidimensionnel. Celui-ci doit avoir ses limites exactement au niveau des limites des biefs unidimensionnels.
- Enfin, on couple le maillage bidimensionnel avec le modèle unidimensionnel.

II.2.3. Présentation des outils informatiques utilisés

La construction du modèle couplé s'est appuyée sur différents outils informatiques :

- Un logiciel de modélisation hydraulique : Rubar, qui repose sur les équations de Barré Saint-Venant. Différentes versions existent selon le type de modélisation (unidimensionnelle,

bidimensionnelle ou couplée).

- Un logiciel de visualisation et de modification de points, sections et des maillages bidimensionnels, et de visualisation des résultats des modélisations couplées : Fudaar.
- Différents exécutable pour la création de l'ensemble des profils et des maillages.

II.3. Construction du modèle unidimensionnel

La crue utilisée pour établir le calage du modèle a été la crue 2000-2001 ; c'est une crue pour laquelle on possède beaucoup de données hydrologiques, et qui est une crue moyenne, comparée aux autres crues de ces dernières années.

II.3.1. Construction du réseau géométrique du modèle

La construction du réseau géométrique du modèle repose sur les cartes IGN au 50 000^{ème} de la zone. Pour compléter, on s'appuie également sur Google Earth®. Sous ArcGis, on trace sur ces cartes des polygones suivant les lits mineurs du delta. De plus, tous les biefs visibles ne sont pas représentés, pour plusieurs raisons :

- le nombre de biefs est très important, le tracé de certains biefs varie d'une année à l'autre, et certains sont presque chaque année à sec ;
- de nombreux biefs, très fins, ont a priori un débit très faible, et leur absence dans le modèle unidimensionnel doit donc avoir une influence négligeable sur le débit dans les biefs principaux ;
- de nombreux biefs n'ont aucune donnée topologique ni hydrologique connue, en particulier à l'est du delta, où il n'y a pas de profil transversal ;
- en outre, un tronçon non représenté dans la modélisation unidimensionnelle pourra être pris en compte dans la modélisation bidimensionnelle, si les données topographiques sont assez fines pour le décrire, autrement dit, si les variations d'altitude correspondant au lit du tronçon peuvent être décrites par un pas d'espace de 90 m.

D'autre part, le réseau sera représenté par un ensemble de profils transversaux espacés d'1 km les uns des autres en moyenne ; les méandres de diamètre inférieur à 2-3 km seraient donc très mal représentés, et on choisit de ne pas les prendre en compte dans le tracé du réseau.

Le réseau obtenu, présenté sur la figure ci-dessous, caractérise chaque bief par un numéro d'identification et une longueur.

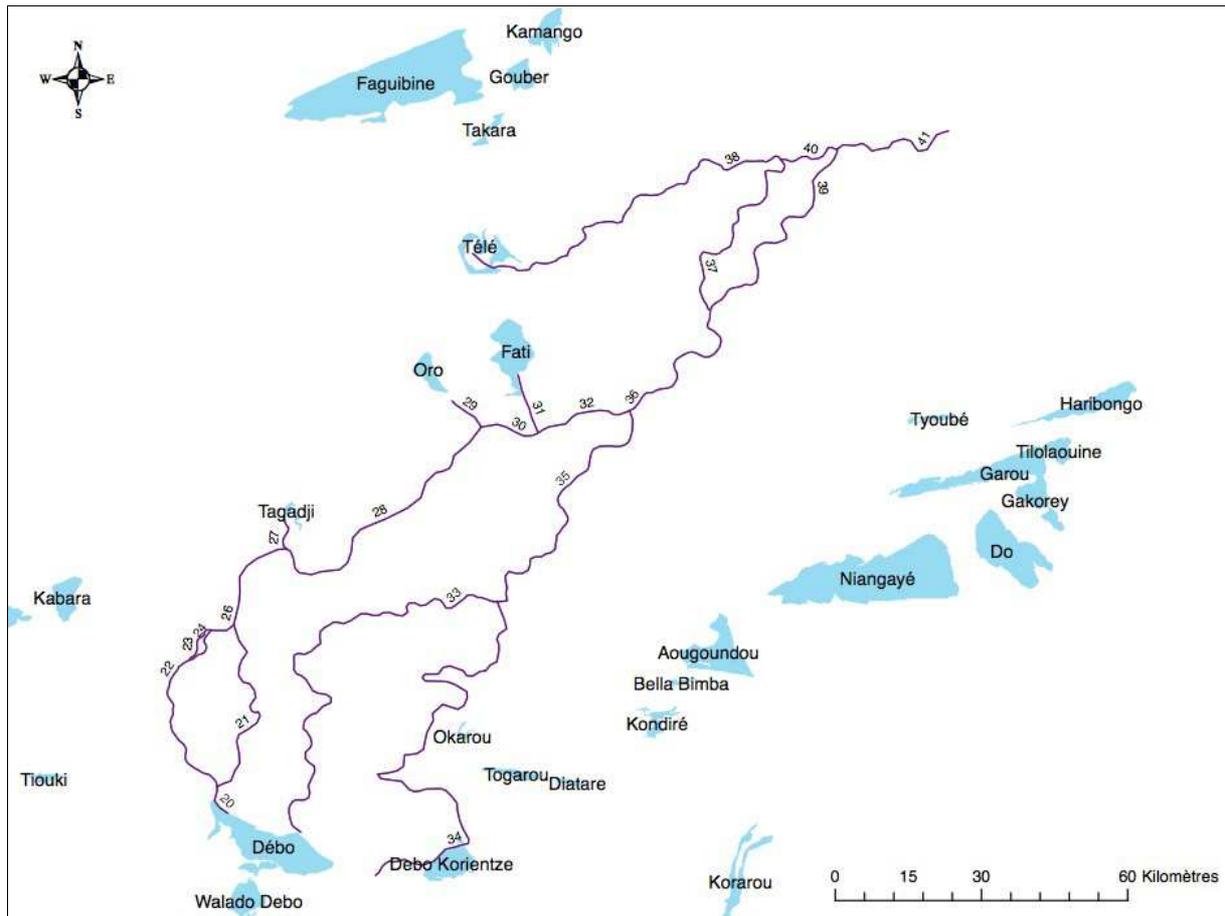


Illustration 7: Réseau du delta en aval du lac Débo

N° bief	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
longueur (km)	6,8	36	33	8,7	8,9	5,1	22	7,5	58	8,2	12
N° bief	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
longueur (km)	13	20	101	60	19	37	46	79	43	13	77

Illustration 8: Longueur des biefs du réseau aval du lac Débo

Le réseau hydraulique commence (amont) au lac Débo, aval du réseau dont on possède déjà le modèle couplé. La numérotation des biefs se fait en cohérence avec le précédent réseau (qui représentait la zone en amont de Mopti). Le cours d'eau principal est le Niger, qui concentre, depuis le lac Débo jusqu'à l'aval du réseau, la majeure partie du débit. Le cours d'eau secondaire, le Bara Issa, prend sa source au lac Débo, puis se jette dans le Niger à l'aval du réseau. L'ouest du réseau est composé de quelques cours d'eau affluant du Niger qui alimentent des lacs. L'est est plus difficilement modélisable en 1D : les affluents du Bara Issa sont des cours d'eau temporaires et dont le tracé varie. En particulier, une zone de dunes près de la confluence entre le Bara Issa et le Niger sera ignorée dans le modèle unidimensionnel, et réservée au modèle bidimensionnel. On représente en revanche les biefs qui alimentent des lacs à l'est.

Un cours d'eau d'alimentation d'un lac sera confondu avec un cours d'eau prenant sa source dans ce

lac, même si le lit mineur n'est pas clairement visible à l'intérieur du lac, pour deux raisons :

- réduire le nombre de biefs, et ainsi simplifier le travail de modélisation,
- améliorer le couplage 1D-2D, et diminuer le temps de calcul.

Dans ce cas, le lit mineur est représenté rectiligne.

II.3.2. Modélisation bief par bief

Pour chaque bief, on réalise une interpolation des profils transversaux existants, de sorte que le bief puisse être décrit uniquement par ses profils transversaux, avec un pas d'espace de 1 km. Ce choix du pas d'espace a été fait de façon à décrire les écoulements de façon assez précise, tout en ayant des temps de calculs qui ne soient pas trop longs (de l'ordre de 12h pour le modèle couplé). Les berges du bief sont délimitées à partir des cartes IGN au 50 000^{ème}.

Les différents biefs doivent être logiques les uns par rapport aux autres : les profils au niveau d'une jonction doivent être cohérents. Pour la réalisation d'un ensemble de profils transversaux correspondant à un bief, il faut avoir défini préalablement au moins trois profils : un profil amont, un profil intermédiaire et un profil aval.

Pour les biefs ne possédant pas ces trois profils, voire aucun profil, dans les données utilisées, ADCP ou IGN, ces profils sont à inventer. On s'appuie alors sur les données SRTM pour les altitudes, sur Google Earth et les cartes IGN au 50 000^{ème} pour la largeur du profil. On peut également s'appuyer sur les courbes de débitance faites par l'IGN en différents points du delta, qui permet de relier l'altitude en deux points des deux rives à l'aire que fait le plan d'eau correspondant. On peut ainsi obtenir un profil reconstitué.

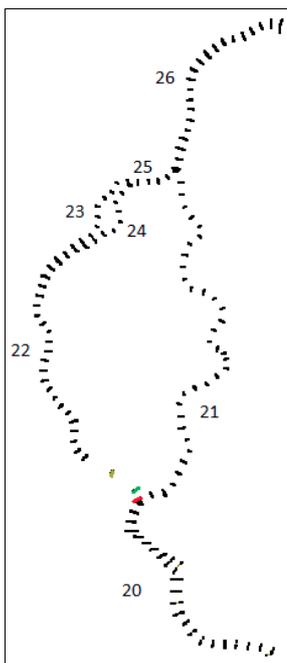


Illustration 9: Profils interpolés des biefs 20 à 26 (vue du dessus)

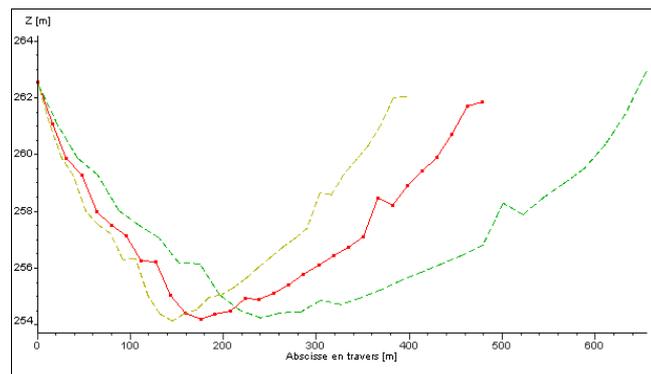


Illustration 10: Exemples de profils interpolés (premiers profils du bief 22) (vue en coupe)

Une fois l'ensemble de profils d'un bief réalisé, on réalise une simulation hydraulique sur ce bief, à débit amont constant. Cette simulation en régime permanent permet d'obtenir les fichiers de géométrie du bief, ainsi qu'une ligne d'eau initiale pouvant être utilisée après regroupement des

biefs.

On doit choisir pour cette simulation des conditions initiales et des conditions aux limites :

- Condition limite amont : on choisit pour tous les biefs le débit correspondant environ au débit qu'ils reçoivent au début de la crue 2000-2001 : pour les biefs dont le débit amont a été mesuré, on utilise la mesure du débit du début de cette crue ; pour les autres biefs, on impose un débit logique par rapport aux autres tronçons. Par exemple, si un bief amont de deux autres biefs a un débit connu Q , on attribuera aux deux biefs aval, de débit amont inconnu, un débit de $n\%$ de Q et de $(100-n)\%$ de Q , selon la taille relative des deux biefs.

- Condition limite avale : on choisit le flux libre comme condition limite avale, sauf pour les biefs dont la pente est positive. On choisit alors d'entrer en condition avale une cote constante, telle que le tirant d'eau à l'aval soit d'environ 3 m.

- Conditions initiales : les conditions initiales choisies sont les suivantes : un débit identique au débit limite amont appliqué, et une hauteur d'eau de 2 m, considérée comme standard par rapport au débit appliqué.

On obtient ainsi pour chaque bief une ligne d'eau initiale à appliquer lors du regroupement des biefs.

On peut alors passer à la modélisation unidimensionnelle de l'ensemble des biefs.

II.3.3. Rassemblement des biefs et simulation 1D seule

On rassemble les géométries de chaque bief, en définissant l'ordre des biefs ainsi que les relations entre les biefs : confluence / défluence. Puis on définit les paramètres de simulation.

II.3.3.1. Définition des paramètres de simulation

- **Frottement au fond**

Pour régler le frottement au fond, on utilise le coefficient de Strickler, qu'on fixe identique pour tous les biefs (pour un premier modèle, qui pourra être affiné par la suite). On utilise les valeurs établies par [Roy, 2011], s'appuyant sur le rapport de [Sogreah, 1984] :

- En lit mineur, on applique un coefficient de Strickler de 35 : fonds réguliers peu pentus, larges et abritant pas ou peu de végétation

- En lit majeur, on applique un coefficient de 25 : végétation rare, de type prairie à petits arbustes.

- **Conditions aux limites**

- A l'amont du modèle, on entre les chroniques de débit de l'année 2000-2001.

- A l'aval du modèle, on entre la condition flux libre, ce qui correspond à fixer les dérivées des variables de calcul à 0 à la sortie.

- **Conditions initiales**

On utilise les résultats obtenus (hauteur d'eau, vitesse) par les simulations bief par bief en régime permanent pour établir les conditions initiales. La durée de la simulation est de toute façon grande, et commence suffisamment tôt avant l'événement de crue, pour absorber la condition initiale.

II.3.3.2. Simulation 1D seule

On effectue ensuite la simulation unidimensionnelle seule, afin de vérifier la stabilité du modèle. Cependant, on n'effectue pas de calage à partir de ce seul modèle, étant donné qu'il ne tient pas compte des débordements.

II.4. Construction du maillage bidimensionnel et couplage

II.4.1. Construction du maillage du modèle bidimensionnel

On souhaite obtenir un ensemble de mailles, d'1 km de côté chacune environ, et pour lequel une altitude est attribuée à chaque sommet. Ce maillage doit être juxtaposable au modèle unidimensionnel précédemment construit.

Pour cela, on procède par différentes étapes :

- Tout d'abord, on découpe la zone d'étude en sous-zones, délimitées par la bordure d'un bief 1D, ou une limite externe de la zone d'étude, ou par la frontière avec une autre sous-zone. Ce découpage permet d'une part d'obtenir plus facilement l'ensemble de profils dont on a besoin ; d'autre part, il permet d'obtenir un maillage optimisant le nombre de mailles : des mailles d'1 km de côté pour les régions standards, des mailles plus petites pour les régions très méandrées.

- Une fois une sous-zone découpée, on crée sur celle-ci un ensemble de profils espacés d'1km les uns des autres environ (ou moins dans le cas d'une région méandrée), et constitués chacun de points espacés d'environ 1 km également, et pour l'instant d'altitude nulle. Ces « profils » seront par la suite des arêtes du maillage.

La difficulté de cette étape réside dans la création de profils dont les extrémités correspondent précisément à une extrémité de profil d'un bief du modèle unidimensionnel.

- On attribue ensuite à chacun des points des profils une altitude, interpolée à partir du SRTM. A partir du SRTM, on a créé des fichiers textes donnant un ensemble de points X, Y, Z, d'un secteur du delta. Ces points sont espacés de 90 m les uns des autres. Il faut donc interpoler chacun des points du futur maillage avec un rayon de recherche allant de 0 à 128 m (la diagonale d'un carré de 90 m de côté).

- On crée ensuite le maillage, à partir de l'ensemble des profils : on obtient un ensemble de mailles numérotées de ouest en est et du sud au nord.

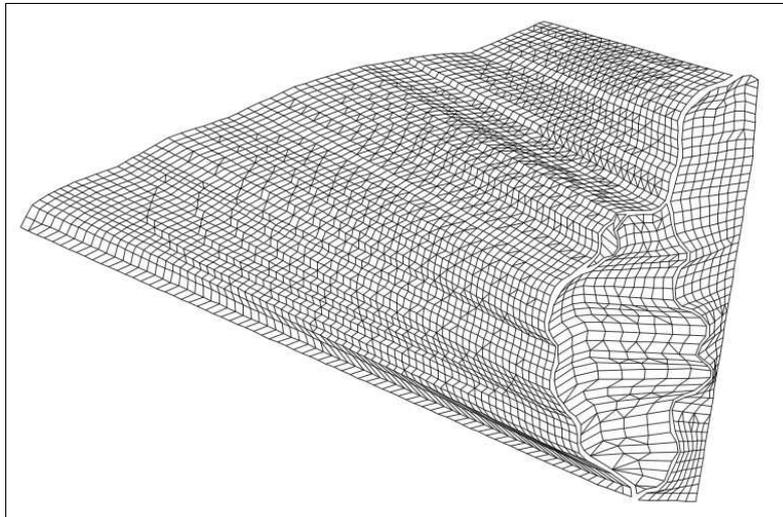


Illustration 11: Maillage de la zone ouest de la partie aval de Débo (correspondant aux biefs 20 à 25)

II.4.2. Définition des paramètres de simulation

- **Frottement au fond**

On applique un coefficient de 25 à toutes les mailles du lit majeur : végétation rare, de type prairie à petits arbustes (Roy, 2011).

- **Conditions aux limites**

Sur les bords latéraux et la limite amont du modèle, on fixe des limites solides. Sur la frontière aval, on applique un flux libre.

- **Conditions initiales**

On représente le lit majeur entièrement sec au début de la simulation.

- **Evaporation**

L'évaporation est un phénomène majeur dans le delta : elle est responsable d'une perte de 30 à 50 % des volumes d'eau écoulés entre l'amont et l'aval du delta (Olivry, 2002). Elle peut être intégrée au modèle, en utilisant des chroniques d'évapotranspiration. Cependant, faute de temps, elle n'a pas encore été intégrée au modèle.

II.4.3. Couplage 1D-2D

Une fois le modèle unidimensionnel et le maillage bidimensionnel obtenus, et les paramètres fixés, on couple les deux maillages, par un fichier mettant en relation les arêtes 1D et les arêtes 2D frontalières, par leurs coordonnées XY. On peut alors lancer la simulation couplée.

On utilise un pas de temps constant, une valeur de courant maximale de 0,9 pour toutes les mailles. Ainsi, c'est le nombre de courant qui varie pour respecter la condition de stabilité de courant de Friedrichs Levy, sauf s'il dépasse 0,9. Cela permet d'avoir un modèle plus stable.

II.5. Calage rétro-actif

On compare les cartes d'étendues des inondations aux images MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) de zones en eau pour caler le modèle :

- Pour caler les données topographiques : si les caractéristiques des profils transversaux du lit mineur varient trop en une distance courte, cela crée une instabilité numérique dans le modèle ; il faut donc reprendre la géométrie des biefs.

- Pour caler les coefficients de frottement au fond : pour l'instant, les coefficients de frottement au fond n'ont pas été modifiés.

L'utilisation d'images MODIS pour la calibration et la validation de modèles sur des plaines d'inondation a déjà été utilisée, notamment sur le delta du Tana (Leauthaud et al., 2013).

II.6. Validation du modèle couplé

On valide le modèle en réalisant des simulations pour différentes crues, en particulier on choisit de modéliser la crue de 2004-2005, qui est une crue faible, puisque le modèle a été calé sur la crue de 2000-2001, qui est une crue moyenne.

On compare ensuite les débits obtenus en différents points du modèle avec les données de débit réelles, ainsi qu'avec les débits obtenus par le modèle unidimensionnel seul.

On compare également la répartition des débordements aux images MODIS.

III. Présentation et interprétation des résultats

Les deux maillages, unidimensionnel et bidimensionnel ont été construits sur l'ensemble de la zone. Le maillage bidimensionnel obtenu est présenté page suivante. Les simulations ont été conduites essentiellement sur une zone test, située à l'ouest de la zone d'étude (biefs 20 à 26 du réseau), de Akka à Niafunké. Dans le cadre de ce rapport, on analysera donc les résultats de cette zone test. Les années utilisées pour l'analyse sont l'année 2000-2001 (crue moyenne à forte) et 2004-2005 (crue faible).

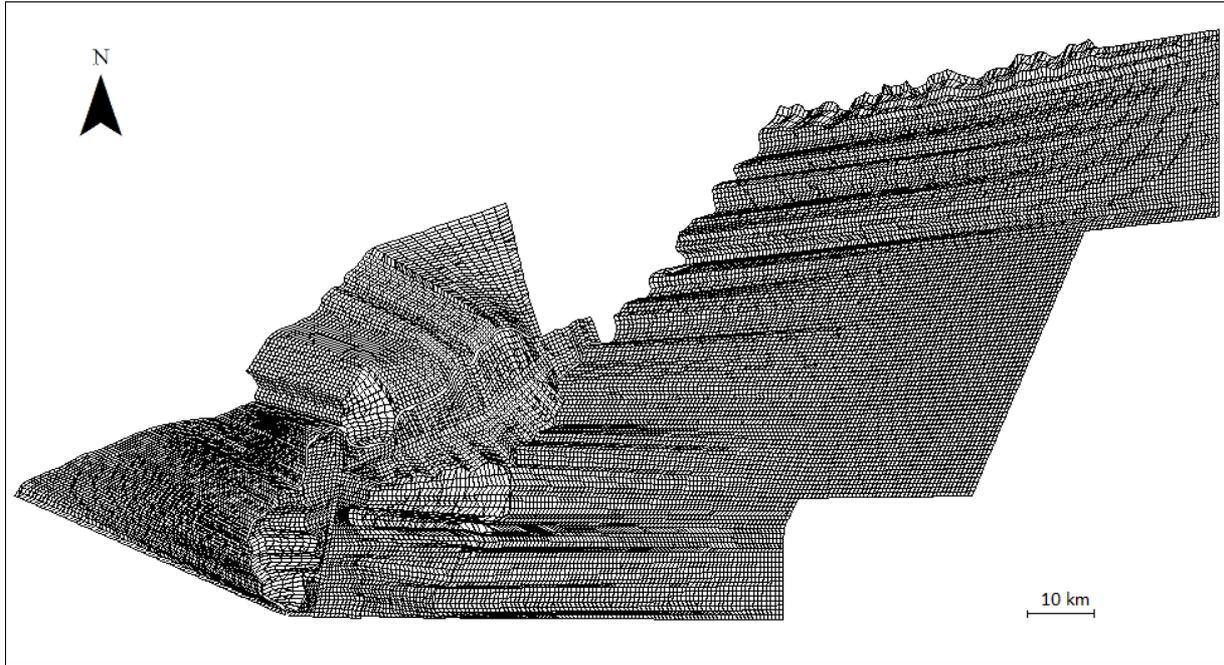


Illustration 12: Maillage bidimensionnel de la zone aval du delta intérieur du Niger (au Nord du lac Débo)

III.1. Analyse des débits

N'ayant les données réelles de débit qu'au niveau de Tonka, la comparaison des débits se fera entre l'aval du modèle et Tonka. Il faudra par conséquent prendre en considération qu'il peut y avoir des pertes de débit importantes entre les deux, du fait des débordements, puisque la distance entre les deux est de 60 km, soit la longueur du modèle à vol d'oiseau.

Les résultats sont présentés sur le graphique ci-dessous (ilustration 13) :

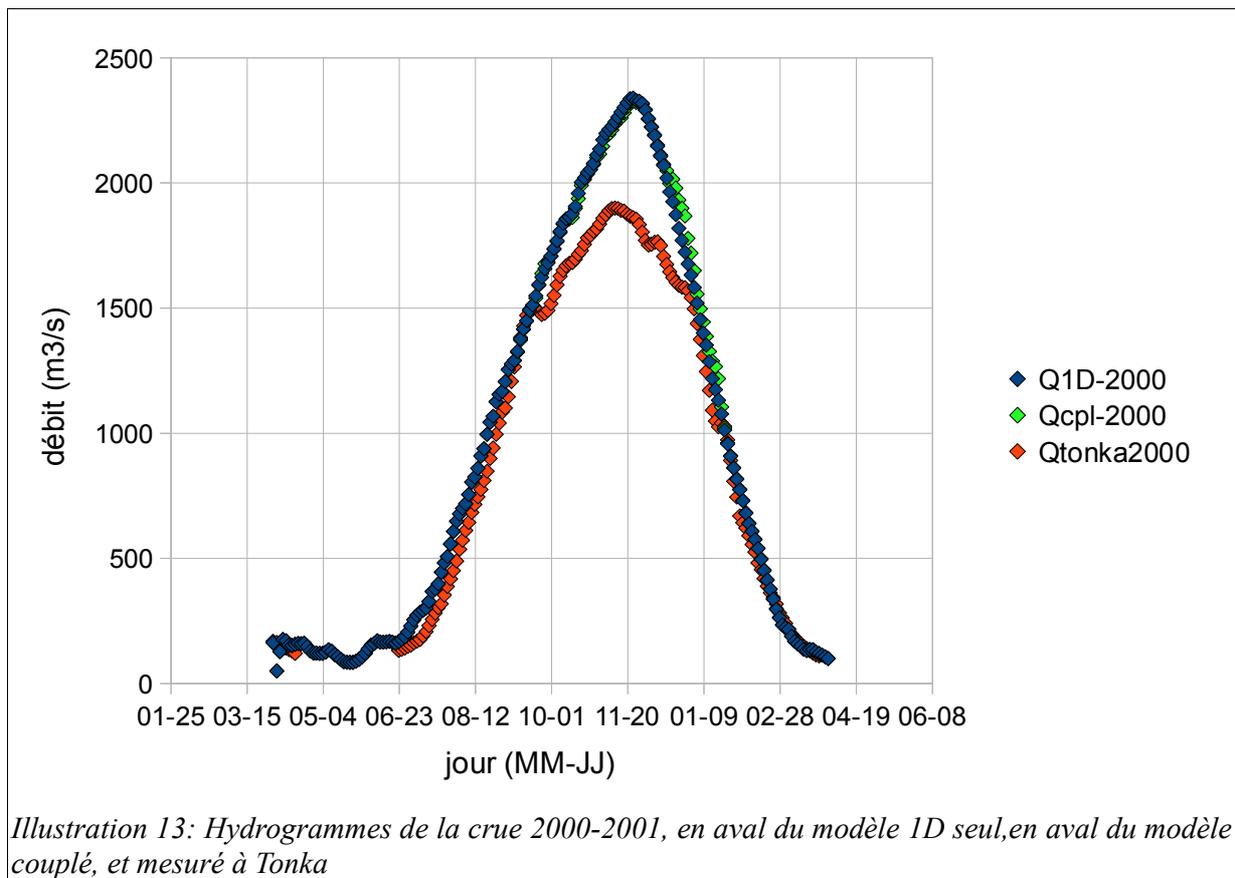


Illustration 13: Hydrogrammes de la crue 2000-2001, en aval du modèle 1D seul, en aval du modèle couplé, et mesuré à Tonka

Comme on pouvait s'y attendre, le modèle unidimensionnel seul surestime les débits, du fait qu'il ne prend pas en compte les débordements : pour la crue de 2000-2001, le pic de crue atteint $2270 \text{ m}^3/\text{s}$ d'après la simulation 1D contre $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ de débit mesuré. Cependant, comme dit précédemment, il faut modérer l'importance de l'écart évalué car la valeur de débit mesurée se situe plus en aval que celle simulée.

Mais le modèle couplé surestime également très largement les débits à l'aval ; en effet, on pourrait s'attendre à ce que la courbe des débits du modèle couplé (Qcpl-2000) soit très inférieure à celle du modèle 1D (Q1D-2000), puisque les débordements sont pris en compte. Cela n'est pas le cas : les courbes 1D et couplée sont quasiment confondues, et ce pour les deux crues.

En outre, si l'on compare ces deux courbes à la courbe de débit mesuré à Tonka (Qtonka2000), on remarque la présence d'un palier à $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$, pour Qtonka2000, à partir duquel les courbes se séparent : le pic de Qtonka2000 est affaibli par rapport à ceux des deux autres courbes. Ce palier traduit l'ouverture d'une vanne, qui permet de forcer les débordements. Le modèle couplé n'intègre pas la présence des ouvrages. La comparaison avec la courbe des débits simulés Qcpl-2000 permet donc d'avancer qu'en conditions naturelles (sans ouvrages), les débordements seraient très faibles.

Pour mieux traduire les débordements ayant lieu, il faut donc ajouter au maillage bidimensionnel les ouvrages, tels que digues (ou routes) et vannes.

Au vu des résultats sur les débits, on peut donc s'attendre dans les résultats des surfaces d'inondation à ce que celles-ci soient très sous-estimées.

III.2. Analyse des surfaces d'inondation

III.2.1. Maximums de hauteurs d'eau

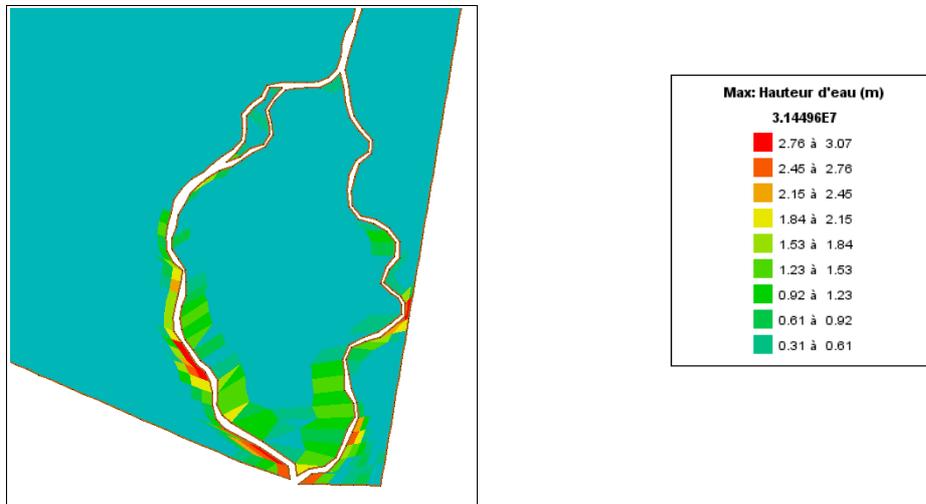


Illustration 14: Hauteurs d'eau maximales obtenues pour la crue 2000-2001

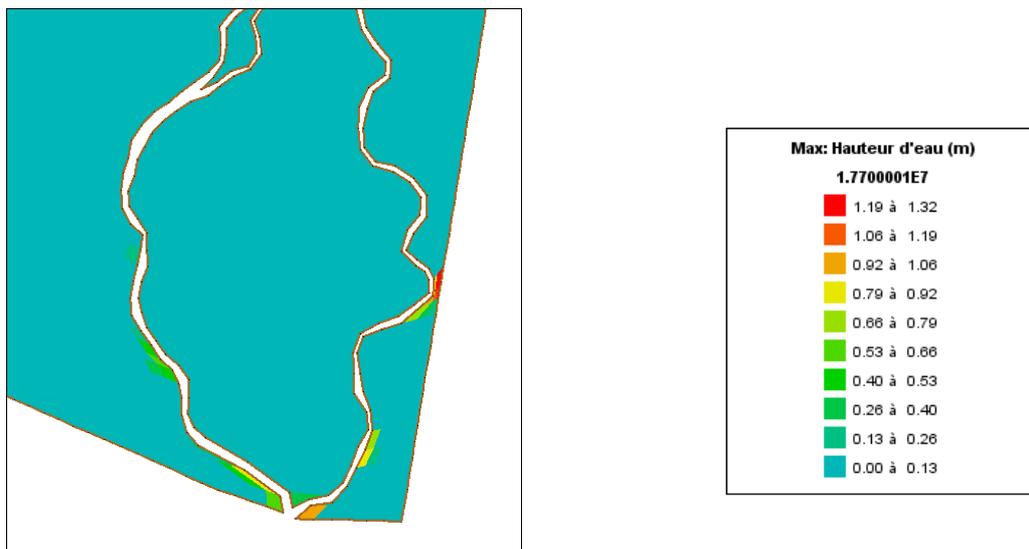


Illustration 15: Hauteurs d'eau maximales obtenues pour la crue 2004-2005

La première observation que l'on peut faire à partir de ces résultats est que l'aire totale occupée par de l'eau à un moment de la crue est plus importante dans la simulation de la crue de 2000-2001 que dans celle de la crue de 2004-2005. De plus, les hauteurs d'eau maximales obtenues pour 2000-2001 sont plus importantes que pour 2004-2005 : elles se situent entre 2,5 et 3 m pour 2000-2001, contre 1 à 1,32 pour 2004-2005.

Ces deux résultats sont logiques, puisque la crue de 2000-2001 est plus forte. Cependant, on n'a pas

de suivi de hauteurs d'eau réelles avec lesquelles comparer ces résultats, les images MODIS ne donnant qu'une information binaire (présence / absence).

III.2.2. Etendue maximale des débordements : comparaison avec les images MODIS

Pour analyser l'étendue maximale des débordements, on compare les résultats avec les images MODIS.

On peut dans un premier temps comparer la date à laquelle la surface d'inondation simulée semble la plus importante à celle à laquelle la surface d'inondation réelle semble la plus importante, d'après les images MODIS.

Crue / Jour	Surface maximale réelle	Surface maximale simulée	Décalage modèle / réalité
2000-2001	03/12/00 (+/- 8 jours)	23/11/00	de -2 à -18 jours
2004-2005	25/11/04 (+/- 8 jours)	22/10/04	de -26 à -42 jours

Tableau 2: Comparaison de la date pour laquelle la surface d'inondation est maximale, entre le modèle et les images MODIS, pour les années 2000-2001 et 2004-2005

La précision de la date estimée au vu des images MODIS ne peut être que de 8 jours (intervalle de temps entre deux images). On peut tout de même se rendre compte que le modèle est en avance par rapport à la vitesse des débordements réelle, de façon importante très importante pour la crue faible (de 26 à 42 jours).

Dans un deuxième temps, on compare les cartes des surfaces d'inondation simulées aux cartes MODIS. On présente ici la comparaison pour la crue 2004-2005, au 25 novembre.

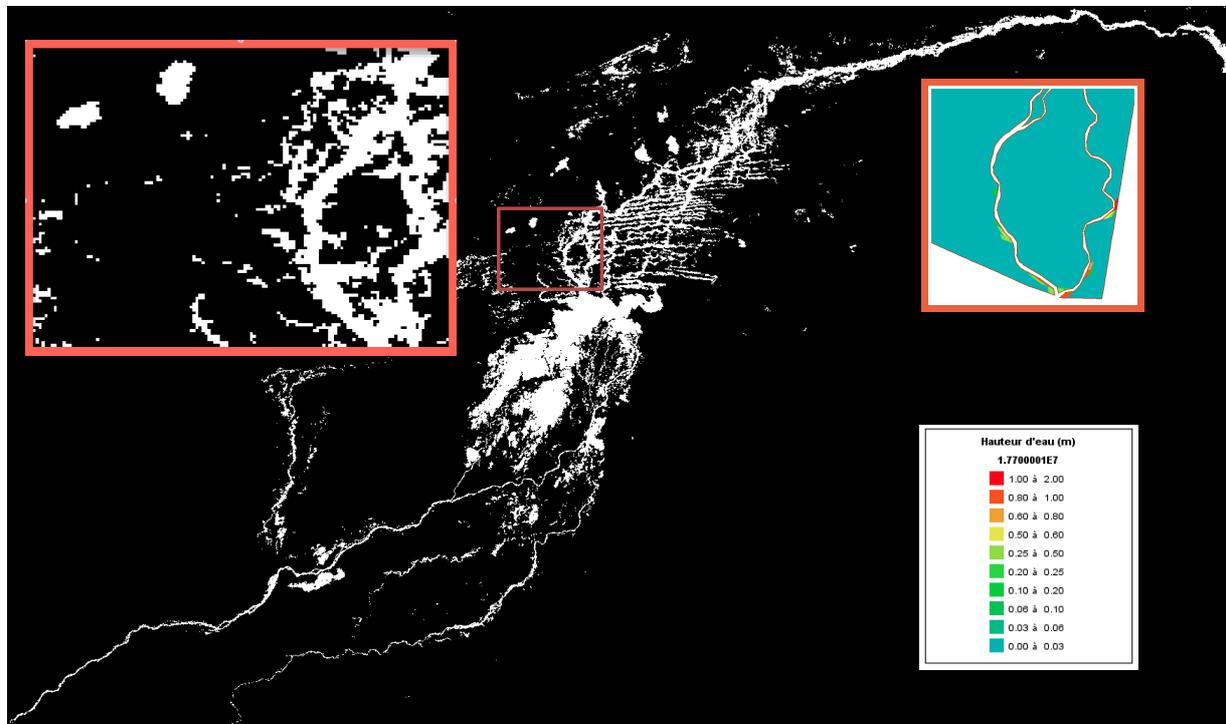


Illustration 16: Comparaison de l'étendue de l'inondation au 25/11/04 : image MODIS (en fond, et zoomée à gauche), et image obtenue par simulation (à droite) (image en fond : 1 cm = 60 km ; encadrés : 1 cm = 14,4 km)

La surface inondée est largement sous-représentée par la simulation, comme la courbe des débits aval le laissait penser. De plus, les deux lacs à l'ouest restent à sec dans le modèle durant toute la crue, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. En fait, ce sont également les conditions initiales qui ont été mal définies dans le lit majeur : cette année-là, les lacs étaient en eau en début de crue. Il aurait donc fallu représenter certaines mailles 2D en eau au temps initial.

III.2.3. Dynamique de l'inondation

L'inondation se fait plus rapidement par la simulation que dans la réalité (voir plus haut). Ce peut être dû aux coefficients de frottement au fond, qui seraient à ajuster, mais avant tout au fait que l'inondation n'a pas la même ampleur : la simulation sous-estime la surface d'inondation, donc la durée pour arriver inonder cette aire est plus courte.

On peut également s'intéresser à la vitesse relative de l'inondation des biefs les uns par rapport aux autres. Comme le montre la figure suivante pour la crue 2000-2001, l'eau déborde dans le bras ouest avant de déborder dans le bras est d'après les simulations :

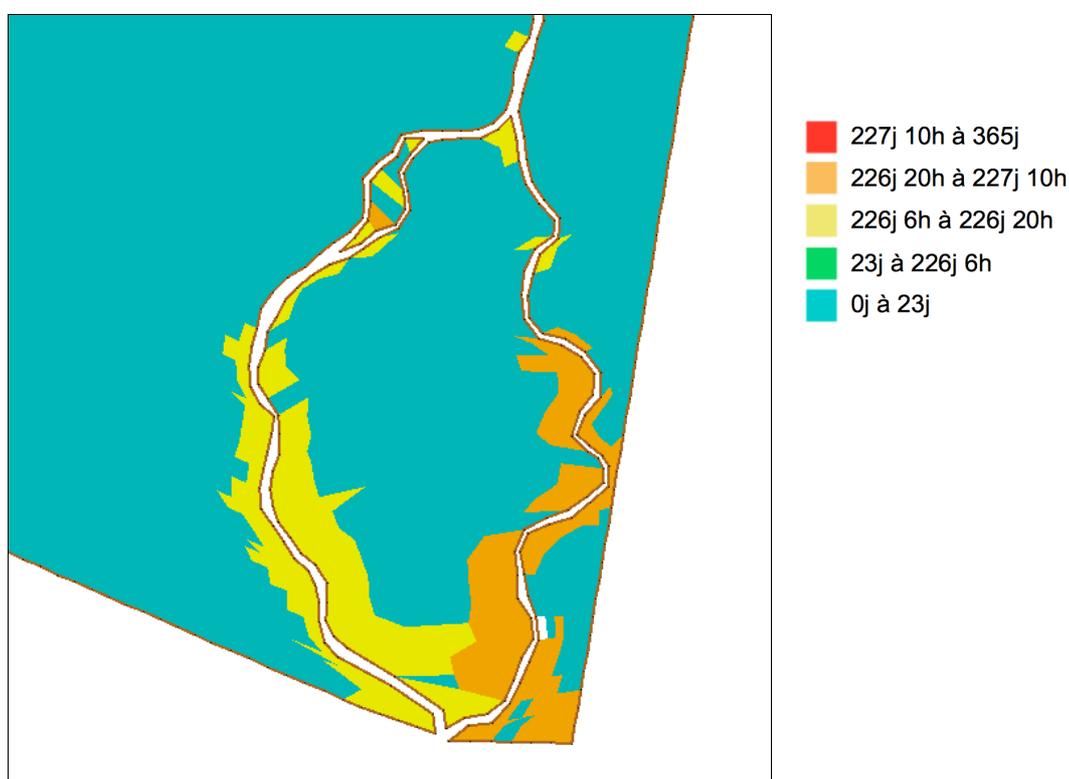


Illustration 17: Temps de la hauteur maximale pour la crue de 2000-2001, obtenu par simulation

On retrouve cet ordre d'inondation pour la crue de 2004-2005. Cela se retrouve également dans la succession des images MODIS.

Par le travail de maillage puis de modélisation effectué, on a donc jusqu'ici traité une partie du delta intérieur du Niger. Le calage du modèle de cette région ouest est à poursuivre, pour obtenir des volumes de crue plus en adéquation avec les observations. Nous nous proposons de voir dans la partie qui suit les sources d'amélioration possibles. Puis nous évoquerons les perspectives qu'offre une telle modélisation.

IV. Discussion et perspectives

IV.1. Particularités du modèle construit

- **Utilisation d'images d'origine satellitaire pour la construction du modèle numérique de terrain**

Une particularité de ce modèle hydrodynamique est l'utilisation de données d'origine satellitaire, ici le SRTM, pour l'établissement du modèle numérique de terrain, du fait du peu de données altimétriques de terrain cartographiées. Une telle approche a été étudiée par [Renouard, 1992], et comparée à la construction d'un MNT à partir de la digitalisation de cartes IGN au 50 000^{ème}.

Le traitement des données satellitaires permet d'obtenir dans le cas de notre étude un raster de 90*90 m, c'est-à-dire que les points cotés forment des carrés de 90 m de côté. L'utilisation du SRTM pour l'établissement d'un modèle qui se veut relativement précis, du fait de l'utilisation de profils topographiques dans le lit mineur, est discutable. En effet, les incertitudes liées à la précision du SRTM altimétriques et en XY le rendent plus utilisé pour des modèles à grande échelle (Zahera, 2011 ; Peterson et al., 2010). L'incertitude en altitude dépend de la zone d'étude ; pour la zone modélisée ici, elle est d'environ 1,5 m, ce qui peut être la source d'erreurs importantes. Nous en discuterons dans le paragraphe suivant (IV.2).

- **Utilisation des images MODIS pour le calage et la validation du modèle**

Pour caler le modèle et le valider, notre étude propose d'utiliser des images satellitaires MODIS. Généralement, les modèles hydrodynamiques sont souvent calés et validés à partir de hauteurs d'eau mesurées (Torres, 2007). L'utilisation d'images permet une comparaison visuelle globale entre les résultats des modélisations et les observations, et permet également de combler les lacunes dans les données relevées sur le terrain. Il faut être prudent dans l'exploitation des images MODIS. En effet, des parasites comme des nuages peuvent fausser l'interprétation. Enfin, l'inconvénient majeur de l'utilisation de ces seules images est qu'elles ne renseignent pas sur la hauteur d'eau en un point de la plaine d'inondation, mais seulement sur la présence ou l'absence d'eau.

IV.2. Origines possibles de la sous-estimation de l'étendue des crues

Le modèle hydrodynamique établi sous-estime l'étendue des crues de façon importante. Cette erreur peut avoir plusieurs origines :

- La non intégration des ouvrages, ici d'une vanne, est le facteur qui joue le rôle le plus important dans la sous-estimation des débordements.
- L'élément pouvant également entraîner des erreurs dans le modèle est la cohérence entre les données altimétriques du modèle 2D et du modèle 1D au niveau des frontières entre les deux, c'est-à-dire justement au niveau de ces berges. En effet, le SRTM utilisé pour l'établissement du MNT ayant une précision de 90 m en XY, et de 1,5 m en altitude, son interpolation pour la construction du maillage bidimensionnel peut conduire à des erreurs altimétriques. Cela d'autant plus que la région est très plate. Une étape que l'on pourrait ajouter dans la construction du modèle couplé serait la mise en adéquation entre les données altimétriques des maillages 1D et 2D : on attribuerait aux points à la frontière les cotes du modèle 1D, celles-ci devant être de meilleure qualité.
- Les profils en travers réels sur lesquels se base la géométrie des biefs. Cependant, ces données sont considérées comme fiables, et ne pourraient engendrer qu'une erreur négligeable.
- Le nombre de relevés topographiques est assez faible : on possède 23 profils pour la zone, correspondant à une longueur totale de biefs de 280 km. Mais surtout, la répartition des profils est très hétérogène : le bras droit du fleuve ne possède que 2 profils, pour une longueur de 36 km.
- La délimitation des berges des lits mineurs, basée sur les cartes IGN au 50 000^{ème}, pourrait être la source d'approximations dans le modèle. Si les lits ont été construits plus larges qu'ils ne le sont en réalité, cela a pu conduire à la sous-estimation des surfaces inondées. Cependant, cela reste une

source d'erreur plutôt faible.

Enfin, une erreur dans le modèle vient des conditions initiales du lit majeur : il a été représenté totalement vide au début de la crue, alors que les lacs n'étaient pas vides en réalité.

Par ailleurs, le modèle construit simule la dynamique d'inondation (relative entre les biefs) de façon satisfaisante.

IV.3. Perspectives

Le travail de calage du modèle doit donc être poursuivi, en particulier au niveau de la topographie des lits mineurs. Par la suite, le modèle doit être étendue à toute la zone maillée.

En outre, les ouvrages dont on connaît l'emplacement devront être ajoutés au maillage du lit majeur. Les données de pluviométrie et d'évapotranspiration devront également être intégrées au modèle.

Une fois que le modèle sera calé de façon satisfaisante et validé sur de nombreuses crues, on pourra envisager de tester des scénarios, notamment concernant les barrages en projet. Pour l'instant, leur impact sur la surface d'inondation est très mal connu ; les modifications qu'ils entraîneront sur les débits sont elles-mêmes discutées, puisqu'elles dépendront des modes de gestion des barrages, qui ne sont pas établis de façon certaine. Les conséquences de la construction du barrage de Fomi sur la répartition des inondations dans le delta sont une des perspectives qu'offre ce modèle hydrodynamique.

Conclusion

Le delta intérieur du Niger est une vaste plaine d'inondation d'environ 30 000 km², qui joue un rôle économique majeur pour le Mali. Dans l'optique de mieux comprendre l'hydrodynamique de cette région, nous construisons un modèle couplé 1D-2D du delta. La modélisation en amont de Mopti a déjà fait l'objet d'une étude (Expert, 2012). Nous avons construit le maillage unidimensionnel et le maillage bidimensionnel sur toute la partie aval de Mopti. Le maillage se base sur des relevés topographiques pour le lit mineur (1D), et sur des données d'origine satellitaires (SRTM) pour le lit majeur (2D). Nous avons effectué des simulations du modèle couplé sur une zone test en aval du lac Débo. Le calage se fait à partir d'images satellitaires de type MODIS, traitées en binaire : elles renseignent sur la présence ou non d'eau. Ce type de données pour le calage permet de comparer la répartition des crues estimée par le modèle à la répartition observée, et permettent de pallier le manque de données topographiques de la zone.

Le modèle obtenu est à améliorer, en particulier par l'ajout des ouvrages au maillage bidimensionnel, ainsi que par l'affinage des altitudes aux frontières entre le maillage 1D et le maillage 2D. En effet, les données SRTM utilisées ont une précision faible compte tenu du caractère très plat de la région.

Puis le modèle pourra être généralisé à l'ensemble du delta. Il pourra ensuite être utilisé pour prévoir les conséquences de l'utilisation de l'eau en amont du delta sur l'agriculture dans la région. En particulier, il sera intéressant d'étudier les conséquences de la mise en eau du barrage de Fomi, en cours de construction en Guinée, très en amont du delta.

Bibliographie

Belaud G., Ribot-Bruno J., Coulibaly M., Cisse M. (2009). Projet HydroDIN – Rapport de mission Delta Intérieur du Niger du 22 Novembre au 3 Décembre 2009, 21 p.

Expert T. (2012). Modélisation hydrodynamique couplée 1D/2D du delta intérieur du Niger. Mémoire de stage Master Recherche Dynamique des fluides Energétique et Transferts – Spécialité Mécanique des fluides pour l'environnement, Université de Toulouse, 28 p.

Ferry L., Muther N., Coulibaly N., Martin D., Mietton M., Olivry J.C., Paturel J.E., Barry M.A., Coulibaly Y. (2011). Le fleuve Niger de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien : les grands traits des régimes hydrologiques. In : *Niger supérieur : quelques résultats de recherche sur les ressources et usages de l'eau*. Paris (FRA) ; Marseille : UNESCO ; IRD, 2 p.

Groupement Coyne et Bellier, 2009. Projet d'aménagement du barrage de Fomi. Étude d'impact environnemental et social. Rapport provisoire, Autorité du bassin du Niger - Ministère des Mines et de l'Hydraulique guinéen.

Kuper M. (2001). Le barrage de Talo : impact sur le delta intérieur du Niger. Djenné Patrimoine Informations, numéro 10, janvier 2001, pp. 4-6.

Leauthaud C., Belaud G., Duvail S., Moussa R., Grun'berger O., Albergel J. (2013). Characterizing floods in the poorly gauged wetlands of the Tana River Delta, Kenya, using a water balance model and satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3059-3075, doi:10.5194/hess-17-3059-2013, 2013.

Marie J., Morand P., N'Djim H. (2007). Tha Niger River's Future : Synthesis and Recommendations, Analytical Chapters. Expertise Collégiale. IRD ; IER.
<http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010041819>.

Mullens A. (2009). Application de l'imagerie satellitaire à la simulation à la simulation des zones inondées dans les modèles hydrodynamiques. Synthèse bibliographique de Master 2 Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier 2, 25 p.

Oleksiak A. (2008). Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique. Mémoire de stage Master 2 Télédétection et Géomatique appliquées à l'Environnement, 69 p.

Olivry (2002). Synthèse des connaissances hydrologiques et du potentiel de ressources en eau du fleuve Niger. Banque Mondiale, Autorité du Bassin du Niger.

Paquier (2002). Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint Venant. Document de synthèse en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard Lyon 1, 101 p.

Paris (2010). Fusion de données topographiques pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain pour l'UMR G-Eau – Application à la modélisation de la crue du Niger. Mémoire de stage Ingénieur, Institut des sciences appliquées, 101 p.

Petersen G. & Fohrer N. (2010). Two-dimensional numerical assessment of the hydrodynamics of the Nile swamps in southern Sudan. *Hydrological Science Journal* **55**(1), pp 17–26.

Proust S. (2006). Hydraulique des crues et des écoulements débordants. In : U.R. Hydrologie – Hydraulique, Cours de 3ème année de l'ENGEES, Génie de l'Environnement, Cemagref Lyon, 13 novembre 2006, 154 p.

Renouard, L. (1992). Extraction automatique de MNT à différentes résolutions. Proc. of 17th ISPRS Congress, 2 - 14 August, Washington D. C., USA. In *Int'l Archives of Photogr. and Rem. Sensing*, Vol. 29/B4, pp 886-893.

Roy G. (2011). Modélisation bidimensionnelle de l'hydrodynamique des inondations dans le Delta Intérieur du Niger. Rapport de stage Master Sciences de la Terre, Université de Strasbourg, 50p.

SOGREAH, 2005. Etude préliminaire du modèle mathématique du bassin du fleuve Niger – Rapport final provisoire. Technical report, Autorité du Bassin du Niger.

Torres A., Lipeme Kouyi G., Krajewski J.L.C, Paquier A. Modélisation 2D de l'hydrodynamique dans un bassin de retenue-décantation d'eau pluviale (2007). 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux.

Zahera S. S., Di Baldassarre G., Ngandu Balekelayi C. (2011). Modelling Seasonally Flooded Wetlands in the Semi-arid Sahelian Zone. *Nile Basin Water Science & Engineering Journal*, Vol.4, Issue 2, pp83-93

Zwarts, L., Van Beukering, P., Kone, B., & Wymenga, E. (2005). Le Niger, une artère vitale - Gestion efficace de l'eau dans le bassin du haut Niger, 304 p.

Zwarts L. (2009). Le Delta Intérieur du Niger s'assèchera-t-il du fait du changement climatique et de l'utilisation de l'eau en amont ? A&W-rapport Vol. 1556, 41 p.

Annexe 1 : Construction du maillage bidimensionnel

a- Construction d'un ensemble de points, noeuds du futur réseau : fichier .m :

L'ensemble des points servant de base à la création du réseau doit être porté par un fichier au format *.m, correspondant à un ensemble de profils. Ici, les profils ont une altitude nulle, l'altitude des noeuds du réseau leur sera attribuée par la suite (b).

Ce fichier doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Tous les profils doivent avoir le même nombre de points : c'est une caractéristique du format *.m, nécessaire à la création du maillage par la suite ;
- Les points à la frontière du 1D doivent correspondre aux points extrémités des profils du modèle 1D : c'est indispensable pour le fonctionnement du couplage entre le modèle 1D et le modèle 2D ;
- Les points doivent être espacés d'1km les uns des autres, que ce soit au sein d'un profil ou entre deux profils différents.

La création de ce fichier *.m se fait ainsi :

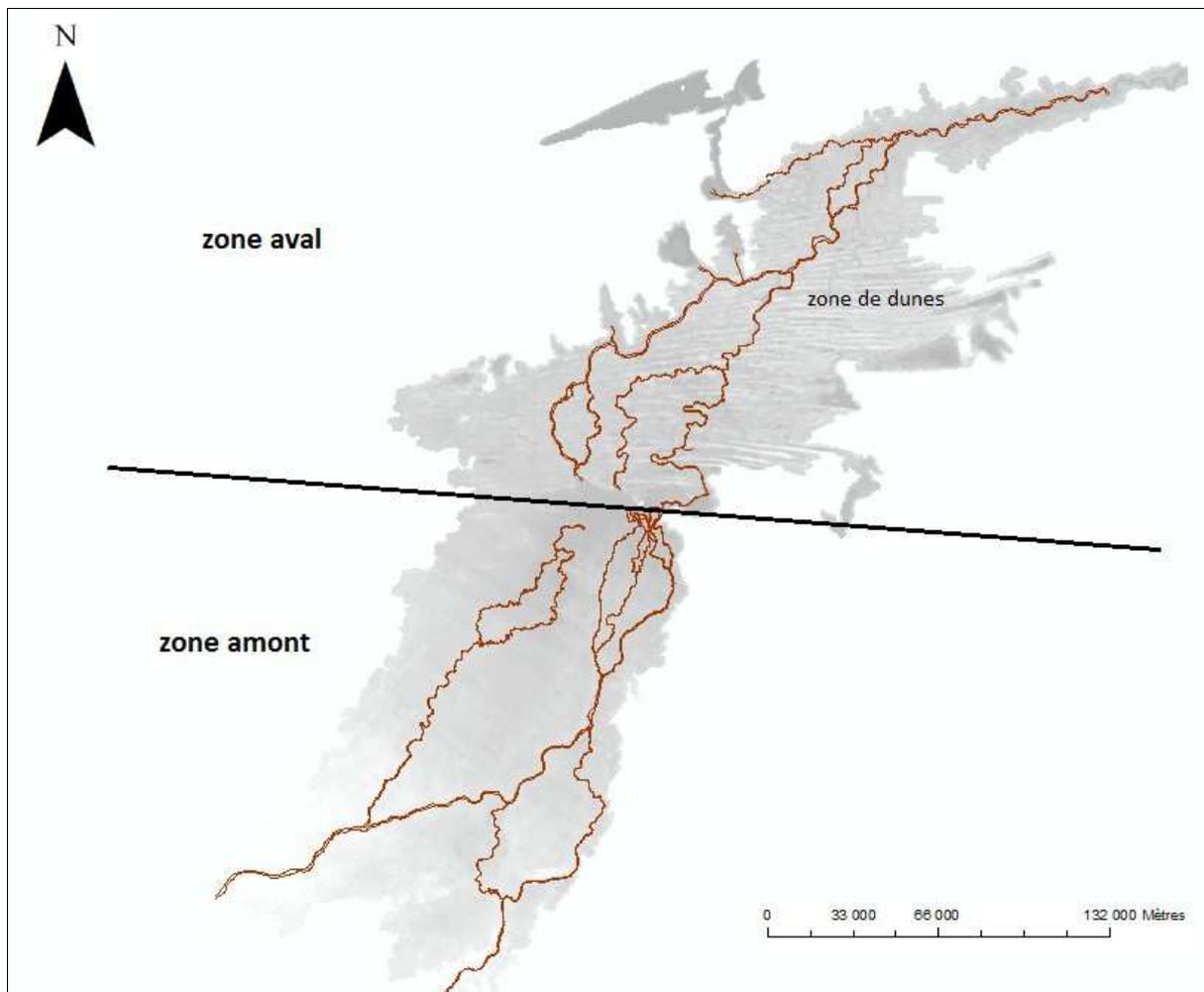
- Création du fichier *.st des deux profils limites de la zone (aux altitudes nulles).
- Création d'un fichier *.sem : ensembles de n points en frontière 1D-2D de la zone (frontière droite, pour l'exemple).
- Création de l'autre bordure (gauche pour l'exemple) de la zone (*.sem) : par une 1ère interpolation entre les deux fichiers *.st, avec l'exécutable secmanigerb. On définit le pas d'espace entre chaque profil $p=d/n$ avec d : distance entre les deux extrémités gauches des profils limites, et avec un pas d'espace quelconque. Ainsi, on obtient un ensemble de n profils. On peut alors sélectionner les extrémités gauches de ces profils pour avoir le semis de la bordure gauche de la zone.
- 2ème interpolation, cette fois-ci pour créer l'ensemble des points de la zone : on utilise les deux profils limites de la zone (fichier *.st), ainsi que les deux bordures (fichiers *.sem). On crée des profils interpolés avec un pas d'espace longitudinal de 1 km, et un pas d'espace transversal de 1 km.

b- Interpolation des altitudes en chaque point, à partir d'un fichier texte des coordonnées X,Y,Z de la zone. Ce fichier texte provient du SRTM, les points de ce fichier forment des carrés de 90m de côté.

Cette interpolation permet la création d'un fichier .cox, donnant l'altitude de chaque noeud du réseau.

c- Création du maillage à partir du fichier .m (exécutable mail20) : on obtient un fichier *.ima.

Annexe 2 : Image SRTM du delta





Diplôme : Ingénieur agronome
Spécialité : Génie de l'Environnement
Spécialisation / option : Sol, Eau et Hydrosystèmes
Enseignant référent : Zahra Thomas

Auteur(s) : Marie Thibault
Date de naissance* : 04/03/1990

Organisme d'accueil : IRD, UMR G-Eau
Adresse : 361 rue Jean-François Breton, BP 5095
34196 Montpellier Cedex 5
Maître de stage : Gilles Belaud

Nb pages : 30 Annexe(s) : 2

Année de soutenance : 2013

Titre français : Modélisation hydrodynamique couplée 1D-2D du delta intérieur du fleuve Niger
Titre anglais : 1D-2D coupling model in the inner delta of Niger

Résumé (1600 caractères maximum) :

Le delta Intérieur du Niger est une grande plaine inondable d'environ 30 000 km². La crue annuelle qu'elle subit est le moteur des activités agricoles de la région. C'est pourquoi une bonne compréhension de l'hydrodynamique du delta semble indispensable pour prévoir les conséquences environnementales, agricoles et économiques de changements anthropiques et climatiques de la zone. On réalise un modèle hydraulique couplé 1D-2D sur cette zone, pour prévoir la répartition spatiale des inondations en fonction des caractéristiques hydrologiques de l'année. Le modèle se base sur des relevés topographiques pour le lit mineur, et sur des données topographiques d'origine satellitaire pour le lit majeur. Un tel modèle a déjà été construit à l'amont de Mopti. Des résultats ont été obtenus sur une autre zone test, en aval du lac Débo. Ils sous-estiment les débordements, et sont à améliorer, notamment par l'ajout des aménagements (digues, vannes) au maillage, et à compléter jusqu'à l'aval du delta, à Koryoumé.

Abstract (1600 caractères maximum) :

The inner delta of Niger river is a large floodplain of about 30 000 km². The annual flood plays a crucial part for the agricultural activities in the region. Understanding hydrodynamic processes in the delta is essential to predict the environmental, agricultural and economic consequences of anthropogenic and climatic changes in the area. A hydraulic 1D-2D coupling model is developed to predict the spatial distribution of floods based as a function of hydrological characteristics of the year. The model is based on topographic surveys for the riverbed and satellite topographical data for the floodplain. Such a model has been built upstream from Mopti. Results have been obtained in another region, downstream from the Debo lake. They underestimate the overflow, and are to be improved, and are to be completed in the other parts of the delta.

Mots-clés : inondation - modélisation hydrodynamique – plaine d'inondation – delta intérieur du Niger