



**HAL**  
open science

# Modélisation bidimensionnelle de l'hydrodynamique des inondations dans le Delta Intérieur du Niger

Gwendoline Roy

► **To cite this version:**

Gwendoline Roy. Modélisation bidimensionnelle de l'hydrodynamique des inondations dans le Delta Intérieur du Niger. Sciences de l'environnement. 2011. hal-02596731

**HAL Id: hal-02596731**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02596731v1>**

Submitted on 15 May 2020

**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.

Master Sciences de la Terre  
Mention : Ingénierie et Sciences pour l'Environnement (ISIE)  
Université de Strasbourg  
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre  
Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

---

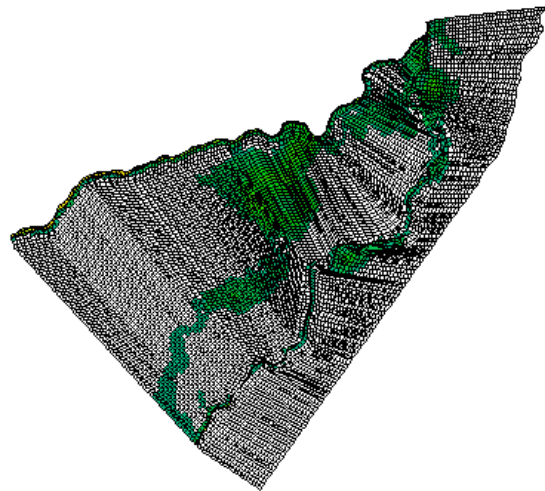
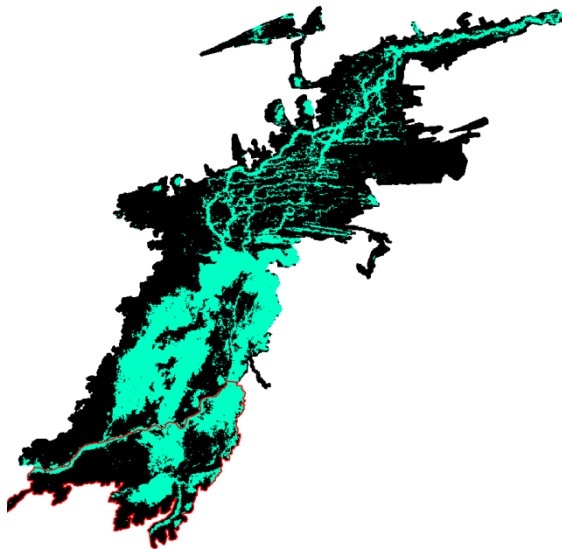
**ROY GAYLORD**

---

Année Universitaire 2010-2011



## Modélisation bidimensionnelle de l'hydrodynamique des inondations dans le Delta Intérieur du Niger



---

Stage effectué au sein du :

**Cemagref de Lyon**

Unité de Recherches Hydraulique et Hydrologie (HH)  
3, bis quai Chauveau  
Lyon 9<sup>ème</sup>

Sous la tutelle de :

MM : André PAQUIER (CEMAGREF de Lyon)  
& Gilles BELAUD (CEMAGREF de Montpellier – UMR G-eau)  
Tuteur universitaire : M. Pascal FINAUD-GUYOT (ENGEES-IMFS)



Stage effectué du 1<sup>er</sup> Mars 2011 au 31 Aout 2011 – Rapport soutenu le 1<sup>er</sup> Septembre 2011

## Résumé

---

Depuis une cinquantaine d'années, de nombreuses modélisations tentent de décrire le fonctionnement hydrodynamique des inondations liées à la crue annuelle du Niger (volume entrant : 40 milliards de mètres cubes), sur son Delta Intérieur au Mali (superficie inondable de 35 000 km<sup>2</sup>). Ces projets se sont heurtés au manque de données bathymétriques dans cette zone de plaine (pente de quelques centimètres par kilomètres). Ils se sont donc appuyés sur des hypothèses approximatives. Dans le cadre du projet HydroDIN, la modélisation bidimensionnelle a été envisagée pour améliorer la représentativité des écoulements dans le lit majeur. La mauvaise connaissance de la topographie a été sensiblement améliorée par la fusion de données topographiques à différentes résolutions. La bathymétrie du lit mineur est alors décrite par des profils IGN effectués dans les années 1970 et des profils ADCP obtenus en 2008 et 2009. Le lit majeur est quant à lui décrit par un Modèle Numérique de Surface issu des données satellitaires SRTM (incertitude altimétrique 1 mètre). Un maillage optimal de résolution de 1 km<sup>2</sup> a été constitué sur deux sites principaux. Ils représentent à eux deux 10 000 km<sup>2</sup>. Le réseau hydrographique modélisé sous le logiciel RUBAR 20 est de 400 km. La fusion n'étant pas optimale, une modification en altitude du maillage a été réalisée par un calage progressif avec les résultats images satellitaires (MODIS) et les chroniques hydrométriques disponibles. Des résultats prometteurs ont été obtenus (critères de Nash supérieurs à 0,9). Néanmoins, la simulation reste contrainte par une mauvaise connaissance des conditions aux limites sur les arrêtes externes au domaine. Celles-ci sont donc modifiées progressivement, afin d'améliorer les résultats de la simulation.

Mots clés : Modélisation hydraulique ; Rubar 20 ; Maillage ; Equations bidimensionnelles de St-Venant ; Conditions aux limites ; MNT SRTM ; MODIS ; LANDSAT.

## Abstract

---

For fifty years, few projects try to describe the annual Niger's flooding due to its overflows (input volume: 40 billion cubic meters), in its flood plain called the Inner Delta - Mali (flooding surface: 35,000 square kilometers). However, the numerical modelings are limited by the bathymetry knowledge. As part of the HydroDIN project, a two-dimensional model based on St-Venant equations is constituted to extend the simulation at the floodplain. The bathymetry knowledge is improved by a merger process of Acoustic Doppler Current profile and topographic profile, in riverbed with SRTM Digital Elevation Model on the floodplain (accuracy: one meter). A meshing process (size of meshes: 1 km<sup>2</sup>) is realized on two sites representing 10,000 km<sup>2</sup> and 400 kilometers of the rivers. The RUBAR 20 numerical software is employed.

As the merger isn't optimized for altitude, the modifications of meshes are made by calibration between results and MODIS satellite images and between results and hydrological recordings. The results are promising; with Nash test criteria over 0.9. But modeling is constraint by a lack of knowledge on boundary conditions. That's why they can be also considered as a parameter of calibration to improve results.

Mots clés : Hydraulique modelling; Rubar 20 software; Meshing process; St-Venant two-dimentional equations; Boundary conditions ; SRTM DTM ; MODIS ; LANDSAT.

## Remerciements

---

Sincères remerciements à mon maître de stage Monsieur André PAQUIER (Chef de l'unité de recherches « Hydraulique et Hydrologie » du Cemagref de Lyon). Ses conseils et ses nombreuses connaissances dans le domaine de la modélisation m'ont été précieux pour la réalisation de ce présent rapport.

Je tenais également à remercier Monsieur Gilles BELAUD, pour son soutien et son accueil au sein du Cemagref de Montpellier. Sans ses conseils, la phase de traitement des données ne serait sans doute pas terminée.

Je remercie Monsieur Pascal FINAUD-GUYOT, d'avoir accepté d'être mon tuteur universitaire.

Merci à François TILMANT, qui m'a permis de me familiariser avec la programmation sous R. Celui-ci n'a pas hésité à prendre de son temps pour m'aider lorsque cela s'avérer nécessaire.

Merci, à Amandine, François, Thomas, Vivien, stagiaires au Cemagref de Lyon, qui ont permis de créer une ambiance conviviale tant au sein du bureau S004, qu'en dehors.

Une petite pensée à ma famille et à Marie, qui m'ont permis de réaliser ce stage dans d'excellentes conditions. Je ne vous remercierai jamais assez.

## Sigles et acronymes

---

**1D** : monodimensionnel, unidimensionnel, filaire

**2D** : bidimensionnel

**1D/2D** : modèle couplé

**ADCP** : Acoustic Doppler Current Profiler

**DIN** : Delta Intérieur du Niger

**EGM96** : Earth Gravitational Model 1996

**GPS** : Global Positioning System

**HydroDIN** : Modèle hydrodynamique des écoulements dans le Delta Intérieur du Niger

**IRD** : Institut de Recherches pour le Développement

**IGN** : Institut Géographique National

**MNS** : Modèle Numérique de Surface

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**MODIS** : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

**NASA** : National Aeronautics and Space Administration

**NGA** : National Geospatial-Intelligence Agency

**NGAO** : Nivellement Général de l'Afrique de l'Ouest

**SRTM** : Shuttle Radar Topography Mission

**UTM** : Universal Transverse Mercator

**WGS 1984** : World Geodetic System 1984

# Sommaire

<b>RESUME.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>1</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>1</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION : .....</b>	<b>1</b>
1. CONTEXTE DE LA MISE EN PLACE D'UNE MODELISATION BIDIMENSIONNELLE.....	2
1.1 <i>Site d'étude : le Niger et son Delta Intérieur.....</i>	2
1.1.1 Présentation du réseau hydrographique .....	2
1.2 <i>Le contexte hydrologique.....</i>	3
1.3 <i>Les enjeux et le contexte scientifique.....</i>	3
1.3.1 Les changements globaux .....	3
1.3.2 Le contexte scientifique .....	4
1.4 <i>Les acteurs du projet HydroDIN .....</i>	4
2. CHOIX D'UN MODELE ADEQUAT A LA PROBLEMATIQUE DU DIN .....	5
2.1 <i>Présentation des modèles disponibles et études de leurs limites .....</i>	5
2.1.1 Les modèles hydrologiques .....	5
2.1.2 Les modèles hydrauliques à surface libre disponibles .....	5
2.1.2.1 La modélisation monodimensionnelle – résolution complète .....	5
2.1.2.2 La modélisation monodimensionnelle – les formes simplifiées .....	6
2.1.2.3 Les modèles monodimensionnels à casiers.....	6
2.1.2.4 Les modèles bidimensionnels.....	6
2.1.2.5 Le couplage 1D/2D .....	7
2.2 <i>Modélisation retenue pour pallier aux manques des modélisations antérieures .....</i>	7
2.2.1 Les manques des modèles antérieurs .....	7
2.2.2 Présentation du modèle bidimensionnel et de la méthodologie .....	8
2.2.2.1 Méthodologie mise en place .....	8
2.2.2.2 La modélisation bidimensionnelle sous RUBAR 20.....	8
2.3 <i>Les données nécessaires à la mise en place du modèle .....</i>	9
2.3.1 Présentation des données.....	9
2.3.2 Utilisation des données nécessaires .....	10
3. CONSTRUCTION D'UN MODELE BIDIMENSIONNEL.....	11
3.1.1 Modélisation hydrologique .....	11
3.2 <i>Mise en place d'un maillage sur le site d'étude .....</i>	14
3.2.1 Délimitation du lit mineur .....	14
3.2.2 Traitement et fusion des données topographiques dans le lit majeur .....	14
3.2.3 Traitement de la bathymétrie dans le lit mineur .....	15
3.2.3.1 Traitement des profils IGN .....	15
3.2.3.2 Traitement des profils ADCP 2008 et 2009.....	16
3.2.4 Critique du traitement avant la constitution du maillage .....	17
3.3 <i>Constitution du modèle.....</i>	19
3.3.1 Choix des sites d'études .....	19
3.3.2 Mise en place d'un maillage optimal.....	19
3.3.3 Mise en place d'un maillage monodimensionnel et bidimensionnel .....	20
3.4 <i>Définition des paramètres de la modélisation .....</i>	22
3.4.1 Frottements .....	22
3.4.2 Choix des conditions aux limites .....	22
3.4.3 Conditions initiales .....	23
3.5 <i>Intégration des données hydrologiques dans le modèle hydraulique.....</i>	24

3.6	<i>Détails sur les simulations</i> .....	24
4.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	25
4.1	<i>Etude de la qualité altimétrique du maillage</i> .....	25
4.1.1	Correction du maillage.....	25
4.2	<i>Etude des problèmes liés aux conditions aux limites</i> .....	26
4.3	<i>Résultats du calage de la rugosité</i> .....	27
4.4	<i>Mise en évidence des échanges entre le Niger et le Bani</i> .....	27
4.5	<i>Visualisation des vitesses</i> .....	28
4.6	<i>Comparaison qualitative des résultats avec le maillage des modèles à casiers</i> .....	28
4.7	<i>Comparaison quantitative du modèle</i> .....	29
4.8	<i>Conclusion partielle sur les résultats</i> .....	30
	<b>DISCUSSION ET CONCLUSION</b> .....	<b>31</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>32</b>
	<b>SOMMAIRE DES ANNEXES</b> .....	<b>34</b>

## Table des figures

Figure 1 : Le réseau hydrographique du DIN et ses lacs (Source du fond de plan : E. PARIS, 2010) .....	2
Figure 2 : Mise en évidence du laminage dans le DIN par visualisation des hydrogrammes – année hydrographique 2001-2002.....	3
Figure 3 : Visualisation des composantes du bilan hydrique – événement hydrographique 2000-2001 - site du DIN, MALI.....	13
Figure 4 : méthodologie de fusion des données topographiques .....	14
Figure 5 : Incertitudes sur le calage des profils IGN.....	15
Figure 6 : Calage des profils ADCP par interpolation des mesures au station hydrométriques .....	17
Figure 7 : Synoptique hydraulique de la zone amont du DIN – Apres calage des profils ADCP .....	18
Figure 8 : Localisation des sites d'études, des stations de mesures et des profils interpolés .....	19
Figure 9 : Maillages utilisés dans la suite de l'étude - site d'étude 1 (a gauche) ; site d'étude 2 (a droite) .....	21
Figure 10 : amortissement de l'onde diffusive (a gauche) ; relation $Q=f(y)$ non univoque (a droite) – Source Degoutte (inc.).....	23
Figure 11 : Exemple de bilan P-ETP de la zone hydrologique sous le regime hydrologique de MOPTI (zone nord) .....	24
Figure 12 : Visualisation du MNT SRTM (a gauche) et de la bathymétrie du maillage (a droite) – Site d'étude n°2 .....	25
Figure 13 : Visualisation des problèmes topographiques, au pic de crue du Niger –site d'étude n° 2 .....	25
Figure 14 : Visualisation des échanges réciproques avec l'extérieur du domaine .....	26
Figure 15 : Visualisation des échanges entre le Niger et le Bani .....	27
Figure 16 : cartographie des vitesses le 15/08/2000.....	28
Figure 17 : Comparaison des casiers utilisés par SIC et Carima (a gauche), avec la simulation hydraulique au maximum des débordements (a droite) - Source de la figure gauche : (OLEKSIK, 2010).....	28
Figure 18 : Résultats de la simulation à la station hydrométrique de Tilembeya.....	29
Figure 19 : Hydrogramme de crue à la station de Sofara .....	29
Figure 20 : Résultats de la simulation au droit de Mopti.....	30

## Table des tableaux

Tableau 1 : Données utilisées pour la modélisation 2D et leurs incertitudes .....	10
Tableau 2 : Superficie des surfaces pluviométriques homogènes définies par la méthode des polygones de Thiessen. 12	
Tableau 3 : Données journalières de l'ETP en mm ; source PICOUET (1995) et ORSTOM (1961) ; Données de Tombouctou issues de mesures sur bac Colorado ; Données de Mopti issues de la formule de Penman.....	12
Tableau 4 : Résultats du modèle hydrologique (Période 2000/2003) – site du DIN, MALI .....	13
Tableau 5 : Rugosités utilisées dans les différentes simulations du cas 1 (coefficients de Strickler ; K donnés en $m^{1/3}/s$ ) .....	22
Tableau 6 : Rugosités K données – Source : (Vazquez, 2010).....	22
Tableau 7 : Description physique des sites étudiés et temps de calcul.....	24



## Introduction :

---

Le Delta Intérieur du Niger (DIN) constitue la plus vaste plaine humide d'un pays soumis à un climat sec, le Mali. L'inondation est le phénomène majeur (GALLAIS, 1967). Ce territoire regroupe un dixième de la population du pays, soit plus ou moins un million d'habitants, sur une étendue de 30 000 à 50 000 km<sup>2</sup>, et produit un dixième du Produit Intérieur Brut rural (PIB) (MULLENS, 2010). Les activités principales dans cette plaine sont : l'activité pastorale (4 millions de bovins et ovins) ; l'agriculture et plus particulièrement la riziculture (entre 50 000 et 130 000 ha) ; la pêche dont les prélèvements dépassent 100 000 tonnes (KUPER et al, 2002) (DE NORAY, 2003).

Dans l'avenir, cette région sera amenée à subir des changements hydrologiques globaux modifiant les usages. A ce titre, on citera la construction de futurs barrages, l'extension de périmètres irrigués, une modification du régime hydroclimatique (ZWARTS, 2009).

Ainsi, il devient nécessaire de modéliser la dynamique hydraulique et hydrologique des inondations actuelles pour prévoir et anticiper les impacts futurs de cette zone (BARTHOD, 2002). C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet pluridisciplinaire HydroDIN.

La construction d'un modèle physique se heurte à des difficultés liées à la complexité des écoulements dans cette zone extrêmement plate, composée de nombreux biefs d'écoulements et de cuvettes (BRL, 2007). Tous les mécanismes qui régissent ce système ne sont pas encore connus (BATTI, 2001) (SINGH, 2004). La première difficulté de la construction d'un modèle hydraulique est liée à l'accès aux données bathymétriques permettant une description suffisamment précise des écoulements dans le lit majeur (MULLENS, 2010). Pour pallier à ces manques, les données de télédétection et plus particulièrement les Modèles Numériques de Terrain satellitaires (MNT) permettent de dépasser la vision réductrice des modèles hydrologiques ou des modèles à casiers utilisés actuellement pour simuler la dynamique du DIN. Ces MNT satellitaires pourraient être utilisés lors d'une modélisation bidimensionnelle. Néanmoins, on peut se demander si l'imprécision de ces données n'est pas une limite à leur utilisation dans un modèle hydraulique (PUECH, 2000).

Le présent mémoire vise à déterminer si une modélisation bidimensionnelle à partir de données topographiques fusionnées (satellitaires et cartographiques) peut améliorer la représentation des phénomènes de submersion dans le DIN.

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire s'articule autour de quatre points.

Tout d'abord, une étude détaillée du contexte hydro-climatique du Niger et de son Delta Intérieur sera effectuée. L'étude du réseau hydrographique permettra de comprendre les différentes contraintes imposées aux modélisations antérieures.

La seconde partie consistera à une étude bibliographique des différents modèles hydrauliques disponibles. Une critique de ces modèles sera dressée pour déterminer l'apport d'une modélisation bidimensionnelle sur ce site.

Dans la suite de cette étude, les traitements préliminaires à la résolution d'un modèle bidimensionnel seront détaillés. On s'intéressera à la fusion des données bathymétriques à différentes résolutions. La procédure de maillage sera également décrite.

Enfin, les différents résultats seront critiqués par rapport aux données disponibles et à leurs représentativités.

# 1. Contexte de la mise en place d'une modélisation bidimensionnelle

## 1.1 Site d'étude : le Niger et son Delta Intérieur

### 1.1.1 Présentation du réseau hydrographique

Le Niger est le troisième plus grand fleuve d'Afrique après le Nil et le Congo. Il prend sa source dans les monts du Fouta Djallon en Guinée (vers 800 m d'altitude), pour se jeter dans le golfe de Guinée (Niger). Il parcourt ainsi 4200 kilomètres. Lors de sa traversée du Mali, le Niger déverse ses eaux dans une vaste plaine communément appelée le Delta Intérieur du Niger (DIN) ou « cuvette lacustre du Niger ». Cette zone inondable a une superficie de 40 000 km<sup>2</sup> (400 km de long et 100 km de large en période de crue). Elle est délimitée : à l'est et au sud par les plateaux du relief de Bandiagara (altitude maximale 400 m), à l'ouest par le Delta Mort, au nord par une série de dunes. Le DIN se caractérise par une géomorphologie comparable à celles des deltas : présence de dépôts alluvionnaires et ramifications multiples.

On découpe habituellement le DIN en deux (cf. figure 1) :

- Une partie amont constituée de vastes zones d'épandages inondées par la crue annuelle. L'écoulement s'y effectue en nappe (écoulement bidimensionnel).
- Une partie aval, en sortie du lac Débo (Akka), composée de trois axes drainants principaux : Issa Ber, Bara Issa et Koliq Koliq. Le réseau hydrologique y est très diffus. L'écoulement s'effectue dans des sillons interdunaires limitant ainsi les inondations. Dans cette zone, les lacs périphériques sont alimentés en période de fortes crues.

Le Niger entre dans le bassin d'inondation à Ké Macina (1) avec une pente moyenne de 2 cm/km. Au droit de cette station, le fleuve a parcouru environ 1000 kilomètres depuis sa source et draine un bassin de 141 000 km<sup>2</sup>. Le Bani, principal affluent du Niger, se jette dans celui-ci à Mopti (3), après un parcours de 1300 km et une surface drainée de 130 000 km<sup>2</sup> (pente de 3 cm/km).

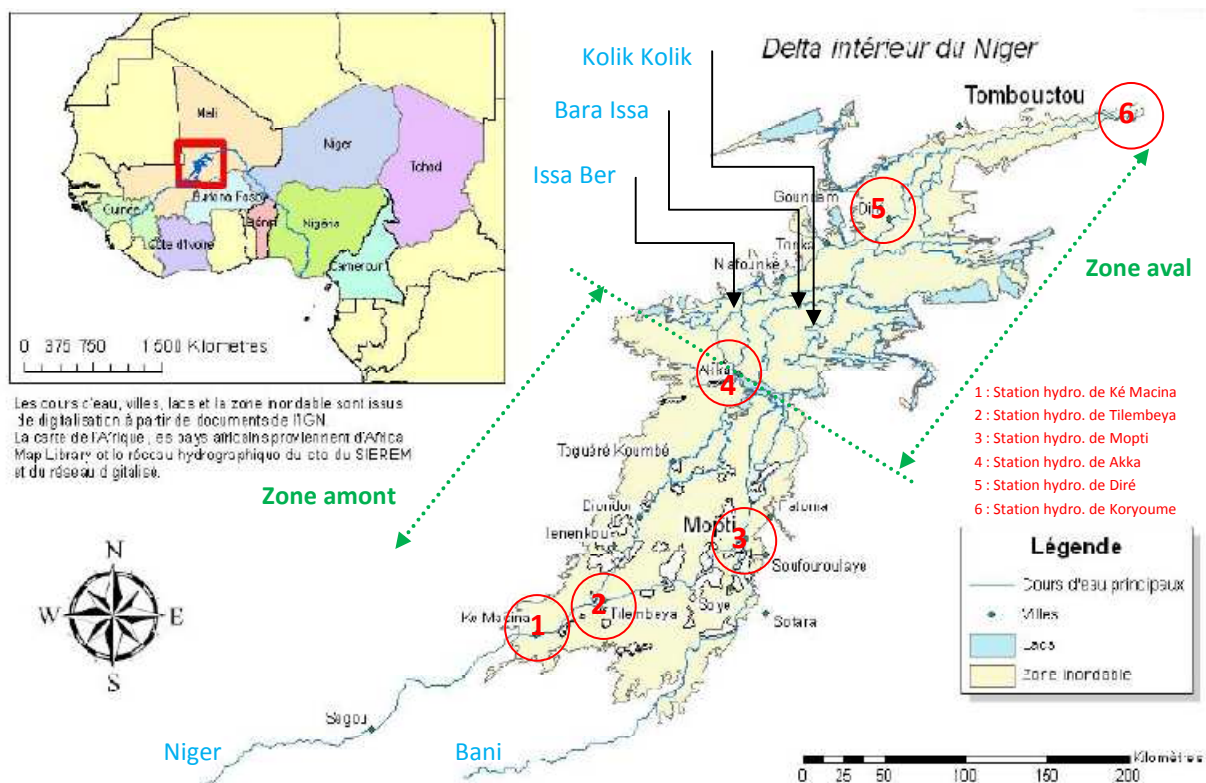


FIGURE 1 : LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU DIN ET SES LACS (SOURCE DU FOND DE PLAN : E. PARIS, 2010)

## 1.2 Le contexte hydrologique.

Sur le plan de la mesure, les entrées du DIN se situent respectivement au niveau des stations de Ké Macina (1) et Douna (cf. Figure 1), la sortie est définie à Koryoumé – port de Tombouctou (6).

Le bassin du Niger connaît deux saisons marquées dans l'année : une saison des pluies en été et une saison sèche en hiver. Le Niger et le Bani font l'objet d'une grande crue annuelle entre août et décembre. Pour le Niger, de janvier à juin, les débits des basses eaux ne représentent que 8% du débit annuel. La remontée des débits s'annonce en mai, mais ne devient significative qu'au mois de juillet. Le maximum de la crue a lieu généralement dans la deuxième quinzaine de septembre. Plus de 80 % du volume s'écoule pendant 4 mois (août et novembre).

Compte tenu de la taille des bassins versants à l'entrée du DIN (141 000 km<sup>2</sup> pour le Niger et 130 000 km<sup>2</sup> pour le Bani), les crues exceptionnelles ne correspondent pas toujours aux fortes averses. En effet, les deux cours d'eau drainent des régions différentes, créant des crues non synchrones.

Le DIN présente des caractéristiques hydrologiques spécifiques (cf. figure 2) :

- Le module de Diré (5) perd de 30 % à 40 % par rapport aux entrées (Ké Macina et Douna), selon l'intensité de la crue,
- Les pertes par évaporation sont proportionnelles aux volumes entrants (PICOUET, 1999),
- Les précipitations directes ne font que compenser les infiltrations (OLIVRY, 2002),
- En moyenne, 50% du volume entrant (60 Km<sup>3</sup>) est évapotranspiré,
- Les surfaces maximales inondées varient entre 5000 km<sup>2</sup> et 35 000 km<sup>2</sup> suivant les années,
- Les écoulements lents amortissent considérablement la crue annuelle (laminage). Le temps de transfert est d'environ 3 mois entre l'entrée et l'aval.

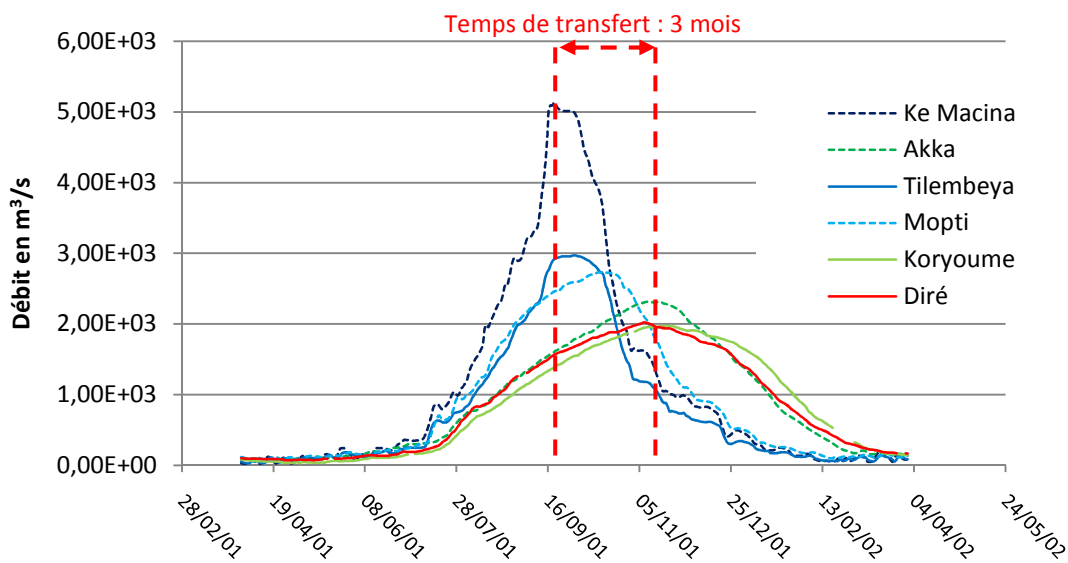


FIGURE 2 : MISE EN EVIDENCE DU LAMINAGE DANS LE DIN PAR VISUALISATION DES HYDROGRAMMES – ANNEE HYDROGRAPHIQUE 2001-2002

## 1.3 Les enjeux et le contexte scientifique

### 1.3.1 Les changements globaux

Dans cette partie du Mali, les crues et les décrues rythment les activités de plus d'un million d'habitants. Les usages sont multiples (BEINTEMA et al. 2007) :

- Le bassin d'inondation est la première zone de pêche continentale. La reproduction et le développement des espèces sont directement liés à l'alternance des crues et décrues,

- Le DIN est classé comme première zone d'élevage de l'Afrique occidentale grâce à ces pâturages exceptionnels,
- Le régime hydrographique particulier de la région du DIN permet également la culture de céréales telles que le riz ou le bourgou.

Or, il se trouve que cet écosystème risque de subir des changements hydrologiques importants :

- **Une expansion des aménagements** : le principal projet est la construction du barrage de Fomi en Guinée (capacité de 6 km<sup>3</sup>), à l'amont du delta. Sa construction devrait permettre une augmentation des surfaces irriguées de 117 000 ha, représentant un prélèvement annuel de 7,7 km<sup>3</sup>, en 2025 contre 3,8 km<sup>3</sup> aujourd'hui. L'impact hydrologique de ce projet n'est pas encore connu.
- **Un dérèglement climatique** : une baisse des débits a été marquée dans les années 1970 entraînant d'importants déplacements de la population au niveau de Tombouctou (Lac de Faguibine). Il est probable que ces phénomènes ressurgissent (NICHOLSON et al. 1999).
- **Une modification de la qualité de l'eau** : une réduction de la surface inondée pourrait entraîner des difficultés d'accès à l'eau potable et le développement de maladies hydriques (paludisme...).

### 1.3.2 *Le contexte scientifique*

La connaissance de la propagation des écoulements, au sein du DIN, est primordiale. En effet, la construction d'un modèle hydraulique basé sur la physique des écoulements doit permettre d'évaluer l'impact de ces différents changements. C'est dans ce cadre que l'IRD cherche à construire des scénarios de modifications hydrologiques (aménagements, modifications climatiques).

Toutefois, de nombreuses études ont démontré, que la modélisation des écoulements dans cette zone est extrêmement complexe. Les facteurs limitants sont les suivants :

- Présence de nombreux biefs d'écoulements et de nombreuses cuvettes, dont les caractéristiques géométriques ne sont pas connues ;
- Un lit majeur extrêmement plat pour lequel la topographie n'est pas suffisamment fine ;
- Une mauvaise connaissance des processus hydrologiques (apports externes et infiltration).

Dans ce contexte contraignant, aucune source de données ne doit-être négligée. A ce titre, en raison de la taille du bassin étudié et de la difficulté d'accès aux zones inondées en période de crues (contraintes physiques, mais aussi géopolitiques), l'apport des images satellitaires devient important (LOUMAGNE et al. 1997) (ZWARTS et al. 2005). En effet, elles peuvent être utilisées aussi bien en données d'entrée (ROUX, 2004), que dans le cadre d'une validation des résultats (BATES et al. 1997) (HOSTACHE, 2006).

Néanmoins l'utilisation de ces données est limitée par l'incertitude portée en altitude : « les ordres de grandeur des MNT satellitaires sont incompatibles avec la qualité recherchée pour les calculs hydrauliques en plaine » (PUECH, 2000).

### 1.4 Les acteurs du projet HydroDIN

Dans le but d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydraulique du DIN, le projet HydroDIN (Hydrodynamique du Delta Intérieur du Niger) a été constitué. Il rassemble de nombreuses Unités Mixtes de Recherches telles que G-eau (Gestion de l'Eau Acteurs et usages), HSM (Hydrosciences Montpellier) et TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Informations Spatiales).

Ce stage s'est déroulé au sein du service Hydraulique et Hydrologie du Cemagref de Lyon, sous la tutelle d'André PAQUIER. Il s'agit d'un partenariat avec l'UMR G-EAU dont le Cemagref de Montpellier fait partie intégrante. Ce partenariat vise à mettre à profit les compétences du Cemagref de Lyon sur la modélisation bidimensionnelle des écoulements. Les connaissances du site et des données sont apportées par le CEMAGREF de Montpellier. Mon tuteur au sein de cette unité est Gilles BELAUD.

## 2. Choix d'un modèle adéquat à la problématique du DIN

### 2.1 Présentation des modèles disponibles et études de leurs limites

#### 2.1.1 Les modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques s'appuient sur une représentation simplifiée des écoulements. A partir des données d'entrée (pluie, débit), on retrouve un débit ou une hauteur d'eau en sortie. Le calage est effectué par comparaison des chroniques observées et simulées.

Ainsi, sur le DIN, le modèle d'OLIVRY (2002) permet de mettre en évidence les pertes sans toutefois s'intéresser à la dynamique interne. Un modèle hydraulique est donc nécessaire.

En effet, la modélisation hydraulique de ces processus permettra la visualisation des hauteurs d'eau dans la plaine inondable.

#### 2.1.2 Les modèles hydrauliques à surface libre disponibles

##### 2.1.2.1 La modélisation monodimensionnelle<sup>1</sup> – résolution complète

Elle s'appuie sur la résolution des équations hyperboliques de Barré de Saint Venant 1D (SAINT-VENANT, 1871). Ces équations sont en réalité une simplification des équations de Naviers-Stokes (PAQUIER, 1995) :

Equation de conservation de la masse :	$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$	(1)
Equation de conservation de la quantité de mouvement :	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} + P \right) = -g \frac{Q Q }{K^2 S R^3} + B + kq \frac{Q}{S}$	(2)
Où : $t$ le temps, $x$ l'abscisse longitudinale, $S$ la section mouillée, $Q$ le débit, $q$ le débit d'apport latéral, $k$ un coefficient, $g$ l'accélération de la pesanteur, $Z$ la cote du fond, $K$ le coefficient de Strickler, $R$ le rayon hydraulique, $h$ la hauteur d'eau, $L$ la largeur, $P = \int_0^h g(h-y)L(x,y)dy$ la pression et $B = \int_0^h g(h-y) \frac{\partial L}{\partial x} dy$ la pression latérale		

Ce modèle s'appuie sur les considérations suivantes (VAZQUEZ, 2010) :

- L'écoulement est unidimensionnel et rectiligne ;
- La surface du fluide est graduellement variable ;
- La répartition du fluide sur une verticale est hydrostatique ; chaque élément sur une verticale se déplace à la vitesse moyenne de l'écoulement ;
- Le fluide est parfait, incompressible et à une masse volumique constante.

Malgré la rapidité de résolution de ces équations, les limites à l'utilisation de ces modèles sont les suivantes :

- Les écoulements doivent être peu débordants (ROUX, 2004) ;
- La plaine d'inondation ne doit pas posséder de fortes singularités (obstacles transversaux) ;
- La topologie de la rivière ne doit pas évoluer avec les débits (coupures de méandres, écoulements dans des bras normalement à sec) (FINAUD-GUYOT, 2009).

Malgré ces limites, ce modèle est utilisé pour représenter la dynamique d'inondation des grands fleuves sur lesquels s'exercent des influences aval (cas particulier du régime fluvial) (BAUME et al. 2006).

Cependant, lorsque l'on s'intéresse à une rivière en crue, la vitesse ne peut plus être considérée comme homogène dans une section en travers et rend inacceptable l'utilisation des modèles 1D (PAQUIER, 1996).

<sup>1</sup> On trouve également les termes : unidimensionnel, filaires ou 1D dans la littérature

### 2.1.2.2 La modélisation monodimensionnelle – les formes simplifiées

L'équation de l'onde dynamique de Saint-Venant (*cf. équation 2*) peut selon les cas n'être que partiellement résolue (BAUME et al. 2006), par :

- Une équation de l'onde cinématique, qui traduit un transfert sans atténuation. Ce modèle est adapté aux fortes pentes et aux crues rapides ;
- Une équation de l'onde diffusante, qui engendre un transfert et une atténuation. Sa résolution est adaptée aux crues de plaine sauf si le niveau aval est variable.

Ces équations, non adaptées à la configuration du delta, ne doivent en aucun cas être utilisées.

### 2.1.2.3 Les modèles monodimensionnels à casiers

Pour améliorer les lacunes des modèles 1D, une approche consiste à modéliser le lit mineur par un modèle monodimensionnel et à représenter la plaine d'inondation par un ou plusieurs casiers de stockage dans le(s)quel(s) on néglige la vitesse de l'eau. Le phénomène de débordement est alors modélisé par des déversoirs latéraux, fonctionnant en régime noyé puis dénoyé. Le fonctionnement de ces casiers est régi par des lois de remplissage/vidange. Néanmoins, le calage des coefficients de transfert entre casiers est particulièrement difficile (ROUX, 2004).

Les inconvénients d'une approche par casiers sont connus :

- En cas de forte submersion des digues, on obtient soit un écoulement transversal qui ne peut plus être approché par une formule de déversoir noyé ; soit deux écoulements parallèles avec des échanges mal représentés entre lits.
- Le phénomène de mise en eau du casier de stockage est négligé. La première goutte débordante se retrouve au point le plus bas du casier (PAQUIER, 1996).

De plus, cette extension des modèles monodimensionnels devient insuffisante dans le cas de grandes plaines inondables, car les obstacles ponctuels y sont fréquents. De ce fait, une modélisation bidimensionnelle est parfois recherchée.

### 2.1.2.4 Les modèles bidimensionnels

Ils résolvent les équations de Saint-Venant 2D. La géométrie du cours d'eau est représentée par un maillage à deux dimensions. Ce dernier permet de considérer les écoulements transversaux dans les lits mineurs et majeurs, par la caractérisation de deux vecteurs vitesses.

Les limites à l'utilisation de ce modèle sont les suivantes :

- Il nécessite une connaissance de la géométrie de la rivière suffisamment fine, pour que la simulation 2D soit pertinente (RUNGO et al. 2003) ;
- Il engendre des temps de résolution non négligeables ;
- La plupart des codes commerciaux ne prend pas en compte la spécificité de la rivière : faible profondeur, par rapport à la largeur, faible largeur par rapport à la longueur. (PAQUIER, 1996) (AUDUSSE, 2004)

Ceci explique que très peu d'essais de ce type ont été effectués à l'aide d'un modèle bidimensionnel. Les quelques essais effectués sur des logiciels commerciaux se sont traduits par un grand nombre de mailles, à la transition lit mineur/plaine d'inondation. Ces mailles peuvent être responsables d'un pas de temps très faible pendant la phase de débordement de remplissage et de vidange (PAQUIER, 1996).

Les équations de Saint-Venant bidimensionnelles s'écrivent de la façon suivante (3, 4a, 4b) :

Conservation de la masse:	$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$	(3)
Conservation de la quantité de mouvement :	$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + g\frac{h^2}{2})}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial Z}{\partial x} - g\frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{Ks^2 h^{1/3}}$	(4a)
Conservation de la quantité de mouvement :	$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + g\frac{h^2}{2})}{\partial y} = -gh\frac{\partial Z}{\partial y} - g\frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{Ks^2 h^{1/3}}$	(4b)
Où : $u$ et $v$ les vitesses dans directions $x$ et $y$ , $h$ la hauteur d'eau, $Z$ la cote du fond, $g$ l'accélération de la pesanteur, $Ks$ le coefficient de Strickler.		

### 2.1.2.5 Le couplage 1D/2D

Ce type de modélisation permet de créer un modèle adapté à la morphologie d'une rivière et de limiter la diminution du pas de temps. La complexité du couplage réside dans la capacité à reproduire l'interface lit mineur / lit majeur, à travers laquelle se produit des échanges de quantité de mouvement (FINAUD-GUYOT, 2009).

Cependant, on espère retirer de la modélisation couplée 1D/2D :

- La possibilité de représenter les débits faibles par un modèle classique 1D, pour lequel une description détaillée des profils est possible avec un faible surcout de temps ;
- La représentation la plus complète possible des écoulements de la plaine d'inondation dans laquelle aucune direction n'est privilégiée.

De nombreuses études dressent les avantages et techniques de résolution de cette approche, notamment entre schémas numériques différents (WBM, 2003) ; (VAN PROOIJEN, 2005).

D'autres études permettent de comparer les différences de résultats entre modèles couplés et modèles bidimensionnels (TAYEFI et al. 2007).

## 2.2 Modélisation retenue pour pallier aux manques des modélisations antérieures

### 2.2.1 Les manques des modèles antérieurs<sup>2</sup>

La complexité du fonctionnement hydrologique et hydraulique de la cuvette lacustre a été envisagée à travers différents modèles, depuis les années 1970.

Le DIN a d'abord été abordé par une modélisation monodimensionnelle à casiers (SOGREAH ; 2005). Par méconnaissance, la géométrie des casiers (et du lit majeur) est apparentée à un paramètre de calage. Ces casiers sont délimités par des limites fictives. La géométrie utilisée dans le lit mineur est à basse résolution avec un profil tous les 20 kilomètres.

Par la suite, la connaissance des casiers et de leurs courbes de fonctionnement sera sensiblement améliorée par l'apport de la télédétection et du suivi temporel des crues (OLEKSIK, 2008), (MULLENS, 2009), (MYCEK, 2010). De plus, le nombre de profils dans le lit mineur a considérablement été augmenté par la réalisation de mesures ADCP. Désormais, on possède un profil tous les 5 km en moyenne. (BAILLY et al. 2008), (BELAUD et al. 2009).

D'autres modèles, pour s'affranchir des complications liées à la connaissance de la bathymétrie, se sont basés sur une modélisation hydrologique à partir de chroniques hydrométriques (LAMAGAT, 1993). La dynamique interne du DIN a été limitée, au phénomène de laminage. Le transport hydraulique est parfois résolu par l'utilisation de formules simplifiées, réduisant le rôle joué par l'influence aval (BRL, 2007).

<sup>2</sup> Pour de plus amples informations sur les entrées et les limites des différents modèles, ils seront décrits en annexe 1

L'incertitude sur l'ensemble des simulations est décimétrique voir métrique. A ce jour aucun modèle d'études et de prévisions de crues n'est utilisé par l'Autorité du Bassin du Niger (ABN) (PARIS, 2010).

Les différentes modélisations hydrologiques et hydrauliques ayant montré d'importantes limites pour reproduire l'hydrodynamique et le rôle des écoulements transversaux, au sein du DIN, une modélisation bidimensionnelle a été envisagée.

## 2.2.2 *Présentation du modèle bidimensionnel et de la méthodologie*

### 2.2.2.1 Méthodologie mise en place

La modélisation 2D est envisagée pour améliorer la connaissance des processus de submersion des plaines d'inondations du DIN. Elle devrait également permettre de juger si la précision des Modèles Numériques de Terrain satellitaires est suffisante pour la modélisation des inondations de plaines.

Elle nécessite la définition d'un maillage altimétrique plan. Le lit mineur sera décrit par une bathymétrie issue de différentes sources : profils ADCP, et profils IGN des années 1970. Pour la première fois, le lit majeur sera modélisé non pas par des casiers mais par une topographie issue des données satellitaires SRTM et de données cartographiques. Après un traitement individuel de ces données, une critique sera effectuée quant à leur fusion dans un Modèle Numérique de Terrain.

La mise en place d'un maillage optimal entre temps de calcul et précision des résultats sera décrite.

La seconde étape consiste à la modélisation hydrologique « spatialisée » des flux hydriques au sein du DIN. Le modèle hydrologique n'est plus alors vu comme une aide à la connaissance des transferts entre stations mais comme une chronique de données d'entrée et de sortie. Ce modèle permettra de mettre en évidence le rôle des pertes et des apports sur l'hydrodynamique au sein du delta.

La modélisation du DIN, n'a pas été possible dans son ensemble compte tenu du temps nécessaire au traitement des données, à la conception du modèle et au temps de simulation trop importants. Une réflexion a été effectuée quant au choix de sites représentatifs à modéliser.

Une modélisation couplée 1D/2D a été envisagée. Cependant, les incertitudes sur la bathymétrie n'ont pas permis de donner de résultats acceptables. Ainsi dans l'ensemble des modèles 2D présentés, la bathymétrie a été corrigée manuellement. De plus, l'utilisation d'un modèle couplée est rendue difficile par les interactions dynamiques existantes entre les deux sous modèles. En effet, on observe un débordement dans le lit mineur (modèle 1D), il inonde la plaine d'inondation (modèle 2D), puis retourne dans un autre lit mineur (second modèle 2D). Afin de résoudre convenablement ces phénomènes, le modèle couplée doit pouvoir résoudre les interactions dynamiques entre la plaine d'inondation et les deux lits mineurs. De plus, le couplage est contraint par une version multi-biefs non disponible sous RUBAR 3 (1D). Le couplage monodimensionnel des biefs doit être effectué par fusion des fichiers de résultats par bief.

La modélisation bidimensionnelle sera effectuée par le logiciel RUBAR 20, développé par A. PAQUIER du Cemagref de Lyon.

### 2.2.2.2 La modélisation bidimensionnelle sous RUBAR 20

Le code de calcul utilisé pour répondre à la problématique est RUBAR 20, développé par le Cemagref de Lyon (PAQUIER, 1998). Cependant, ce code n'est qu'un maillon de la chaîne de logiciels qu'il est nécessaire d'utiliser.<sup>3</sup>

La résolution des équations bidimensionnelles de Saint-Venant est effectuée sur un maillage composé de quadrilatères ou de tétraèdres. Le schéma numérique qu'il utilise est explicite en volumes finis. Il résout alors un problème de Riemann par le solveur approché de Roe<sup>4</sup>. L'inconvénient de l'utilisation de ce schéma est lié à la limitation du pas de temps par des contraintes numériques (DABBENE et PAILLIERE, 2003). Afin de donner un ordre de grandeur, la résolution complète des écoulements sur le DIN, nécessiterait une durée de simulation supérieure au mois.

<sup>3</sup> L'ensemble de la chaîne constitutive de RUBAR 20 est présentée en annexe 2

<sup>4</sup> La résolution complète du schéma numérique est donnée en annexe 3



## 2.3 Les données nécessaires à la mise en place du modèle

En vue du nombre important de données et études réalisées, seules celles utilisées dans le cadre de cette modélisation bidimensionnelle des écoulements seront décrites.

### 2.3.1 *Présentation des données*

- **Les documents cartographiques au 1/50 000**

Suite aux travaux réalisés pour le modèle mathématique du fleuve Niger (SOGREAH, 1983), l'IGN a effectué différents relevés topographiques et bathymétriques, disponibles en format cartographique. Ces cartes sont en réalité des photographies aériennes redressées. 132 planches (format 15' ; 15') seront utilisées pour notre étude. Beaucoup d'entre elles possèdent des surcharges altimétriques, dont l'incertitude en altitude n'est pas connue. Le calage longitudinal et latitudinal a été réalisé par PARIS E. (2010). Celui-ci a été effectué à partir des amorces de graduations situées aux 4 coins de l'image. On verra dans la suite de l'étude, que la précision de ce calage avec une erreur quadratique moyenne de 20 mètres peut poser problème pour la mise en place d'un modèle d'écoulements.

- **Les documents cartographiques au 1/200 000**

Ces documents ont été réalisés dans les années 50. Les cartes sont référencées sur un datum basé sur l'ellipsoïde Clarke 1880. Aucun paramètre de transformation de ce datum vers WGS 1984 n'a été publié (PARIS E., 2010). E. PARIS a utilisé l'ensemble des croisillons du quadrillage pour référencer ces cartes. Ainsi, les cartes ont été géoréférencées dans le datum Adindan, puis WGS 1984.

- **Les profils en long et en travers fournis par l'IGN**

Lors de l'élaboration du modèle cité précédemment, d'importants travaux de nivellement ont été effectués sur l'ensemble du DIN (IGN et al. 1982). Les calques considérés ont été retranscrits sous EXCEL (numéro de profil, abscisses linéaires, altitudes). L'altitude, dont l'incertitude n'est pas connue, est fournie dans le système NGAO.

- **Profils obtenus ADCP**

Lors de différentes missions terrains (BAILLY et al. 2008 & BELAUD et al. 2009), des mesures bathymétriques ont été effectuées. Elles ont été réalisées grâce à un profileur de vitesse à effet doppler (ADCP). Cette méthode précise pour la mesure des débits (ordre de quelques pourcents), permet de déterminer dans le même temps la profondeur du cours d'eau. Ces mesures ne sont pas exploitables de suite, puisque les profondeurs indiquées sont révélées par rapport au niveau d'eau. Sur site, aucun référencement absolu n'est possible, sauf si une borne nivelée est située à proximité.

Le calage des profils en altitude ne peut être effectué que par l'utilisation conjointe d'une mesure altimétrique par GPS (précision centimétrique). Cet outil n'a pas été utilisé lors des différentes campagnes de mesures, car il nécessite une transformation de l'ellipsoïde WGS 1984 avec l'ellipsoïde NGAO.

Par la suite, des données GPS ont été collectées par MULLENS A. (2009) pour déterminer l'ondulation existant entre ces deux ellipsoïdes. Ces mesures bien qu'utilisées pour caler en altitude des points tels que les bornes, n'ont pas permis de caler les profils en altitude.

- **Les stations hydrométriques et leurs relevés**

Des relevés limnimétriques et hydrométriques d'un certain nombre de stations sont disponibles. Ils permettent d'analyser la dynamique de l'inondation, le décalage temporel de la crue, les volumes transités, ou encore le volume perdu entre l'entrée et la sortie du DIN. Les lacunes dans les chroniques journalières ont été comblées par l'utilisation du modèle de propagation de Lamagat.

- **Modèle Numérique de Surface (MNS) issu du capteur SRTM3**

Le Modèle Numérique de Surface (MNS) SRTM3 est utilisé comme un modèle numérique de Terrain (MNT).

Noté dans la suite SRTM, SRTM3 (distribué par le NGA et la NASA) est le résultat d'une mission menée en 2000, dont l'objectif était de réaliser un modèle numérique de terrain global couvrant 80 % de la surface du globe ; entre 60°N et 56°S, par un découpage de dalle de 1° x 1°, avec une erreur absolue relative décimétrique.

Différents test de comparaison avec des mesures GPS ont été réalisés sur le continent africain. L'incertitude à 90% est de 5,6 mètres.

Après transformation de l'altitude issue du géoïde EGM96 (système utilisé par SRTM) en EGM08 (système altimétrique assimilé au système NGAO), le MNT a été lissé (PARIS E., 2010). Le but de cette opération est de limiter l'effet du sursol. Après avoir effectuée ce lissage grâce à des fenêtres mobiles de différentes tailles, PARIS E. compare les résultats avec plus de 3000 points cotés (surcharges topographiques des cartes au 1/50 000).Après analyse des résultats, l'écart type reste toutefois supérieur au mètre (1,58 m en amont et 1,88 m en aval).

- **Les images Landsat**

Les images Landsat ont été utilisées par le passé, dans le but de réaliser un suivi du processus d'inondation de la crue annuelle du fleuve depuis le début de la montée des eaux jusqu' à l'étiage (BATTI, 2001).

Les images appelées communément Landsat sont issues du capteur ETM+ embarqué sur le satellite Landsat.

Pour couvrir l'ensemble du delta, deux images sont nécessaires. Trois dates d'images ont été mises à dispositions : 28 juillet 2001, 16 Octobre 2001 et 28 Novembre 2001. Elles serviront notamment à la délimitation de l'interface lit mineur/lit majeur.

- **Les images MODIS**

MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) est un capteur présent sur les satellites Terra et Aqua. Le satellite Terra passe au dessus de l'équateur dans la matinée, tandis que le satellite Aqua traverse l'équateur dans l'après-midi. Avec une fauchée de 2330 km, ces deux satellites peuvent couvrir la totalité du globe en un ou deux jours. Le capteur est composé de 36 bandes spectrales allant des longueurs d'ondes de 0,4 µm (bleu) à 14,4 µm (infrarouge thermique). OLEKSIK A. (2008), utilise les synthèses à 8 jours pour traiter en binaire les surfaces en eau (présence ou non présence). Ces images « à basse résolution spatiale » avec une synthèse tous les 8 jours permettent notamment de valider la dynamique reproduit par le modèle hydraulique.

### 2.3.2 Utilisation des données nécessaires

L'utilisation des ces données est résumée, dans le tableau suivant (cf. tableau 1):

Données	Limites	Utilisation
MNT SRTM	Incertitude en Z : +/- 2m Pixel : 90 m	Bathymétrie du lit majeur
Cartes au 1/50 000	Incertitude en X et Y : 20 m Incertitude en Z : Inc.	Digitalisation du lit mineur Utilisation des points cotés dans les casiers rizicoles pour la topographie du lit maj.
Cartes au 1/200 000	Incertitude en X et Y : Inc. Incertitudes en Z : Inc.	Positionnement des ouvrages transversaux
Profil IGN	Incertitudes en X et Y : 20 m Incertitudes en Z : Inc. 1 profil tous les 20 km	Bathymétrie du lit mineur
Profil ADCP	Non calés Incertitudes sur P : inc. 1 profil tous les 5 km	Bathymétrie du lit mineur
MODIS	Pixel : 1 km	Validation des simulations par comparaison visuelle
Landsat	Pixel : 30 m	Découpage du lit mineur

TABLEAU 1 : DONNEES UTILISEES POUR LA MODELISATION 2D ET LEURS INCERTITUDES

### 3. Construction d'un modèle bidimensionnel

#### 3.1.1 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est envisagée pour intégrer les forçages externes qui s'appliquent aux écoulements (évapotranspiration, précipitations) et définir la contribution des précipitations effectives sur le débit mesuré. La superficie de la zone d'étude (35 000 km<sup>2</sup>) impose une spatialisation des phénomènes hydrologiques.

Ainsi, les données pluviométriques seront définies sur 7 zones homogènes par la méthode des polygones de Thiessen.

Le gradient Nord/Sud du régime d'évapotranspiration sera modélisé par un découpage de 2 zones supposées homogènes : une zone à l'amont du Lac Débo, sous influence du régime de Mopti et une zone aval, sous l'influence des chroniques observées à Tombouctou. Le calcul de l'évapotranspiration sera basé sur la connaissance du ratio des surfaces inondées entre ces deux zones.

##### ➤ **Délimitation du secteur d'étude**

Afin de prendre le DIN dans un ensemble cohérent, on délimite le DIN en considérant que les écoulements depuis l'entrée sont canalisés vers une sortie unique et que les apports extérieurs sont négligeables.

Le modèle hydrologique est alors résolu sur la zone suivante :

- Entrées dans le DIN : Douna (Bani) et Ké Macina (Niger) ;
- Sortie du DIN : Koryoumé (port de Tombouctou).

##### ➤ **Choix des flux hydriques prépondérants et mise en place d'un bilan hydrologique**

Le modèle s'appuie sur les considérations suivantes :

- La variation de stock est considérée constante entre deux années. Cette hypothèse est vérifiée par une faible variation interannuelle de la surface inondée en période de basses eaux (MULLENS, 2009) ;
- Les termes d'infiltrations sont négligés (méconnus). Néanmoins, selon OLIVRY (1995). Les précipitations compensent les infiltrations dans le bilan annuel. On assimile donc les pertes globales comme étant uniquement le résultat de l'évaporation,
- Par méconnaissance, les apports et sorties externes aux domaines du modèle sont négligés.

Le modèle envisagé est basé sur la résolution d'un bilan hydrologique annuel dont les composantes principales sont le ruissèlement et l'évaporation. Néanmoins, il permet de quantifier les pertes et de déterminer la part du volume précipité contributif à l'écoulement (notion de coefficient de ruissèlement).

Ainsi, en partant du bilan hydrologique (5), on simplifie par les processus « prépondérants » à l'échelle du DIN (6):

$\sum_I^{365} (V_{Pe_i} + A_{e_i} + V_{e_i} + R_{n_i}) = \sum_i^{365} (V_{ETP_i} + V_{s_i} + A_{s_i} + I_{n_i} + \Delta_{s_i})$	(5)
$\sum_{i=1}^{365} (V_{Pe_i} + V_{e_i}) = \sum_i^{365} (V_{ETP_i} + V_{s_i})$	(6)
Où : $V_{Pe_i}$ le volume précipité contributif à l'écoulement (volume de précipitations effective), $A_{e_i}$ le volume ruisselé entrant externe au système (affluent au système), $V_{e_i}$ la somme des volumes entrants à Ké Macina et Douna, $R_{n_i}$ le volume apporté par les résurgences des aquifères, $V_{ETP_i}$ le volume évaporé par évapotranspiration, $A_{s_i}$ le volume ruisselé sortant externe au système, $V_{s_i}$ le volume sortant à Koryoumé, $I_{n_i}$ le volume infiltré dans les aquifères, $\Delta_{s_i}$ la variation de stock dans le système.	

La résolution complète de ce bilan (6) pour obtenir le coefficient de ruissèlement est donnée par l'équation (7):

$$C_R = \sum_{i=1}^{365} \left[ \frac{(Q_{S_i} - Q_{E_i})\Delta_t + (\sum_{j=1}^n (E_j S_j))_i}{(\sum_{k=1}^m (P_k A_k))_i} \right] \quad (7)$$

Où :  $Q_{S_i}$  le débit sortant journalie,  $Q_{E_i}$  le débit entrant journalier,  $\Delta_t$  le pas de temps de la mesure,  $E_j$  l'ETP journalière par zone homogène,  $S_j$  la superficie d'une zone homogène soumise à évapotranspiration, rapportée à la superficie totale de la zone d'évapotranspiration (zone inondable). Cette superficie variable en fonction du temps a été déterminée dans (MULLENS, 2009), Indice  $n$  le nombre de zones homogènes soumises à l'évapotranspiration,  $P_k$  la pluviométrie journalière sur une zone homogène,  $A_k$  la superficie d'une zone homogène soumise aux précipitations brutes, rapportée à la superficie totale sur laquelle on effectue le bilan hydrologique (superficie du BV), Indice  $m$  le nombre de zones homogènes soumises aux précipitations brutes

### ➤ Méthode d'intégration des données pluviométriques

Les chroniques pluviométriques journalières sont connues pour 7 stations hydrométriques : Dioura, Mopti, San, Segou, Diré, Tombouctou, Saraferé. La méthodologie des polygones de Thiessen peut alors être envisagée pour considérer l'hétérogénéité spatiale et temporelle des champs de pluie.

Après découpage des polygones de Thiessen sous ARCGIS, les superficies pour lesquelles les intensités sont supposées homogènes sont les suivantes (cf. tableau 2):

Station	Superficie du polygone	Station	Superficie du polygone
Dioura	6 591 km <sup>2</sup>	Diré	7 225 km <sup>2</sup>
Mopti	10 378 km <sup>2</sup>	Tombouctou	2 986 km <sup>2</sup>
San	3 619 km <sup>2</sup>	Saraferé	10 716 km <sup>2</sup>
Ségou	182 km <sup>2</sup>		

TABLEAU 2 : SUPERFICIE DES SURFACES PLUVIOMETRIQUES HOMOGENES DEFINIES PAR LA METHODE DES POLYGONES DE THIESSEN

### ➤ Méthode d'intégration des données d'évaporation

Deux séries de données d'évapotranspiration, au pas de temps mensuels, sont connues. Elles sont relatives aux évapotranspirations mensuelles relevées à Mopti (PICOUE, 1999) et Tombouctou (ORSTOM, 1961) (cf. tableau 3).

Station	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Annuel (mm)
Tomb. (PH)	7,6	8,9	9,5	9,3	5,3	6,0	7,1	7,2	5,2	4,4	5,4	6,3	2500
Tomb. (PS)	12,5	14	14,9	12,8	8,3	8,7	12,1	12,5	8,9	8,6	10,8	10,9	4100
Mopti (PH)	7,3	7,3	7,0	6,7	5,3	5,5	6,2	6,0	5,3	5,5	6,2	7,0	2290
Mopti (PS)	7,7	8,0	7,3	7,0	6,0	5,7	6,5	6,0	5,3	5,7	6,3	7,2	2393

TABLEAU 3 : DONNEES JOURNALIERES DE L'ETP EN MM ; SOURCE PICOUE (1995) ET ORSTOM (1961) ; DONNEES DE TOMBOUCTOU ISSUES DE MESURES SUR BAC COLORADO ; DONNEES DE MOPTI ISSUES DE LA FORMULE DE PENMAN

### ➤ Résultats et critiques du modèle hydrologique

Le modèle permet de visualiser les valeurs journalières des composantes intégrées : surfaces inondées, volumes entrants, volumes sortants, volumes précipités, volumes évaporés (cf. figure 3).

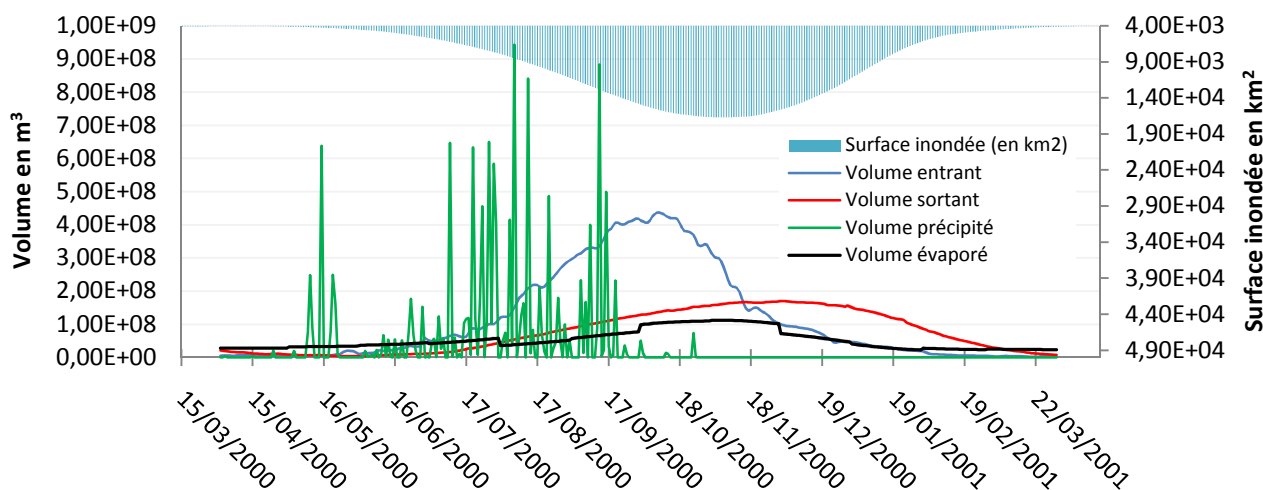


FIGURE 3 : VISUALISATION DES COMPOSANTES DU BILAN HYDRIQUE – EVENEMENT HYDROGRAPHIQUE 2000-2001 - SITE DU DIN, MALI

A partir de ces différentes composantes, il permet le calcul du bilan à l'échelle annuelle, ainsi que la détermination d'un coefficient de ruissèlement moyen (cf. tableau 4).

Evénement hydrographique	Volume entrant	Volume sortant	Volume évaporé	Volume précipité	Cr
Avril 2000 / Avril 2001	4,23 E+10 m <sup>3</sup>	2,73 E+10 m <sup>3</sup>	1,88 E+10 m <sup>3</sup>	1,38 E+10 m <sup>3</sup>	0,28
Avril 2001 / Avril 2002	4,47 E+10 m <sup>3</sup>	2,68 E+10 m <sup>3</sup>	1,90 E+10 m <sup>3</sup>	1,11 E+10 m <sup>3</sup>	0,10
Avril 2002 / Avril 2003	3,42 E+10 m <sup>3</sup>	1,98 E+10 m <sup>3</sup>	1,50 E+10 m <sup>3</sup>	7,37 E+09 m <sup>3</sup>	0,07

TABLEAU 4 : RESULTATS DU MODELE HYDROLOGIQUE (PERIODE 2000/2003) – SITE DU DIN, MALI

Au contraire d'autres modèles, l'hétérogénéité spatiale et temporelles des pluies, sur le DIN, est prise en compte. En effet, le modèle de MULLENS (2008), utilise les données moyennes sur le DIN, au pas de temps mensuel. Il néglige également le gradient d'évaporation par l'étude d'une seule chronique (Mopti).

Cependant, ce modèle hydrologique simplifié ne permet pas d'étudier l'hétérogénéité spatiale de la pluie dans une zone supposée homogène. Cette constatation peut également être effectuée pour l'hétérogénéité temporelle, à un pas de temps inférieur à la journée.

Une limite à l'interprétation des capacités du modèle reste liée à la faible période de simulation. En effet, à partir de 2004, on observe une modification de la robustesse des chroniques pluviométriques, sur les stations mentionnées précédemment. Ainsi, il conviendrait de redéfinir les polygones de Thiessen sur le site d'étude.

On observe d'importantes différences de valeurs du coefficient de ruissèlement sur la période 2000 à 2003 (Cr compris entre 7 % et 28 %). L'estimation du coefficient de ruissèlement semble cohérente. En effet, la croissance du Cr varie avec celle du volume précipité. De plus, le CR varie de manière parallèle à la surface inondée et donc au volume entrant.

Malgré ces bons résultats le modèle s'appuie sur une hypothèse réductrice. En effet, l'utilisation d'un coefficient de ruissèlement moyen suppose que l'ensemble du BV est contributif à l'écoulement. Cependant, d'après AMBROISE B. (1999), « la perméabilité des sols est telle que se sont les zones (contributives) les plus proches des cours d'eau, qui alimentent la rivière par écoulement souterrain ». Alors pour une même pluie, le débit dans la rivière est variable selon l'état de saturation des zones contributives. (KREIS, 2004). Cette affirmation a été vérifiée, sur le DIN par GOURCY et al. (2007).

L'année hydrologique retenue pour l'ensemble des simulations est l'année 2000-2001. Elle permet dans un premiers temps de s'intéresser à un événement hydrologique moyen sur ces dix dernières années. Dans le futur, une simulation de l'année hydrologique 2001/2002 devra être envisagée. En effet, cet événement représente le maximum des volumes entrants sur ces dix dernières années (OLEKSIK, 2008).

## 3.2 Mise en place d'un maillage sur le site d'étude

### 3.2.1 Délimitation du lit mineur

Le lit mineur envisagé dans le cadre de cette étude est exclusivement limité au lit mineur pour lequel des sections en travers ADCP ou IGN sont disponibles. Le lit mineur est délimité à l'aide des images de télédétection Landsat (résolution spatiale de 30 m). La délimitation du lit mineur est jugée précise à partir d'une largeur de 150 mètres. Ainsi, le modèle envisagé ne s'intéresse pas aux écoulements dans les biefs d'une largeur inférieure. Cette imprécision reste acceptable devant l'étendue de la zone d'étude et les débits mis en jeu.

La principale limite à l'utilisation des images Landsat est liée au faible nombre d'images traitées (3 pour l'année 2001). Ainsi, l'eau est difficilement dissociable du reste du site, en période de basses eaux. Au contraire, en période de hautes eaux, l'identification du lit majeur est rendu difficile par la mise en place de végétation. Pour des raisons pratiques, le lit délimité est celui déterminé en période de crue.

### 3.2.2 Traitement et fusion des données topographiques dans le lit majeur

Les données topographiques sont de trois types dans le lit majeur : le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issue de l'imagerie SRTM, les points cotés sur les organes spéciaux, les points cotés dans les zones agricoles contrôlées (rizières). Il convient d'effectuer une fusion de ces différentes données, avant la mise en place d'un maillage dans le lit majeur.

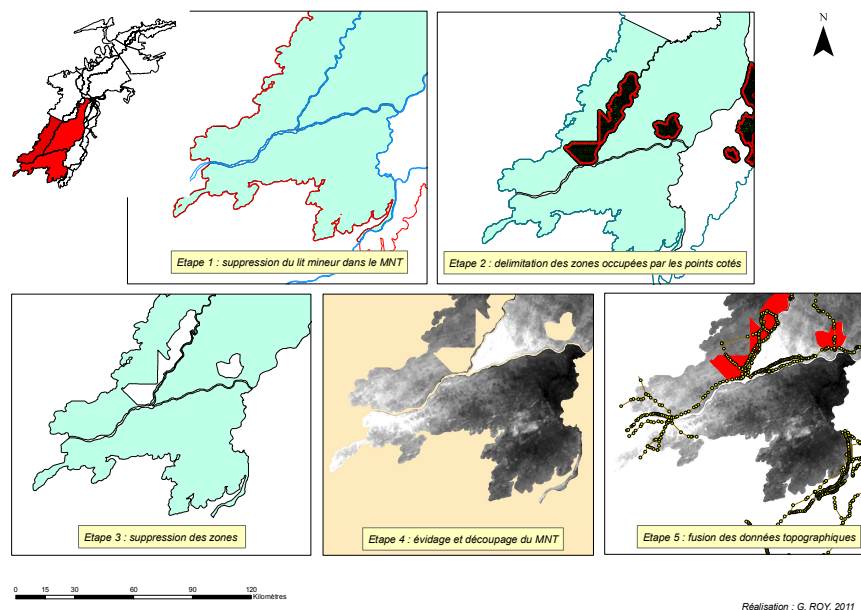


FIGURE 4 : METHODOLOGIE DE FUSION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Les différentes étapes sont réalisées sous le Système d'Informations Géographiques (SIG) ARCGIS (cf. figure 4) :

- **Etape 1** : Une suppression des données issues du MNT SRTM est effectuée dans le lit mineur. En effet, la précision altimétrique du MNT, n'est pas suffisante pour permettre une description fine de ce lit. Les données supprimées sont remplacées par les données issues de campagnes de nivellements (profils ADCP et profils IGN).
- **Etapes 2, 3, 4, 5** : On délimite les zones pour lesquelles on possède des relevés plus précis (points nivelés). Ces points visibles sur les cartographies au 1 : 50 000, sont issus de campagnes topographiques ayant pour objectif de calculer la cubature des casiers rizicoles (2). Le MNT est découpé et évidé dans ces mêmes zones (3) ; (4). A la suite de ces étapes, le MNT est exclusivement limité aux zones où les données de meilleures résolutions ne sont pas disponibles (5).
- **Etape 6** : On fusionne l'ensemble des données. La résolution du MNT (90x90 m) ne permet pas d'envisager les limites ou obstacles à l'écoulement. Pour ces différentes raisons, les points remarquables issus des cartographies au 1/200 000, sont implantés dans le nouveau MNT (6).

### 3.2.3 Traitement de la bathymétrie dans le lit mineur

On dispose de 3 types de profils bathymétriques : les profils issus de la campagne topographique IGN des années 1970, les profils ADCP issus de la campagne 2008, et les profils ADCP 2009<sup>5</sup>.

Au cours de cette partie, l'explication de la méthodologie adoptée quant à leur fusion sera effectuée. D'un point de vue général, on remarquera que les problématiques soulevées sont liées non seulement au calage en altitude et au référencement planimétrique des sections, mais également aux données elles-mêmes : nombre de points constitutifs du profil, occurrence spatiale des profils.

Cependant, la modélisation bidimensionnelle ne pourra être effectuée qu'après la résolution complète de ces différentes contraintes.

#### 3.2.3.1 Traitement des profils IGN

Les profils IGN (1970) sont données en coordonnées abscisses côtes (L, Z). Les bornes de délimitation de ceux-ci sont récupérées sur les cartographies au 1/50000 et projetées du système WGS 1984 en système WGS 1984 UTM 30°N. La partie constitutive du lit majeur est supprimée pour chaque profil. L'utilisation de section parfois décrites par quelques points, montre une limite à la bonne représentation de ce lit.

Les profils découpés sont ensuite projetés grâce à un programme développé sous R : LZtoXYZ.

La longueur du profil et la norme des bornes étant différentes, le programme s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- Le relevé n'est pas unidirectionnel entre les deux bornes ;
- La variation longitudinale de la bathymétrie est négligeable face à sa variation transversale.

Ainsi, le modèle résout la projection par un système d'homothétie (i.e. contraction ou dilatation).

Après résolution du programme, les profils IGN sont décalés de plusieurs centaines de mètres du réseau hydrographique digitalisé sur les images Landsat. Ces incertitudes sont non récurrentes (décalage général  $\Delta x$  et  $\Delta y$  impossible). Elles peuvent provenir de différentes sources :

- la déformation de la linéarité des cartes engendrée par le pliage et le scannage ;
- un mauvais géoréférencement des planches au format 1/50 000 (nombre de points utilisés et répartition).

Ainsi, le référentiel de coordonnées utilisé sera celui des images Landsat (également vrai pour les profils ADCP). Les profils IGN sont re-projetés par une série de nouvelles bornes. Toutefois dans le but de limiter la prolifération d'incertitudes, la perpendicularité des sections avec le réseau hydrographique est conservée : un nouveau programme est constitué pour effectuer les transformations géométriques suivantes :

- Homothétie : le profil est dilaté ou contracté en conservant le rapport de longueurs ;
- Rotation : le profil est pivoté selon un vecteur défini par les nouvelles bornes.

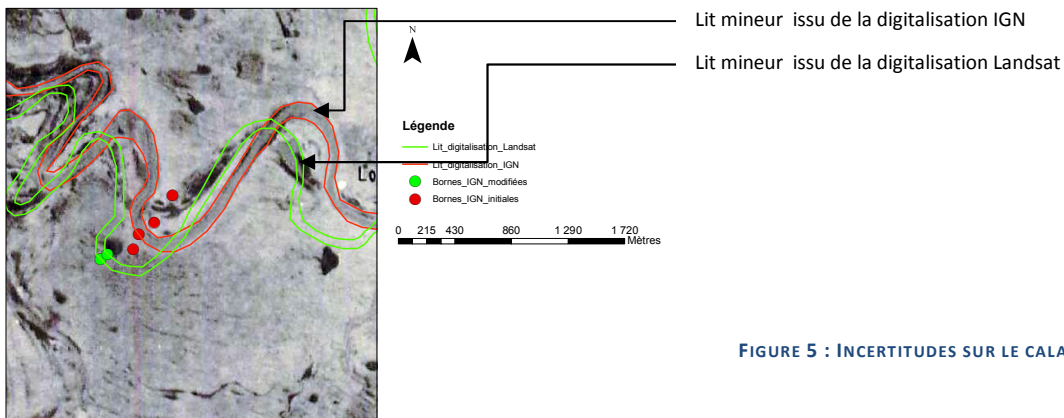


FIGURE 5 : INCERTITUDES SUR LE CALAGE DES PROFILS IGN

<sup>5</sup> La localisation des profils est présentée dans l'annexe 4

### 3.2.3.2 Traitement des profils ADCP 2008 et 2009

#### ➤ Solutions envisagées mais non retenues pour le calage des profils en altitude

Dans le cadre de cette partie, les différents procédés étudiés pour caler les profils en altitude seront détaillés. Par la suite, on verra que les imprécisions étaient trop importantes pour les retenir.

Les profils ADCP 2008 et ADCP 2009 sont fournis en coordonnées « abscisses/profondeurs » (L, P). En effet, la mesure réalisée en régime permanent n'a pas été couplée à une mesure de la ligne d'eau par GPS.

Les bornes étant en adéquation avec le réseau hydrographique digitalisé, le profil est projeté en système WGS 1984 UTM 30° N (programme LZtoXYZ).

Ne disposant pas de points cotés au centre ou à proximité des profils (dans le lit majeur par exemple), ils sont calés entre profils IGN, en considérant deux cas :

- Cas 1 : Les profondeurs d'eaux sont connues, par un profil en long ADCP, sur les profils IGN amont et aval ;
- Cas 2 : La profondeur d'eau est inconnue sur au moins un des profils ou les deux.

Dans le premier cas, le calage en altitude est réalisé par le calcul d'une perte de charge linéaire (on néglige  $u^2/2g$ ), entre les deux profils IGN calés. Dans le second cas, le calage en altitude est réalisé par le calcul d'une pente d'équilibre, entre les deux profils IGN.

Ces programmes ont montré de grosses limites causant des contrepenes de plusieurs mètres. On notera après vérification que les erreurs sont liées à :

- Des profondeurs, qui ne sont pas prises au centre du profil ;
- La perte de charge s'effectue dans un système à deux dimensions : l'écoulement dans le lit majeur s'effectuant en nappes ;
- La pente d'équilibre n'est pas suffisamment précise pour un calage avec une précision recherchée centimétrique.

A partir de l'étude de ces sources d'erreurs, une solution a pu être envisagée.

#### ➤ Solution retenue pour le calage en altitude des profils ADCP

La méthodologie retenue repose sur les constatations effectuées par BRUNET-MORET et al. (1986) :

- L'écoulement est bidimensionnel, en amont du lac Débo (zone amont) ;
- L'écoulement est peu débordant et unidimensionnel, en aval du lac (zone aval).

Suivant ce constat, sur la zone aval, la charge relevée par les stations hydrométriques (au pic de crue) est interpolée suivant la distance curviligne. En amont du lac Débo, le niveau d'eau est obtenu par une méthode de krigeage sous ARCGIS. Alors le niveau d'eau est transposé au point le plus bas du profil. Ces deux méthodes sont limitées par les distances entre stations (cf. figure 6).

La profondeur d'eau dans le lit majeur n'étant pas toujours suffisante pour la navigation (ou la végétation trop imposante), les altitudes au niveau des berges sont inconnues. Celles-ci ont été obtenues en moyennant les 4 points du MNT SRTM les plus proches.



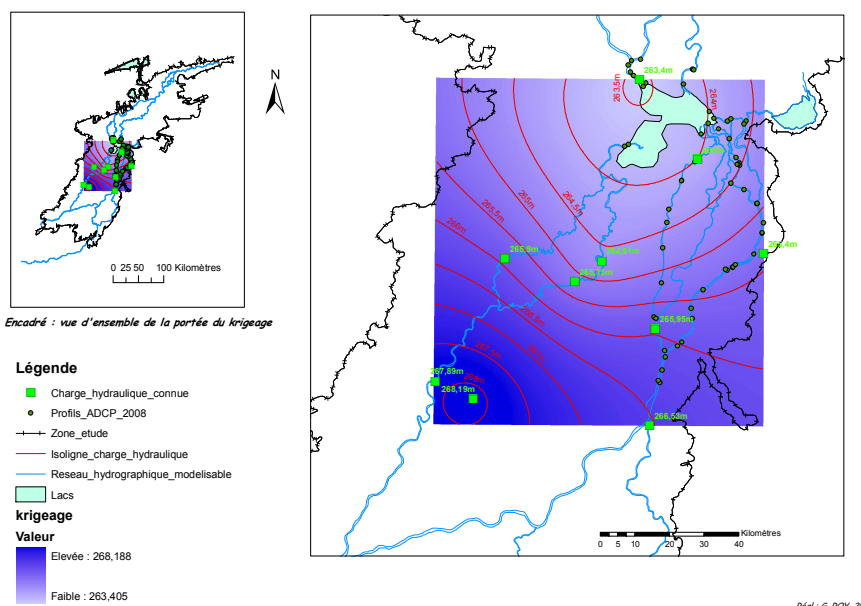


FIGURE 6 : CALAGE DES PROFILS ADCP PAR INTERPOLATION DES MESURES AU STATION HYDROMETRIQUES

### 3.2.4 Critique du traitement avant la constitution du maillage

Cette étude a porté sur 132 profils ADCP 2008, 23 profils ADCP 2009 et une soixantaine de profils IGN.

Malgré les efforts portés sur le calage en altitude des profils (2 mois de travail), celui-ci connaît quelques limites (cf. figure 7) :

- Des sections en travers essentielles ne sont pas connues (confluence ou diffluence),
- Des points hauts sont créés ; le profil amont est surpassé de plusieurs mètres.

Le facteur aggravant provient de l'incohérence d'altitudes entre les profils IGN « supposés » calés. En effet, la présence de points hauts ne permet pas d'envisager un calage des profils ADCP par modélisation hydraulique unidimensionnelle.

La complexité du réseau hydrographique maillé est une limite à la technique de résolution envisagée. Cependant, en l'état actuel des connaissances, il n'est pas envisageable de trouver de meilleurs procédés, le calage des profils ADCP par modélisation 1D n'ayant pas montré d'améliorations significatives (MYCEK, 2010).

Actuellement, la résolution en altitude de la bathymétrie du lit mineur ne permet pas d'envisager une modélisation bidimensionnelle sur la totalité du site. En effet, l'interpolation longitudinale des profils, sur des distances supérieures à la dizaine de kilomètres, serait responsable d'une prolifération d'incertitudes. En l'état actuel, les influences aval joueront un rôle prépondérant dans le modèle envisagé. Les faibles pentes du lit mineur et majeur ne feront qu'accentuer ce phénomène.

La mauvaise connaissance de la bathymétrie est liée au nombre de profil, à leur calage en altitude, et à leur nombre de points constitutifs.

Pour ces différentes raisons, bien que le maillage 1D ait été effectué sur l'ensemble du site, la modélisation bidimensionnelle ne sera envisagée que sur des sites « pilotes » dont la géométrie semble suffisamment fine.

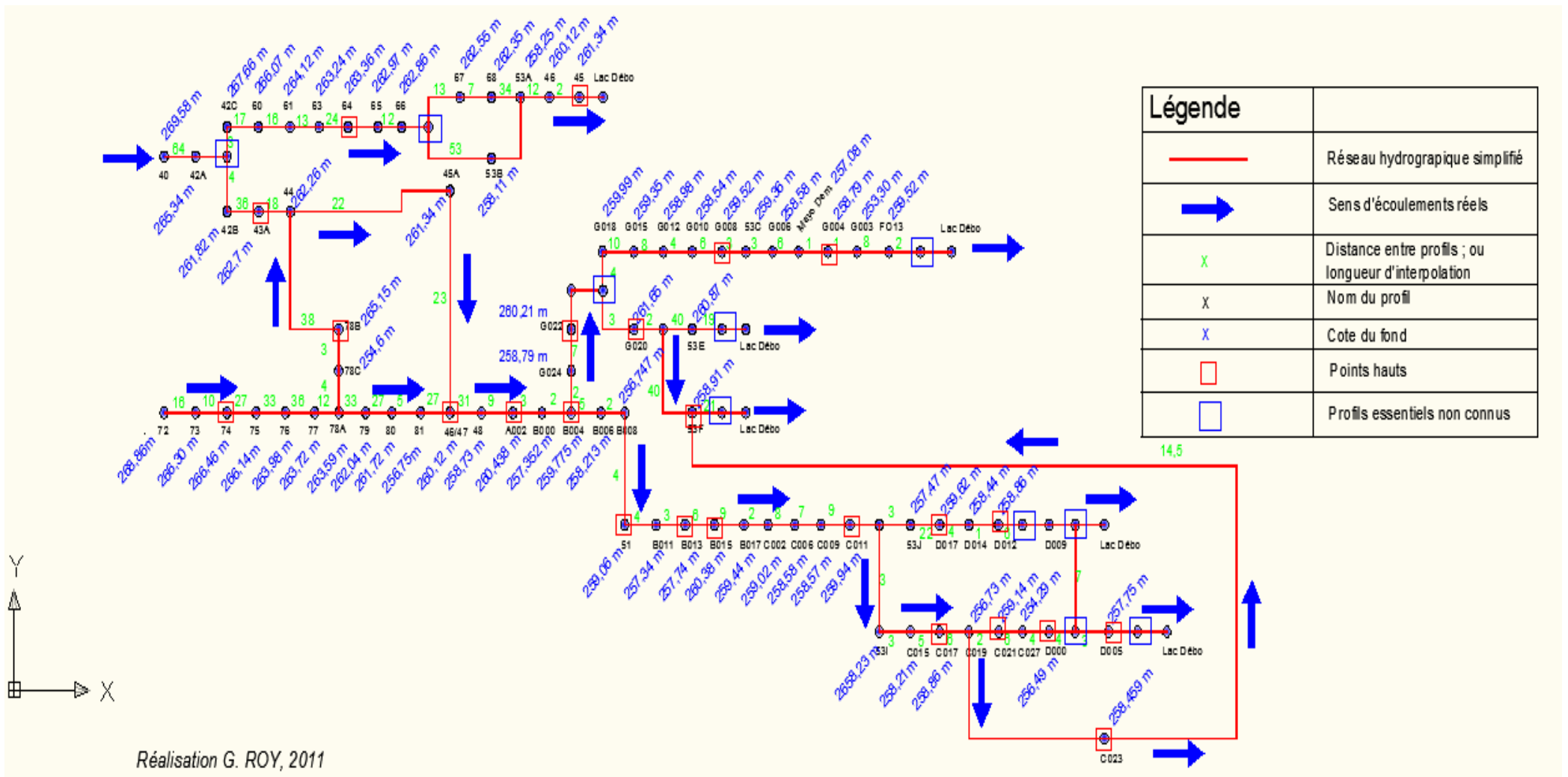


FIGURE 7 : SYNOPTIQUE HYDRAULIQUE DE LA ZONE AMONT DU DIN – APRES CALAGE DES PROFILS ADCP

Après avoir étudié les différentes limites à la fusion des données, il est désormais possible de s'intéresser à la mise en place d'un modèle hydrodynamique des inondations dans le DIN. On s'intéressera alors à la constitution d'un maillage « cohérent et optimal ». Deux sites d'étude seront envisagés afin de s'affranchir des contraintes diagnostiquées précédemment.

### 3.3 Constitution du modèle

#### 3.3.1 Choix des sites d'études

Deux sites seront retenus dans le cadre de cette étude. Ils sont tous les deux situés dans la zone amont du DIN. Les objectifs définis par site sont (cf. figure 8):

- Site 1 :**
- Etudier la cohérence de la fusion de données topographiques dans les lits majeurs et mineurs,
  - Effectuer une analyse de sensibilité sur le coefficient de Strickler dans le cas d'une divergence,
- Site 2 :**
- Etudier la propagation des crues dans un secteur débordant,
  - Etudier l'influence de la confluence Niger/ Bani sur le DIN,
  - Cartographier les hauteurs d'inondation,
  - Evaluer la propagation des écoulements par la présence de points de contrôles intermédiaires.

On doit cependant noter que ces sites nécessitent l'interpolation de profils sur de grandes distances. Pour s'affranchir de ce problème, les sites envisageables se situent à l'aval, dans un secteur peu débordant. D'un point de vue pratique la simulation jusqu'au lac Débo n'est pas envisageable ne disposant pas de conditions aval.

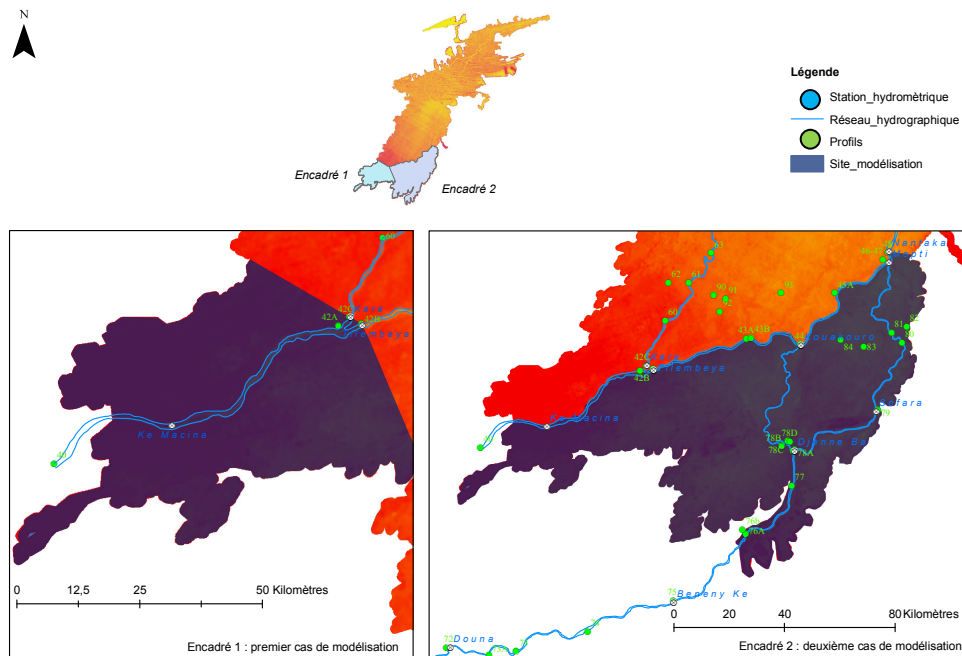


FIGURE 8 : LOCALISATION DES SITES D'ETUDES, DES STATIONS DE MESURES ET DES PROFILS INTERPOLES Réalisation : G. ROY, 2011

#### 3.3.2 Mise en place d'un maillage optimal

La définition d'un maillage plan est la première étape nécessaire à la modélisation hydraulique bidimensionnelle. La précision offerte est liée à sa densité (HARDY et al. 1998). Néanmoins un compromis, entre précision et temps de calcul, doit être effectué (HORRITT et BATES, 2005). En effet, l'introduction de petites irrégularités topographiques (sans impact sur l'écoulement) conduit à une diminution du pas de temps. La stabilité numérique est généralement obtenue en limitant à chaque pas de temps le nombre de Courant<sup>6</sup> maximal à 1 (8). (PAQUIER, 2002)

$C_t = \max_i (v_i + \sqrt{gh}) \frac{\Delta_t}{\Delta_i}$	(8)
<p>Où <math>C_t</math> le nombre de courant, <math>i</math> prend trois ou quatre valeurs, <math>v_i</math> est le module de vitesse dans une direction <math>i</math>, <math>\Delta_i</math> la dimension de la maille dans cette direction et <math>\Delta_t</math> le pas de temps</p>	

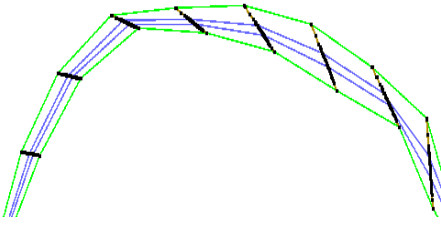
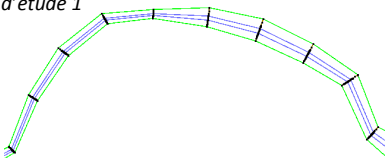
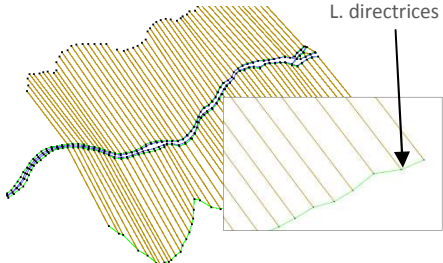
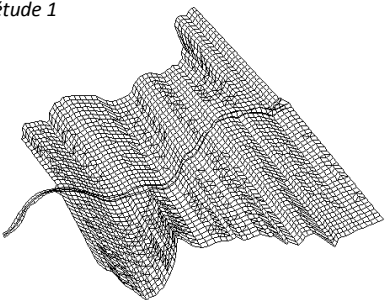
<sup>6</sup> Dans la littérature, le nombre de courant est parfois désigné par CFL comme « Courant Friedrich Levy Condition » ou  $C_t$

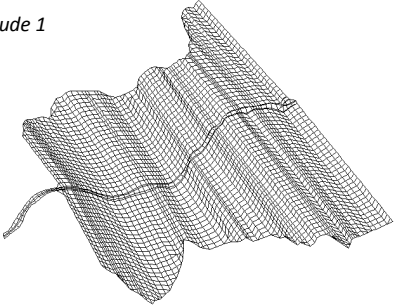
Afin de limiter la réduction pas de temps, les rapports de dimensions entre mailles voisines et entre les deux directions d'une maille, ne doivent pas être trop importants. PAQUIER A. préconise un rapport de 200 entre les petites mailles et grandes mailles. En pratique sous RUBAR 20, le pas de temps peut-être fixe ou variable (utilisation du nombre de Courant).

Dans le cadre de cette étude, les mailles doivent être homogènes pour éviter les contraintes d'instabilités numériques et la réduction du pas de temps. Afin de limiter le temps de calcul, le nombre de mailles ne devra pas dépasser 35 000. Par conséquent la taille de celles-ci sera de 1 km<sup>2</sup> dans le lit majeur. Alors, le temps de calcul sera principalement limité par la taille des mailles dans le lit mineur (trapèze approximé par 4 points et 3 mailles).

### 3.3.3 Mise en place d'un maillage monodimensionnel et bidimensionnel

Dans cette partie, les différentes étapes à la mis en place d'un maillage seront détaillées.

<p>Site d'étude 1</p> 	<p><b>Etape 1 : première interpolation longitudinale des profils</b></p> <p>Les sections en travers sont placées sous FudaaModeleur avec les limites du lit mineur (lignes directrices).</p> <p>Les profils sont importés dans PAMHYR (interface du programme de modélisation 1D RUBAR 3). Les profils sont purgés à 40 points. En vue d'une modélisation 2D, chaque profil est décrit par : un haut de berge gauche et droite ; un bas de berge gauche et droite.</p> <p>Les sections sont passées sous SECMA pour être interpolées tous les 1 km. La totalité des points dans les sections est conservée. L'interpolation longitudinale est basée sur l'hypothèse que la berge gauche et la berge droite ont les mêmes dimensions. Alors, les profils ne respectent pas la perpendicularité du lit mineur et donc la largeur des profils.</p>
<p>Site d'étude 1</p> 	<p><b>Etape 2 : seconde interpolation longitudinale des profils</b></p> <p>Les lignes directrices représentant les berges sont modifiées. Cette étape est envisagée pour : conserver la largeur du lit mineur et respecter la perpendicularité entre les profils et le réseau hydrographique. Les étapes 1 et 2 sont résolues biefs par biefs.</p>
<p>Site d'étude 1</p> 	<p><b>Etape 3 : fusion des biefs et ajout des lignes directrices</b></p> <p>Les différents biefs sont assemblés, sous FudaaModeleur. Le nombre de profils étant différents sur chaque bief, des sections confondues doivent être implantées. Les sections sont étendues dans l'ensemble du lit majeur.</p> <p>Pour prévenir la création de petites mailles, de nouvelles directrices sont créées. Chaque ligne directrice doit contenir autant de points que de profils.</p> <p>A la fin de cette étape, une interpolation transversale est envisageable.</p>
<p>Site d'étude 1</p> 	<p><b>Etape 5 : interpolation transversale – mise en place du maillage 1D et 2D</b></p> <p>L'interpolation transversale est effectuée sous SECMA. Le procédé utilisé est différent selon la résolution d'un maillage 1D ou 2D. Bien que le pas d'espace soit dans les deux cas de 1 km, dans le lit majeur. Lors de l'interpolation pour un modèle 1D (utilisé lors d'un couplage), l'ensemble des points dans le lit mineur est conservé. Au contraire, lors d'un maillage 2D seuls les 4 points positionnés sur les lignes directrices le sont.</p>

<p><i>Site d'étude 1</i></p> 	<p><b>Etape 6 : optimisation du maillage</b></p> <p>Dans l'étape d'interpolation transversale le maillage a été effectué en considérant les lignes directrices et le nombre de points sur les sections en travers étendues (étape 5). Ainsi, le maillage n'est pas obligatoirement optimal (en homogénéité et en temps de calcul). La correction du maillage devient alors contraignante. En effet, le maillage doit être corrigé mailles par mailles (par suppression et nouvelle saisie des sommets). Une méthode plus rapide consiste à redéfinir de nouvelles directrices entre lesquelles sera effectuée une nouvelle interpolation.</p>
<p><b>Etape 7 : projection des altitudes</b></p> <p>Une fois l'optimisation du maillage terminée, il devient envisageable de projeter les altitudes sur les sommets des mailles. Les altitudes du lit majeur sont projetées en faisant passer sous MODIFM les différents fichiers topographiques : 31 fichiers correspondants au MNT SRTM (obtenus par un programme sous R), 1 fichier de points cotés, 1 fichier d'obstacles à l'écoulement. Ces fichiers sont passés dans cet ordre. En effet, il convient d'interpoler des données les moins précises au plus précises</p>	

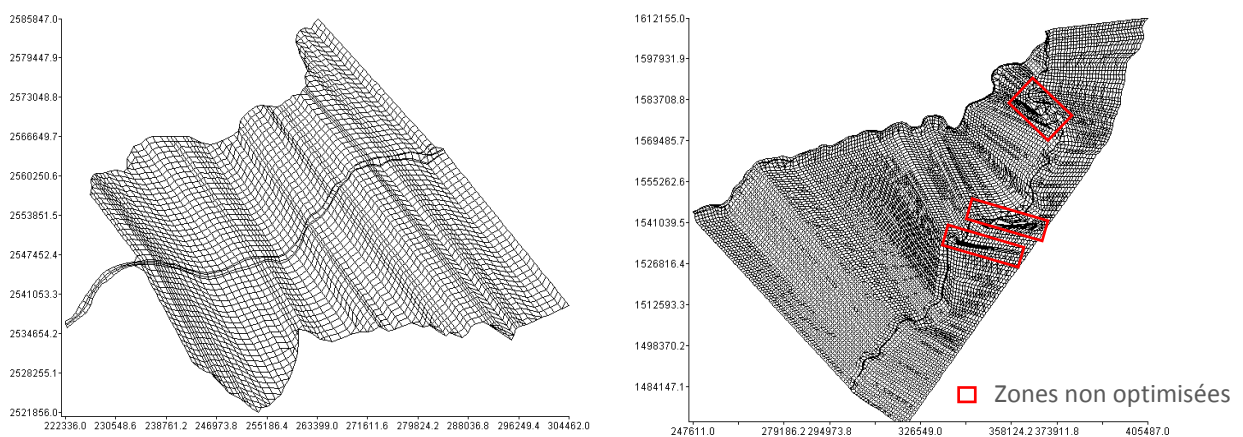
➤ **Critique du maillage**

La description bidimensionnelle des profils en 4 points (soit 3 mailles) entraîne une forte incertitude. Cependant sans couplage 1D/2D, elle permet de limiter la diminution du pas de temps de calcul. Néanmoins, des coefficients de frottements différents peuvent être définis sur les 3 mailles du lit mineur.

L'utilisation d'un pas d'interpolation kilométrique, ne permet pas de représenter les méandres dont le rayon de courbure est inférieur à celui-ci. A l'échelle du DIN, la perte de charge engendrée et l'effet provoqué par leurs courts-circuits semblent négligeables.

Dans le cadre du deuxième cas d'étude, la constitution du maillage s'est avérée contraignante. En effet, le réseau très méandreux a conduit à multiplier le nombre de sections confondues et de lignes directrices pour constituer un maillage cohérent. A ce jour, le maillage à l'interface lit mineur/ lit majeur ne peut plus être optimisé (cf. figure 9).

La projection des points d'obstacles à l'écoulement (digues, remblais) n'a pas d'influence sur le maillage. Pour améliorer la description de ces ouvrages, il serait nécessaire d'augmenter la densité de points cotés par une interpolation linéaire. Par la suite, une zone tampon, d'une largeur supérieure à 90 mètres doit être envisagée pour supprimer les données du MNT SRTM à proximité. Ce procédé n'a pas pu être envisagé dans le cadre de cette étude.



**FIGURE 9 : MAILLAGES UTILISES DANS LA SUITE DE L'ETUDE - SITE D'ETUDE 1 (A GAUCHE) ; SITE D'ETUDE 2 (A DROITE)**

### 3.4 Définition des paramètres de la modélisation

#### 3.4.1 Frottements

Les frottements représentent les rugosités du terrain naturel. Ils sont définis par les coefficients de Chézy<sup>7</sup> ou de Strickler ( $m^{1/3}/s$ ). Dans le cadre de cette étude, ce paramètre est délicat à définir. Il varie notamment avec la période de croissance des végétaux. La mesure dans laquelle elle affecte le coefficient de Strickler dépend de la profondeur de l'écoulement, du périmètre mouillé recouvert de végétation, de la densité de végétation immergée ou encore de l'organisation de la végétation par rapport à l'écoulement (ARCEMENT et SCHNEIDER, 1989). De plus, ce paramètre évolue avec les pratiques agricoles : pâturage, fauchage. Le temps de calcul des modèles bidimensionnels permettent peu à ce jour d'utiliser des méthodes stochastiques ou Bayésiennes (ARONICA et al. 1998). C'est pourquoi dans certains modèles, le coefficient est considéré comme une variable pouvant être approchées par des polynômes d'ordre élevés en fonction de la hauteur d'eau (ZAGHLOUL, 1998).

Dans le cadre de cette étude une analyse de sensibilité sera envisagée dans le cadre du site 1. Elle portera sur les rugosités suivantes (cf. tableau 5) :

Modélisation	Rugosité dans le lit majeur	Rugosité dans le lit mineur	
		Mailles externes	Mailles internes
1	25	30	35
2	15	30	30
3	25	30	30
4	25	40	40

TABLEAU 5 : RUGOSITES UTILISEES DANS LES DIFFERENTES SIMULATIONS DU CAS 1 (COEFFICIENTS DE STRICKLER ; K DONNES EN  $m^{1/3}/s$ )

Les valeurs de K ont été adaptées d'un abaque fourni par VASQUEZ J. (2010). Néanmoins elles sont difficilement transposables au site d'étude. Pour ces raisons, elles ont été comparées aux valeurs de calage des modèles antérieurs.

Les coefficients peuvent être analysés de la façon suivante (cf. tableau 6) :

K ( $m^{1/3}/s$ )	Signification théorique
25 à 40	Grands cours d'eau de largeur supérieure à 30 mètres ; section régulière sans broussailles
10 à 25	Grands cours d'eau de largeur supérieure à 30 mètres ; section irrégulière et rugueuse
25 à 30	Plaine d'inondation ; Zone cultivées récoltes sur pieds
10 à 25	Plaines d'inondations ; Broussailles moyennes ou denses

TABLEAU 6 : RUGOSITES K DONNEES – SOURCE : (VAZQUEZ, 2010)

#### 3.4.2 Choix des conditions aux limites

Lors de la mise en place du modèle, il est nécessaire de connaître et définir les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions hydrauliques à l'amont et à l'aval des limites du modèle. Elles sont utilisées pour résoudre les équations (MARANT, 2009). Lors de la mise en place des modèles, trois conditions aux limites doivent être définies : les conditions aux limites amont, les conditions aux limites aval, les conditions aux limites externes au domaine.

##### ➤ Conditions aux limites amont

Les conditions aux limites amont sont définies sur les ensembles de trois arrêtes composant le lit mineur. Rubar 20 répartit les conditions amont sur chaque arrêtes. Les calculs étant effectués en régime transitoire pour un écoulement fluvial, les conditions amont seront constituées de deux paramètres ; un hydrogramme tangentiel à la maille, un hydrogramme normal à la maille. Ne connaissant pas les échanges entre les différentes mailles, le débit tangentiel est fixé à 0.

<sup>7</sup> Le coefficient de Chézy C est défini par  $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$  où  $\lambda$  est le coefficient de Darcy-Weisbach, que l'on peut obtenir à partir de l'abaque de Moody.

Dans le cas d'un écoulement à surface libre, les coefficients de Strickler K et de Chézy sont liés par la relation  $C = K \cdot R_h^{\frac{1}{6}}$ .

➤ **Conditions aux limites aval**

PAQUIER (1995) définit les conditions aux limites à imposer dans un calcul en régime transitoire, selon le nombre de Froude<sup>8</sup> :

- L'écoulement est torrentiel ou supersonique ( $u > c$ ) : aucune donnée n'est imposée, les valeurs intérieures sont reprises à la limite ;
- L'écoulement est fluvial ou subsonique ( $u < c$ ), on impose une hauteur d'eau ou une loi de tarage.

BAUME et al. (2006) et DEGOUTTE (inc.), décrivent les limites à l'utilisation des lois de tarage, dans le cas de chenaux à très faible pente, comme sur l'ensemble du DIN. En effet dans ce cas, l'onde de crue (appelée onde diffusive) s'amortit au fur et à mesure de sa propagation vers l'aval, contrairement à l'onde cinématique. Une crue s'atténue donc d'autant mieux que le lit est large et que le tirant d'eau est élevé. Ainsi, contrairement au cas du régime permanent uniforme, ou à celui de l'onde cinématique (cas où la ligne d'eau est parallèle au fond), celle de l'onde diffusive n'est pas univoque. Dans un problème de type diffusif comme celui présenté dans les sites d'études, à chaque valeur du débit correspondent deux tirants d'eau ( $h$ ) différents en crue et en décrue (cf. figure10).

Pour ces différentes raisons les conditions aux limites aval seront données par le niveau d'eau (pente hydrostatique) en fonction du temps.

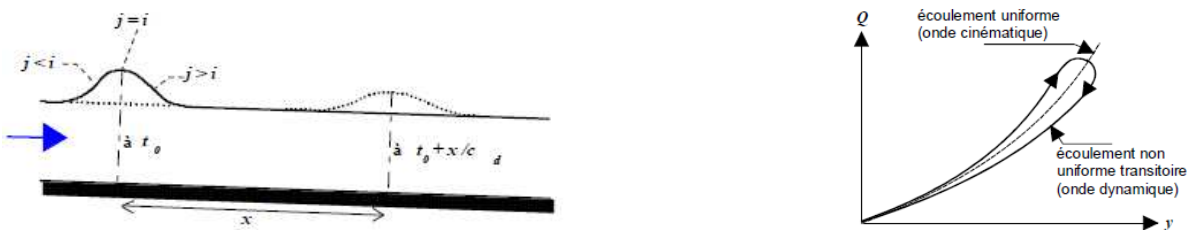


FIGURE 10 : AMORTISSEMENT DE L'ONDE DIFFUSIVE (A GAUCHE) ; RELATION  $Q=f(y)$  NON UNIVOQUE (A DROITE) – SOURCE DEGOUTTE (INC.)

➤ **Les conditions aux limites externes au modèle**

Les conditions aux limites externes sont déterminées sur le pourtour du site d'étude. Ne disposant pas de données précises deux types de conditions peuvent être implantées dans le modèle (PAQUIER, 1995) :

- Une sortie libre : seule une sortie torrentielle sur l'arrête est possible ;
- Une réflexion sur la paroi (arrête imperméable) : cette condition se traduit par une vitesse normale nulle et une vitesse tangentielle égale à la valeur intérieure (glissement).

Les conditions sur les arrêtes externes utilisées dans le cadre de cette étude seront représentées par une réflexion. En effet, le domaine des sites d'études ne permet pas de représenter la zone inondable dans son ensemble. On notera cependant que l'influence aval exercée sur les arrêtes externes ne pourra pas être retranscrit.

### 3.4.3 Conditions initiales

Les conditions initiales caractérisent la zone modélisée à l'instant  $t_0$ . Il s'agit des conditions hydrauliques initiales (hauteur d'eau et débit). Dans le cas étudié, le lit majeur est initialement hors d'eau, et les variables hydrauliques sont donc nulles. Dans le lit mineur, l'écoulement est réduit (1/10 de la section de plein bord). Ainsi, on fixe sur les limites amont deux valeurs : une côte et un débit. Afin de limiter les problèmes d'instabilités, on modélise une période de 1 mois avant la mise en place de la phase de crue (mois d'avril).

<sup>8</sup> Le nombre de Froude est un nombre dont le carré représente le rapport de l'énergie cinétique du liquide en mouvement et de l'énergie potentielle liée à la pesanteur. Il a un rôle tout à fait fondamental pour caractériser les écoulements. Le nombre de Froude ( $F$ ) est donné par  $F = \frac{U}{\sqrt{gDh}}$  ou  $F = \frac{u}{c}$  ; Lorsque  $F < 1$  (ou  $h > h_c$ ), le régime est dit fluvial ; Lorsque  $F > 1$  (ou  $h < h_c$ ), le régime est torrentiel ; Lorsque  $F=1$ , le régime est critique et  $h=h_c$

### 3.5 Intégration des données hydrologiques dans le modèle hydraulique

Les données tirées du modèle hydrologique sont implantées dans le modèle hydraulique (en mm/h). Le bilan (précipitations efficaces diminuées de l'ETP) est intégré au pas de temps journalier. Il est défini par unités hydrologiques homogènes issues des polygones de Thiessen (pluie) et des zones évaporatoires (amont/aval). Ainsi, pour la zone sous influence de la station de Mopti, on obtient les données suivantes (cf. figure 11) :

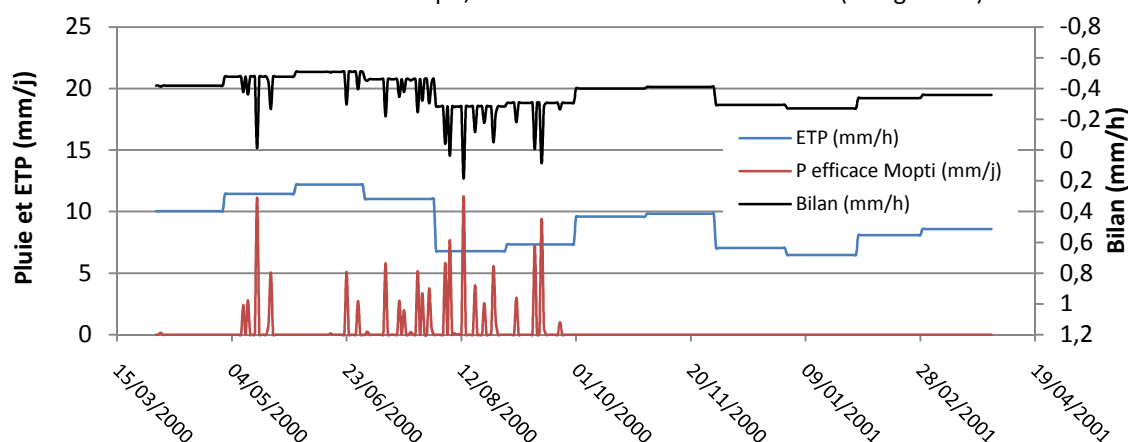


FIGURE 11 : EXEMPLE DE BILAN P-ETP DE LA ZONE HYDROLOGIQUE SOUS LE REGIME HYDROLOGIQUE DE MOPTI (ZONE NORD)

Globalement, la mise en place de modèle hydrologique permettra d'assurer la vidange de la plaine d'inondation.

### 3.6 Détails sur les simulations

Le maillage des sites 1 et 2 est présenté dans le tableau 7. Le temps de résolution est fortement contraint non pas par le nombre de mailles mais par la présence de petites mailles. Pour limiter les problèmes d'instabilité, le nombre de Courant a été fixé à 0,9, sur l'ensemble des simulations. Les temps de calcul énoncés ; 15 jours pour 20 % de la superficie totale du BV ; limitent la mise en place d'un modèle bidimensionnel sur l'ensemble du site. Cependant, se pose alors le problème de la reconduction des conditions aux limites, dans le cas de l'utilisation de sous-modèles.

Site	Surface modélisée	Surface modélisée <sup>9</sup>	Linéaire Modélisé	Linéaire modélisé <sup>10</sup>	Nombre de mailles	Temps de calcul
1	2449 km <sup>2</sup>	5,9 %	79 km	3,2 %	2979	2 j
1 optimisé	2449 km <sup>2</sup>	5,9 %	79 km	3,2	3284	½ j
2	7214 km <sup>2</sup>	17,3 %	340 km	13,8 %	10 755	15 j

TABLEAU 7 : DESCRIPTION PHYSIQUE DES SITES ETUDIÉS ET TEMPS DE CALCUL

Une dizaine de simulations ont été lancées sur les deux sites d'études (site 1 optimisé et site 2). Elles avaient plusieurs objectifs :

- Effectuer une correction altimétrique ou structurelle du maillage,
- Effectuer une analyse de sensibilité de la rugosité,
- Dresser les limites d'une modélisation en sous bassin-versant (conditions aux limites, influence aval) ;
- Cartographier et décrire les interactions entre le lit mineur et la plaine d'inondation.

Dans la partie suivante, les principaux résultats et leurs critiques seront fournis.

<sup>9</sup> La surface modélisée est rapportée à la surface totale de la zone inondable, soit 41 695 km<sup>2</sup>

<sup>10</sup> Le linéaire modélisé est rapporté au linéaire du réseau hydrographique digitalisé par E. PARIS en 2010, soit 2471 km



## 4. Résultats et interprétations

### 4.1 Etude de la qualité altimétrique du maillage

La topographie des sites d'études semble correctement représentée par les maillages (cf. figure 12). L'effet procuré par la mise en place des points cotés dans les casiers rizicoles de Mopti semble non négligeable. De plus, les zones planes sont correctement traduites par le modèle. Néanmoins, une première modélisation hydraulique doit être effectuée. En effet, l'observation des anomalies altimétriques ne pourra être effectuée que par la comparaison des zones inondées avec les images Modis.

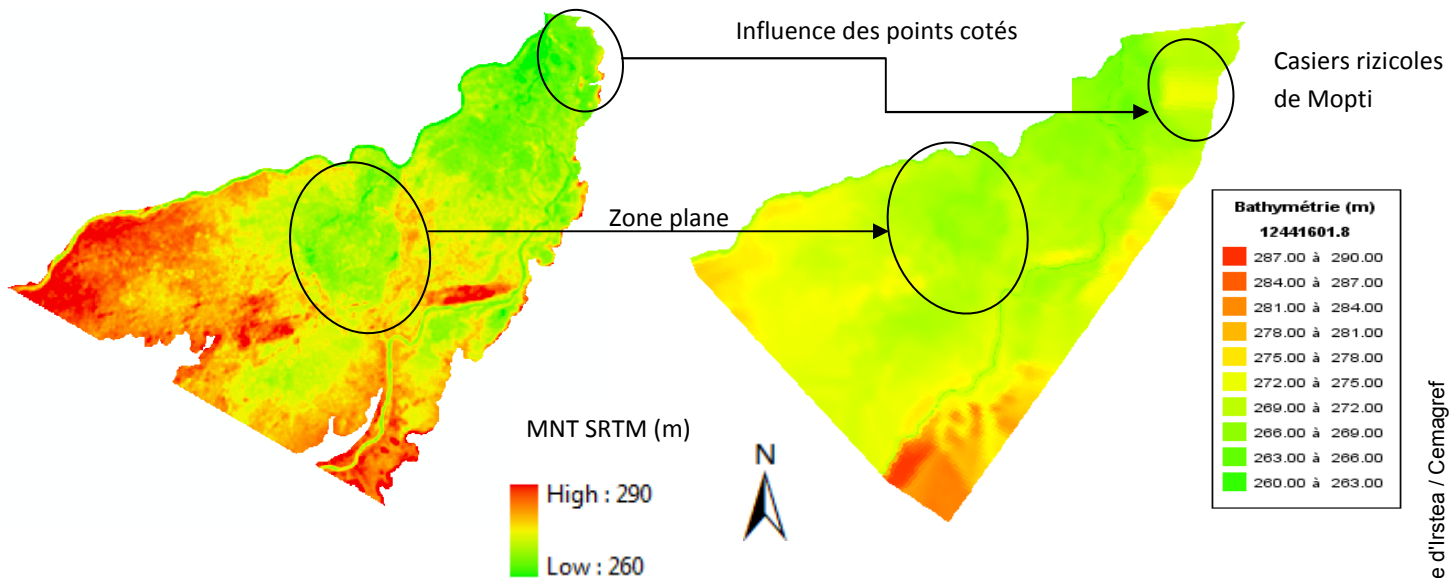


FIGURE 12 : VISUALISATION DU MNT SRTM (A GAUCHE) ET DE LA BATHYMETRIE DU MAILLAGE (A DROITE) – SITE D'ETUDE N°2

#### 4.1.1 Correction du maillage

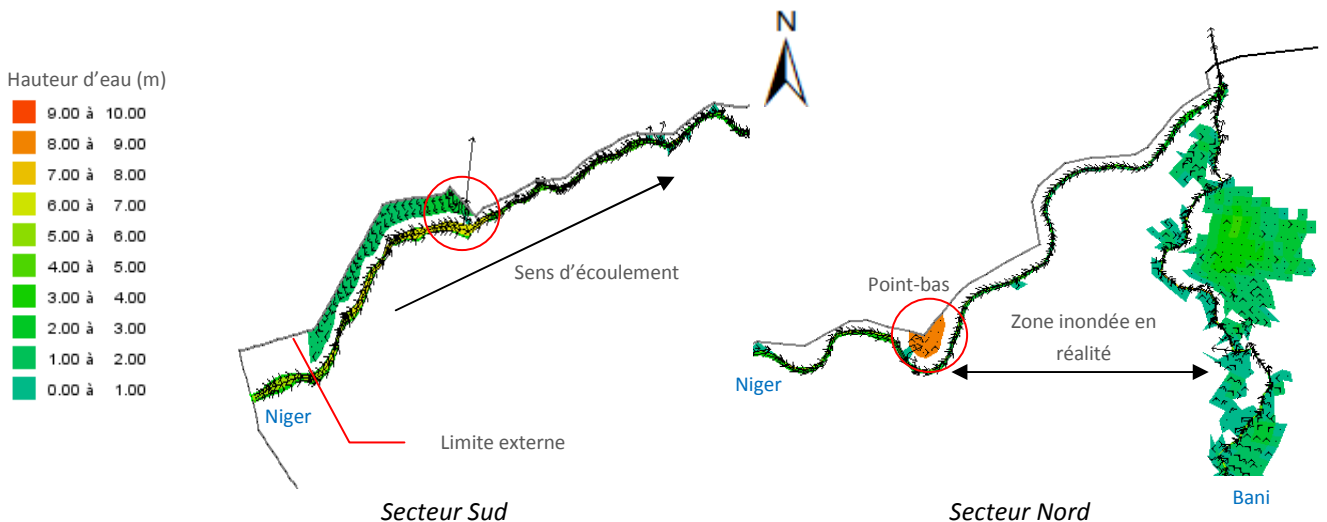


FIGURE 13 : VISUALISATION DES PROBLEMES TOPOGRAPHIQUES, AU PIC DE CRUE DU NIGER –SITE D'ETUDE N° 2

Après avoir effectué une première simulation, on compare les résultats avec les images satellitaires MODIS traitées en binaire (pixels en eau/pixels exondés). On remarque que des zones inondées dans la réalité ne le sont pas après simulation (cf. figure 13 – secteur Nord). Ces problèmes sont liés à une sous estimation du débit en aval. En effet, des points bas à l'interface lit mineur/ lit majeur contraignent les déversements en amont. Pour ces raisons,

l'altitude est modifiée localement par une interpolation linéaire entre mailles voisines. Néanmoins, dans le secteur SUD du site d'étude 2 (cf. figure 13), on observe que l'écoulement longe la limite et qu'il s'effectue de l'aval vers l'amont. Ce cas est inenvisageable dans la réalité. Le problème sera corrigé par une suppression de mailles, mais le problème de la gestion des conditions aux limites reste ouvert.

## 4.2 Etude des problèmes liés aux conditions aux limites

On rappelle que les conditions aux limites sont de type imperméables sur les limites externes du domaine, car aucune mesure de  $Z(t)$  n'a été effectué. Une condition  $Z(t)$  est imposée en aval.

Néanmoins une étude détaillée des images d'inondations Modis laisse à penser que des interactions réciproques bidimensionnelles existent entre le domaine modélisé et l'extérieur (cf. figure 14). En effet, les débordements semblent se propager du Lac débo vers l'aval. Néanmoins, deux théories peuvent-êtres formulées pour décrire les mécanismes d' inondations, sur le DIN :

- Une influence aval est exercée par le lac Débo (100 km en aval des sites d'études) ;
- Le déversement dans la plaine inondable est progressif et est lié à une insuffisance du débit de plein bord.

La première hypothèse pourrait être justifiée par la présence d'une pente inférieure à 1cm/km entre le Lac débo et Koryoumé.

Le travail en sous-modèle ne permet pas de résoudre l'ensemble des interactions réciproques et bidimensionnelles sur les limites et donc les « forçages externes » imposés au domaine. Ainsi, le contrôle exercé sur le lit majeur et sur le complexe lit majeur/lit mineur sera sous estimé dans la suite des résultats.

Ainsi pour limiter les temps de calcul, une solution envisageable consisterait à travailler en modèles imbriqués. Chaque sous modèle serait intégré dans un plus grand modèle. Les résultats du modèle de faible résolution (grande taille) sont imposés aux limites des sous modèles. Il se pose néanmoins un problème de transposition lié aux différentes échelles utilisées et un problème de stabilité numérique.

Ces problèmes de détermination des conditions aval, ne pourront être résolu que par la définition d'un modèle global, jusqu'à Koryoumé, secteur où les écoulements sont peu débordants.

Néanmoins, la condition aux limites aval sera étendue à l'ensemble des mailles aval (Nord). Les mailles sud, ouest et est seront imperméables.

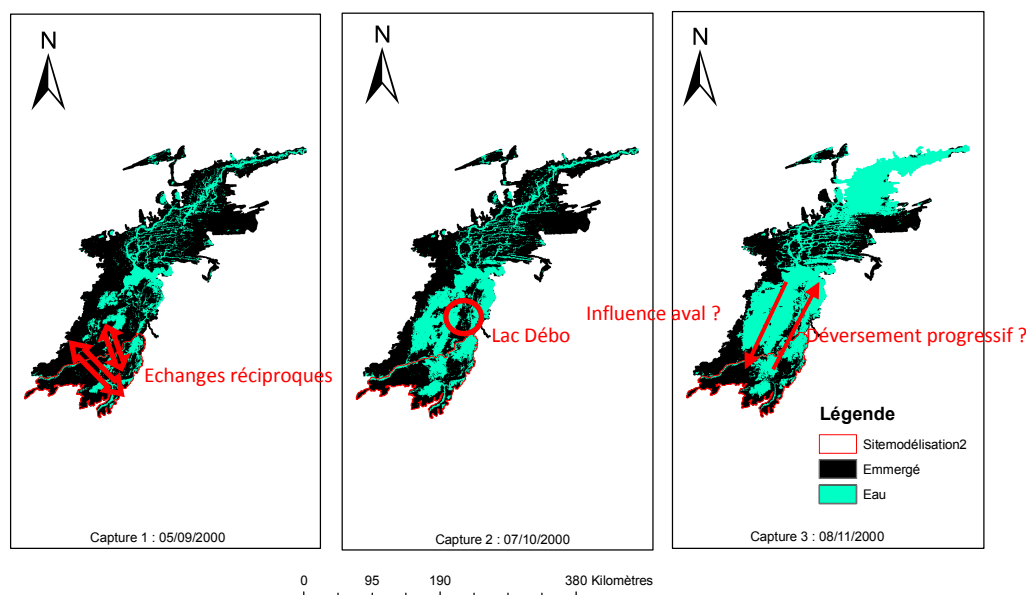


FIGURE 14 : VISUALISATION DES ECHANGES RECIPROQUES AVEC L'EXTERIEUR DU DOMAINE

Malgré ces limites, dans le cadre de la partie suivante on s'intéressera aux échanges entre le Bani et le Niger.

### 4.3 Résultats du calage de la rugosité

Le calage de la rugosité a été effectué sur le site 1. Après comparaison, des hydrogrammes simulés et observés, on observe que la répartition des débits entre le Niger et le Diaka (défluent) n'est pas respectée. En effet, en réalité deux tiers du débit entrant est transféré à la station de Tilembeya, sur le Niger, les différentes simulations ont montré que la proportion est de moitié. Ces erreurs proviennent probablement de la correction de la bathymétrie entre la diffluence et la station hydrométrique de Kara. En effet, le profil 42C représente un point situé 2m30 au dessus du profil amont (cf. figure 7). Aucune simulation correcte n'a pu être obtenue malgré les différentes modifications apportées à la bathymétrie.

De plus, dans une moindre mesure, ces erreurs peuvent s'expliquer par le fait que la condition  $Z(t)$  de Tilembeya a été transposée à la station de Kara sur le (Diaka). En effet, la station hydrométrique de Kara ne dispose pas de relevé pour la période de simulation 2000/2001. La condition aux limites de Kara sur le Diaka doit être relevée pour limiter le débit dans cette branche.

Néanmoins, la dynamique globale est conservée (temps d'apparition du pic de crue, début de la phase de crue et de décrue). Néanmoins la bathymétrie dans le lit majeur semble correctement approximée. En effet, on observe le remplissage et la vidange du casier rizicole situé à proximité de Kara.

La simulation sur ce site ne pourra être résolue que par calage de la bathymétrie et de la condition aval de Kara.

### 4.4 Mise en évidence des échanges entre le Niger et le Bani

La modélisation 2D a permis de mettre en évidence les écoulements à travers les casiers rizicoles de Mopti sur le Bani (encadré noir ; figure 15) et le court circuit de la confluence entre le Bani et le Niger à Mopti (encadré rouge).

Le court circuit s'effectue par un débordement du Niger. Les écoulements s'effectuent alors selon une direction ouest-est. L'écoulement rejoint le Bani, à partir du 15 Aout. La vitesse de l'écoulement dans ce « bief » est inférieure à 0,2 m/s (cf. figure 16).

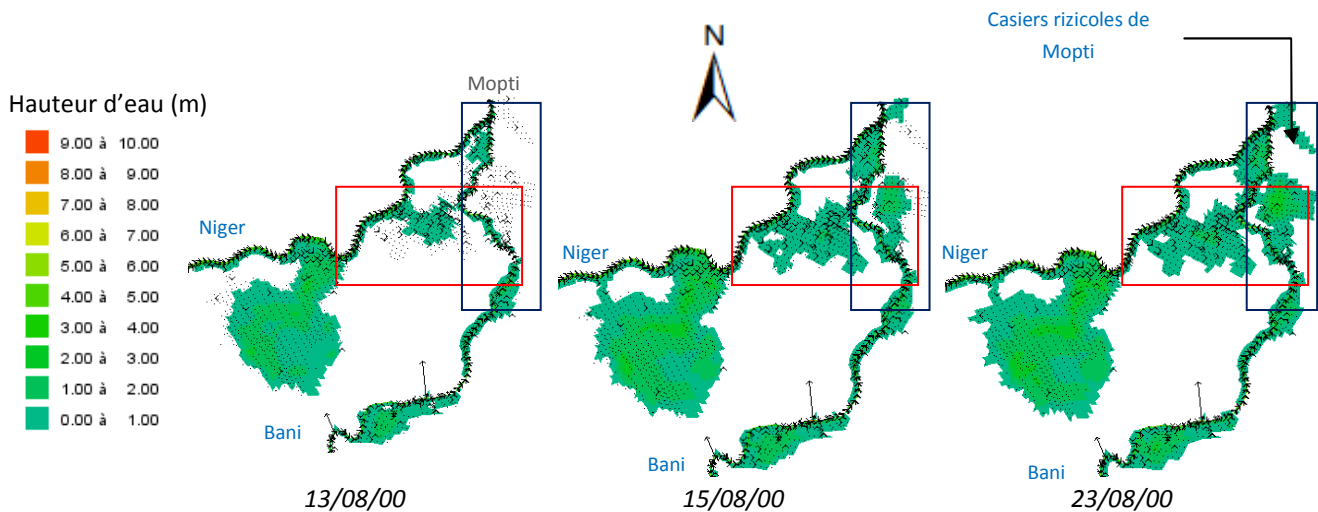


FIGURE 15 : VISUALISATION DES ECHANGES ENTRE LE NIGER ET LE BANI

L'écoulement dans les casiers ne représente pas la réalité, même si la résolution du maillage semble pouvoir la reproduire. En effet, l'immersion de ces casiers est contrôlée par des vannes. Néanmoins, les consignes de ces vannes n'ont pas été renseignées dans le modèle. Le fonctionnement hydraulique de ces casiers a été envisagé par une étude des images satellitaires MODIS (MULLENS, 2010). Le fonctionnement décrit par le modèle envisage donc le cas où aucun contrôle des vannes n'est effectué. Par la suite, il serait envisageable de renseigner une consigne dans le modèle.

## 4.5 Visualisation des vitesses

La cartographie des vitesses au pic de crue, permet de démontrer que les vitesses de l'écoulement est négligeable dans le lit majeur. Les vitesses y sont inférieures à 0,2 m/s. Les écoulements dans le lit mineur ont une vitesse inférieure à 0,8 m/s. Ces résultats semblent en accord avec la bathymétrie du site (cf. figure 16). De plus, aucune anomalie n'est observée après étude du nombre de Froude. L'ensemble du site est soumis au régime fluvial.



FIGURE 16 : CARTOGRAPHIE DES VITESSES LE 15/08/2000

## 4.6 Comparaison qualitative des résultats avec le maillage des modèles à casiers

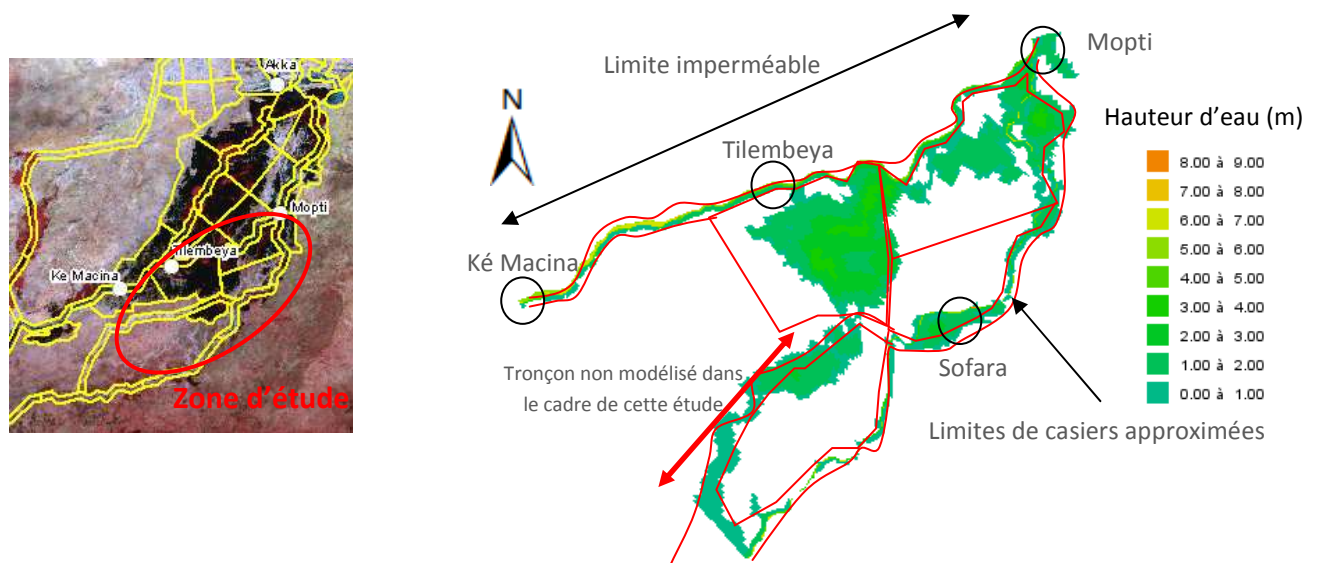


FIGURE 17 : COMPARAISON DES CASIERS UTILISES PAR SIC ET CARIMA (A GAUCHE), AVEC LA SIMULATION HYDRAULIQUE AU MAXIMUM DES DEBORDEMENTS (A DROITE) - SOURCE DE LA FIGURE GAUCHE : (OLEKSIK, 2010)

En comparant les résultats de la simulation, au maillage des modèles à casiers CARIMA (SOGREAH, 1983) et SIC (MYCEK, 2010) (cf. figure 17), on observe qu'ils sont en accord. La délimitation des casiers semble donc basée sur une étude chronologique des inondations. Néanmoins, certains secteurs sont exondés alors qu'ils appartiennent à un casier. Ces différences peuvent être liées à des périodes de référence différentes.

De plus, la simulation bidimensionnelle a permis de mettre en évidence qu'il était possible de s'affranchir de la délimitation des tronçons d'une longueur inférieure à 150 mètres (cf. figure de gauche), ou de ceux pour lesquels la bathymétrie est inconnue. En effet, la modélisation a permis de modéliser le fonctionnement d'un de ceux-ci. Néanmoins, la largeur de ce cours d'eau reste faussée par la résolution kilométrique du pas d'espace. De plus, la bathymétrie de celui-ci est approximée par le MNT SRTM.

## 4.7 Comparaison quantitative du modèle

Les résultats de la simulation n°2 peuvent-être comparés aux débits observés au droit de trois stations hydrométriques : Tilemebeya sur le Niger, Sofara sur le Bani et Mopti à la confluence (localisation : cf. figure 17). Les résultats ont été tronqués car la simulation n'était pas terminée après 8 jours de calcul. L'analyse de résultats sera donc effectuée uniquement sur les 6 premiers mois, du 1<sup>er</sup> avril 2000 au 24 septembre 2000. Le pic de crue est obtenu avant la date du 24 septembre 2000.

Le modèle est jugé capable de reproduire les écoulements du Niger de Ké Macina à Tilemebeya (cf. figure 18). Le critère de Nash est de 0,99 au droit de la station de Tilemebeya. Néanmoins par l'étude des erreurs relatives, on remarque que le modèle n'est pas capable de reproduire les débits de base (débit avant l'apparition du pic de crue). Ces erreurs supérieures à 50 %, peuvent être liées à l'incertitude de la mesure sur les faibles débits. Ces incertitudes sont donc transposées aux conditions aux limites. Durant la phase de crue délimitée à partir du 23 Juin 2000, les incertitudes relatives sont comprises entre - 10% et 10%.

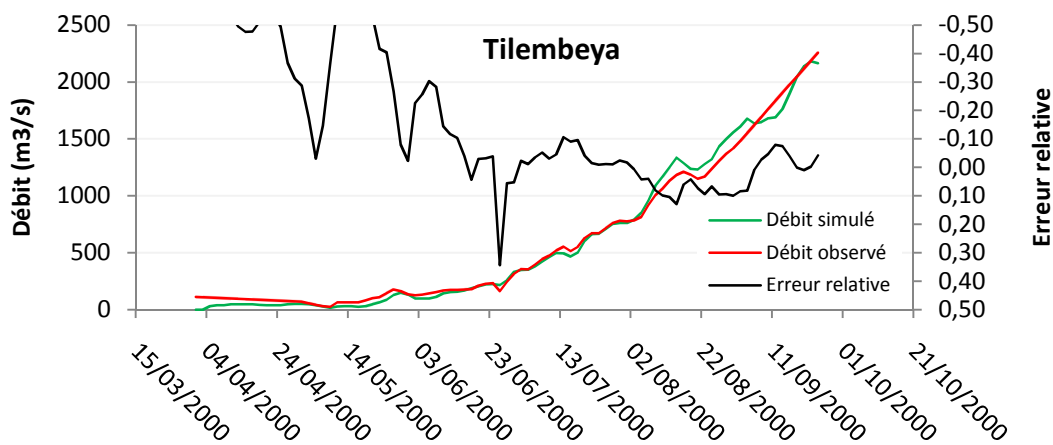


FIGURE 18 : RESULTATS DE LA SIMULATION A LA STATION HYDROMETRIQUE DE TILEMEBEYA

On effectue également, une comparaison des débits simulés et observés sur le Niger, au droit de la station de Sofara (cf. figure 19). Le critère de Nash de 0,99 démontre que la modèle est capable de reproduire la formation de la crue. Le constat effectué pour les débits de base reste valable. Néanmoins, les incertitudes relatives durant la phase de crue sont supérieures à celles au droit de Tilemebeya. Elles sont comprises entre -50 % et 10 %. Le modèle a tendance à sous estimer les débits. Même si les résultats restent acceptables à Sofara, les débordements ou les volumes évaporés sont surestimés. Le 24/09/00, l'écart absolu est de 100 m<sup>3</sup>/s entre la valeur simulée et observée. Seule une poursuite du calcul et un traitement des résultats pourront déterminés si l'écart entre la simulation et les observations sont amplifiées, durant la phase de décrue.

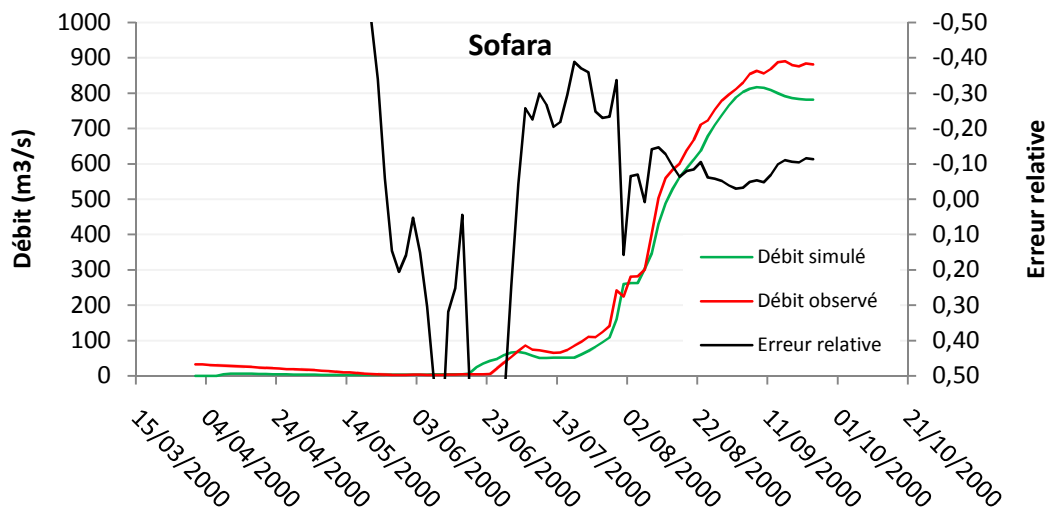


FIGURE 19 : HYDROGRAMME DE CRUE A LA STATION DE SOFARA

Les écoulements sont comparés à la confluence du Niger et du Bani, au droit de la station hydrométrique de Mopti (sorti du système) – (cf. figure 20). Mopti est situé à 105 km de Tilembeya et à 70 km de Sofara.

La dynamique des écoulements n'est pas reproduite à cette station. Le critère de Nash est de 0,44. L'écart absolu est supérieur à 1500 m<sup>3</sup>/s, soit quasiment un tiers du débit observé. De manière générale, le modèle ne déverse pas assez dans la plaine d'inondation, à partir des stations de Tilembeya et Sofara. Cette erreur semble principalement liée à la connaissance de la bathymétrie du lit mineur. En effet, les profils ont été interpolés en moyenne tous les 25 km dans cette zone. Cette sous estimation des volumes déversés dans la plaine d'inondation est liée à la mise en place d'une condition imperméable sur les arrêtes au Nors-Ouest du modèle. Dans la réalité cette zone doit déborder. Pour corriger ce problème, celle-ci sera remplacée par une condition libre (cf. figure 17 p.28)

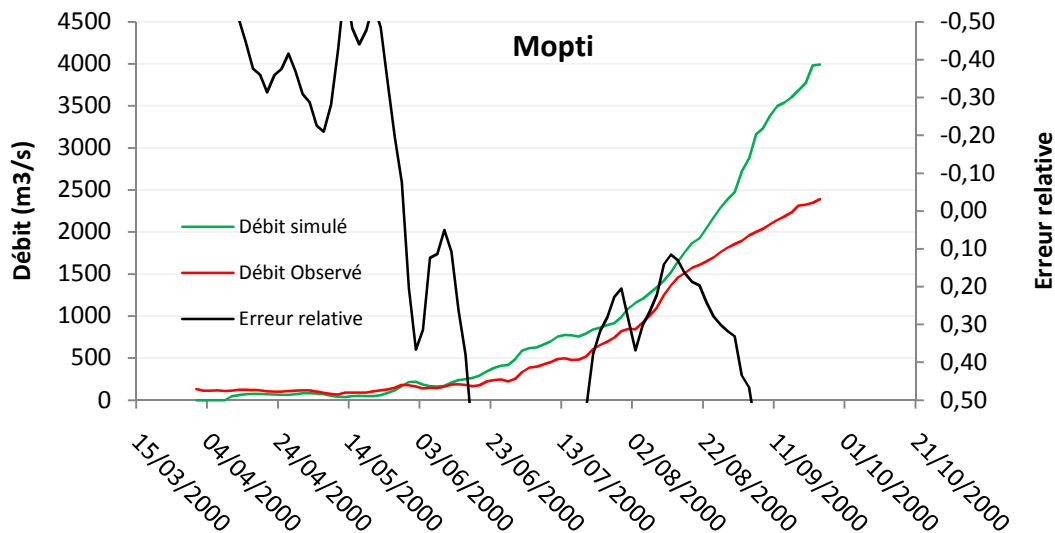


FIGURE 20 : RESULTATS DE LA SIMULATION AU DROIT DE MOPTI

#### 4.8 Conclusion partielle sur les résultats

Les différents résultats évoqués dans cette partie montrent que la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle est contrainte tant par une mauvaise représentativité des lits mineurs, qu'une mauvaise connaissance des conditions aux limites. Néanmoins, par correction progressive de la bathymétrie, qui s'apparente alors à un « paramètre de calage », des résultats satisfaisants ont été obtenus. Un calage des conditions aux limites devra également être effectué.

A une échelle plus globale, la topographie de la plaine d'inondation semble correctement approximée par la fusion partielle des données.

Par simulation progressive, il est ainsi possible de sectoriser les zones où la bathymétrie est mal envisagée où quand les conditions aux limites sont mal renseignées. Néanmoins l'effet porté par cette procédure est limité par le temps de résolution du modèle et le faible nombre de chroniques hydrométriques disponibles pour le calage. La résolution d'un modèle couplé sur les secteurs d'études devrait être un gain de temps considérable pour le calage de la bathymétrie.

Les principaux résultats et leurs critiques ayant été fournis, il est désormais envisageable de conclure.

## Discussion et conclusion

---

La compréhension de l'hydrodynamique du DIN suscite un intérêt scientifique, depuis les années 50. La modélisation des écoulements se heurte alors à la complexité du site d'étude (surface inondable de 35 000 km<sup>2</sup>, réseau hydrographique maillée d'une longueur de 2500 km, omniprésence de méandres). Afin de pallier à certaines incertitudes, de nombreux modèles sont basés sur des approximations réductrices. Le projet HydroDIN a été constitué pour améliorer la connaissance des processus physiques, en réponse à des perspectives envisageables de changements globaux (changement climatique, modification des usages...). A ce titre, le rapport présenté, s'inscrit dans un programme pluridisciplinaire. Afin d'améliorer la représentativité des phénomènes, il a été envisagé au cours de cette étude de réaliser un modèle bidimensionnel permettant de décrire les écoulements tant dans le lit mineur, que dans le lit majeur.

Un important travail de traitement de données a été effectué. Celui-ci avait pour principal objectif de définir les paramètres hydrologiques prépondérants et la bathymétrie a intégré dans le modèle.

Le module hydrologique « spatialisé » a été intégré dans le modèle hydraulique afin de considérer les phénomènes évaporatoires.

La bathymétrie a été obtenue par fusion de données plus ou moins fines. La topographie dans le lit mineur est représentée par des profils ADCP (obtenus en 2008 et 2009), et des profils IGN obtenus dans les années 1970. Se pose alors le problème du calage de ces différents profils et de leur représentativité (mouvements hydro-sédimentaires, dynamique des méandres). Les écoulements dans le lit mineur ont été envisagés par une fusion de données satellitaires : MNT issus de l'imagerie satellitaire SRTM (précision en altitude de 1 m) avec des données cartographiques : points cotés issus de campagnes topographiques, limites d'écoulements issus de la digitalisation de cartes au 1 : 200 000.

Ce traitement a permis de mettre en évidence que la connaissance de la bathymétrie dans le lit mineur était insuffisante et qu'elle était une source d'erreur possible. La bathymétrie demande à être calée par des considérations hydrauliques. Une autre limite est liée à la mauvaise connaissance des conditions aux limites et le faible nombre de points de calages disponibles (détarage de stations inconnus, mise en place de seuils). Une comparaison avec les images satellitaires (Landsat, Modis) a permis de valider nos résultats.

La durée de la phase de traitement et le temps de simulation ont contraint à s'intéresser à deux sites principaux. Néanmoins des résultats encourageants ont été démontrés par la simulation numérique. Ainsi, la spatialisation des phénomènes a pu être envisagée (débordements, courts-circuits).

L'utilisation d'une modélisation bidimensionnelle reste toutefois contrainte par son temps de simulation. Néanmoins, pour la réduire considérablement, il semble parfaitement envisageable d'effectuer une modélisation couplée. Afin d'effectuer une comparaison entre les différents modèles à dispositions et d'améliorer la représentativité des phénomènes, l'UMR G-eau envisage le couplage effectif entre les modèles monodimensionnels correctement calés et les casiers pour lesquels la géométrie a été parfaitement envisagée par le suivi d'images satellitaires.

A court terme, un modèle couplé 1D/ 2D permettra de tirer l'avantage de chaque modèle séparé. Néanmoins, sa capacité de résolution sera liée à la connaissance de la bathymétrie.

L'amélioration de la connaissance de l'ensemble de ces phénomènes devrait prendre encore plusieurs années. Une aide non négligeable proviendra probablement du développement de l'imagerie satellitaire (HOSTACHE, 2006). On citera par exemple le calage de la rugosité ou la connaissance des entrées d'un bilan hydrique (CAMUS, 2010) (RUELLAND et al. 2007).

## Bibliographie

- AMBROISE, B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant – Processus, facteurs, modèles, *Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, HGA Bucarest*, 200 p.
- ARCEMENT, J. & SCHNEIDER, V. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey Water*.
- ARONICA, G., HANKIN, B. & BEVEN K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficient in a flood propagation model with limited data, *Advances in Water Resources*, Vol. **22**, Vol. 4. pp. 349-365
- AUDUSSE, E. (2004). Modélisation hyperbolique et analyse numérique pour les écoulements en eaux peu profondes, Thèse de Doctorat, Université Paris 6 Pierre et Marie Curie. 196 p.
- BAILLY, J.S., BELAUD, G., FERET, T., FERRY, L. & RIBOT-BRUNO, J. (2009). Projet HydroDIN - Rapport de mission Delta Intérieur du Niger du 09 au 22 Novembre 2008. 29p.
- BARTHOD, M. (2002). Gestion des ressources et aménagement du fleuve Niger – Des connaissances scientifiques pour la ressource la décision publique, Document préparatoire à l'Expertise Collégiale Systèmes informatisés de gestion et d'aide à la décision sur le bassin du Niger. 106 p.
- BATES, P., HORRITT, M., SMITH, C. & MASON, D. (1997). Integrated remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling, *Hydrological Processes*, Vol. **11**. pp. 1777-1795.
- BATTI, A. (2000). Etude du delta central du Niger par télédétection - méthode des ondelettes, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- BAUME, J.P., BELAUD, G. & VION P.Y. (2006). Cours d'hydraulique pour le génie rural, Ecole SupAgro Montpellier. 175 p.
- BEINTEMA, A.J., VAN DER KAMP, J & KONE, B. (2007). Les forêts inondées : trésors du Delta intérieur du Niger au Mali. *A&W-report*. Vol. **964**. 90 p.
- BELAUD, G., RIBOT-BRUNO, J., COULIBALY, M. & CISSE, M. (2009). Projet HydroDIN - Rapport de mission Delta Intérieur du Niger du 22 Novembre au 03 Décembre 2009. 21p.
- BRL (2007). Elaboration du modèle de gestion du bassin du Niger, Technical report, Autorité du Bassin du Niger (ABN) – Secrétariat Exécutif.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.-P. & MOLINIER M., (1986). Monographie hydrologique du Fleuve Niger. Tome I : Niger supérieur, Tome II : Cuvette lacustre et Niger moyen : Annexe : Débits moyens journaliers. *Editions de l'ORSTOM (IRD)*. 410 p.
- CAMUS, P. (2010). Apport de l'imagerie radar par la cartographie de l'humidité du sol et des croûtes biologiques en zone sahélienne, Stage de Master 2, Université de Rennes 2, 56 p.
- DABBENE, F. & PAILLIERE, H. (2003) Initiation à la simulation numérique en mécanique des fluides : Éléments d'analyse numérique. Support de cours. ENSTA.
- DEGOUTTE, G. (inc.). Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale, AgroParisTech, ENGREF. 93 p.
- DE NORAY, M.L. (2003). Delta Intérieur du fleuve Niger au Mali – quand la crue fait la loi : l'organisation humaine et le partage des ressources dans une zone inondables à forte contraste. *Vertigo*, Vol. **4**, décembre 2003. 9 p.
- FERET, T. (2009). Faisabilité d'un modèle hydraulique pour l'étude des interactions entre les ressources et les usages dans le Delta Intérieur du Niger (DIN), Rapport de stage de Polytech' Montpellier. 77p.
- FINAUD-GUYOT, P. (2009). Modélisation microscopique des inondations fluviales et urbaines : Prise en compte des écoulements directionnels et des échanges lit majeur – lit mineur, Thèse de doctorat Université Montpellier 2. 233 p.
- FOFANA, A., GIVONE, P., MARIE, J., MORAND, P., ORANGE, D. & TRAORE, P. S. (2007). Avenir du Fleuve Niger - Seconde partie : Chapitres analytiques (J. Marie, P. Morand, H. N'Djim), *IRD Editions* -collection expertise collégiale, chapitre Les systèmes d'information environnementaux. pp.395-432.
- GALLAIS, J. (1967). Le delta intérieur du Niger et ses bordures – Etude morphologique, *Edition du centre National de la Recherche Scientifique*, 155 p.
- GOURCY, L., ARANYOSSY, J.F., OLIVRY, J.C. & ZUPPI G.M. (2000). Evolution spatio-temporelle des teneurs isotopiques des eaux de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali), *Earth and Planetary Sciences*, Vol. **331**. pp. 701-707.
- HARDY, R.J., BATES, P.D & ANDERSON, M.G. (1998). The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. *Journal of hydrology*, Vol. **216**. pp. 124-136.
- HORRIT M.S., MASON D.C. (2002), Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation, *Journal of hydrology*, Vol. **268** (1-4), pp. 87-89
- HOSTACHE, R. (2006). Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et de l'aide à la modélisation hydraulique, Thèse de doctorat Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. 256 p.
- IRD-IER (2002). Gestion des ressources et aménagement du fleuve Niger. Des connaissances scientifiques pour la décision publique, Document préparatoire à l'Expertise Collégiale « Systèmes II informatisés de gestion et d'aide à la décision sur le bassin du Niger ».
- KREIS, N. (2004). Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation – Application à la Vallée de la Thur (Haut-Rhin), Thèse de doctorat, ENGREF. 350 p.
- KUPER, M., MULLON, C., PONCET, Y., BENGA, E., MORAND, P., ORANGE, D., MAHE, G., ARFI, R. & BAMBA, F. (2002). La modélisation intégrée d'un système inondable : le cas du delta intérieur du Niger', *IRD*, 'Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales', pp. 738-798
- LAMAGAT, J.-P., MOREL-SEYTOUX, H. J. & ALBERGEL, J. (1993). Analyse de la propagation des ondes de crues, *Hydrologie Continentale*. Vol. **8**. pp. 113-137.
- LOUMAGNE, C. & KING, C. (1997). Observation spatiale pour la biosphère continentale, *Ingénieries EAT*. Vol. **12**. pp. 3-17.
- MARANT, L. (2009). Comparaison entre la modélisation de rivière unidimensionnelle (1D) et bidimensionnelle (2D) en vue d'une modélisation de la Basse Vallée de la Doller, Stage Ingénieur, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 97 p.
- MULLENS, A. (2009). Identification de caractéristiques géométriques d'un modèle hydraulique de propagation des crues du Niger, Mémoire de stage de Master 2ème année Recherche Eau et Environnement, 76p.
- MYCEK, L. (2010). Modélisation de la crue du Niger dans le delta Intérieur, Stage Ingénieur, Ecole Polytechnique Universitaire de Montpellier. 40 p.



- NICHOLSON, S.E., SOME, B. & KONE, B. (1999). An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *Journal of climate*, vol. **13**. pp. 2628-2640.
- OLEKSIK, A. (2008). Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique, Stage de Master 2 Télédétection et Géomatique appliquées à l'Environnement. 69p.
- OLIVRY, J.-C. (1995)., Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation de delta intérieur, Grands Bassins Fluviaux périalantiques : Congo, Niger, Amazone. pp. 267-280.
- OLIVRY, J.-C. (2002). Synthèse des connaissances hydrologiques et du potentiel en ressources en eau du fleuve Niger, Banque Mondiale, Autorité du Bassin du Niger.
- ORANGE, D., MAHE, G., DEMBELE, L., DIAKITE, C. H., KUPER, M. & OLIVRY, J.-C. (2002). Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, *IRD*. pp. 208-229.
- PAQUIER, A. (1995). Modélisation et simulation de la propagation de l'onde de rupture de barrage, Thèse de Doctorat INIST-CNRS. 193 p.
- PAQUIER, A. (1996). Simulation de crues débordantes en rivières par couplage 1D/2D – Etude d'un cas test sur la Bourbre à l'aval de l'Isle d'Abeau, programme de recherche 1996, Pole Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la prévention des Risques Naturels, 27 p.
- PAQUIER, A. (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, 44p.
- PARIS, E. (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, Stage Ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées. 101 p.
- PICOUET, C. (1999). Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé Le bassin supérieur du Niger et sons delta, thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2. 386 p.
- PONCET, Y., MULLON, C. & KUPER, M. (2002). Organisation spatiale d'un écosystème exploité : les choix spatiaux dans la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali, *Espace géographique*. Vol. **31**. pp. 118-130.
- PUECH, C. (2000). Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes, Thèse de doctorat, institut Polytechnique de Grenoble.
- ROUX, H. (2004). Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, a partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne, Thèse de doctorat, Université Montpellier 2.
- RUELLAND, D., DEZETTER, A., PUECH, C. & ARDOIN-BARDIN, S. (2007). Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modeling in West Africa, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. **29**, N° 11-12, June 2007. pp. 3533-3551.
- RUNGO, M. & OLESEN, K. W. (2003). Combined 1- and 2-dimensional flood modelling, 4<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Shiraz. Iran.
- SAINT-VENANT, B. (1871). Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits. *Compte Rendu de Séance de l'Académie des Sciences*, Vol. **73**. pp. 147-154 & pp. 237-240.
- SEMSAR A. (1995). Mise au point d'une méthodologie de comparaison des modèles de simulation hydraulique des réseaux d'assainissement, thèse de Doctorat, INSA LYON. 305 p.
- SINGH, V. P. (2004). Flow Routing in Open Channels: Some Recent Advances, River Flow 2004, Second International conference on Fluvial Hydraulics.
- SOGREAH (2005). Etude préliminaire du modèle mathématique du bassin du fleuve Niger – Rapport final provisoire, Rapport technique, ABN.
- TAYEFI, V., LANE, S.N., HARDY R.J. & YU, D. (2007). A comparison of one and two-dimensional approaches to modeling flood inundation over complex upland floodplains, *Hydrological Processes*, Vol. **21**. pp. 3190-3202.
- VAN PROOIJEN, B.C., BATTJES, J.A & UIJTTEWALL, W.S.J (2005). Momentum exchange in straight uniform compound Channel flow, *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. **175**, mars 2005. 9 p.
- WAZQUEZ, J. (2010). Cours d'hydraulique à surface libre, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 105 p.
- WBM (2003). Dynamically linked two dimensional/one dimensional hydrodynamic modelling, Program for rivers, estuaries and coastal Waters, Australie. 135 p.
- ZUG, M. & VAZQUEZ, J. (2010). Modélisation de réseaux d'assainissement – Concepts approchés et étape, Cours de 3ème année de l'ENGEEES, Veolia Water – Anjou Recherche. 75 p.
- ZWARTZ, 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, RIZA, Lelystad / Wetlands International, Severe / Institute for Environmental studies (IVM), Amsterdam / A&W conseillers ecologiques, Veenwouden. Mali / Pays-Bas.
- ZWARTZ, 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.

# Sommaire des annexes

---

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b> .....	<b>1</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....	<b>1</b>
<b>ANNEXE 1 : LA CRITIQUE DES MODELISATIONS ANTERIEURES</b> .....	<b>1</b>
➤ LE MODELE CARIMA .....	1
➤ LE MODELE DE LAMAGAT (1993) .....	1
➤ LE MODELE MIKEBASIN DE BRL & DHI, 2002-2003 .....	2
➤ LE MODELE INTEGRE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (MIDIN), 1999-2003 .....	3
➤ LE MODELE DE SIMULATION DES CANAUX D'IRRIGATION (SIC), 2008-2010 .....	3
➤ LES MODELES D'OLIVRY (1994) ET DELMASIG (2000).....	4
<b>ANNEXE 2 : PRESENTATION DE LA SUITE UTILISEE PAR RUBAR 3 ET RUBAR 20</b> .....	<b>5</b>
<b>ANNEXE 3 : SCHEMAS NUMERIQUES UTILISES PAR LES LOGICIELS RUBAR 3 ET RUBAR 20</b> .....	<b>6</b>
➤ SCHEMA NUMERIQUE UTILISE PAR LE LOGICIEL : RUBAR 3 .....	6
• <i>Les équations utilisées</i> .....	6
• <i>Description du schéma numérique aux différences finies</i> .....	6
➤ METHODE DE RESOLUTION UTILISEE PAR LE LOGICIEL RUBAR 20 (2D) .....	7
➤ SCHEMA DE COUPLAGE RUBAR 3 (1D)/RUBAR 20 (2D).....	7
• <i>Description</i> .....	7
• <i>Techniques de résolution</i> .....	7
<b>ANNEXE 4 : PROFILS BATHYMETRIQUES DANS LE LIT MINEUR</b> .....	<b>9</b>

### ➤ Le modèle Carima

Le modèle CARIMA a été établi par la SOGREAH (Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques) (1977, dernière version en 1995).

Ce modèle permet la modélisation des écoulements permanents ou non, dans les systèmes de rivières et canaux, et dans les plaines inondables ; il résout les équations monodimensionnelles de Saint-Venant sur une géométrie qui accepte les mailles et la gestion des casiers en relation avec les lits d'écoulements principaux. Le modèle développé par SOGREAH porte sur le fonctionnement du DIN entre les stations hydrométriques amont de Markala sur le Niger, Douna sur le Bani et la station hydrométrique aval de Koryoumé. Il utilise comme données bathymétriques les profils en travers des années 1970. Le modèle est calé sur les événements hydrologiques de 1969/1970 et 1970/1971 et validé sur la crue de 1975/1976.

Chaque profil en travers (1 profil tous les 20 km en moyenne) correspond à point de calcul « unidimensionnel ». Entre deux profils les équations de Barré de Saint-Venant 1D sont utilisées. Les plaines inondées et les lacs sont symbolisés par des points de calculs dits « casiers bidimensionnels ». Ces casiers sont définis par une relation  $S = f(h)$  ; avec S la surface en eau dans le casier et h la cote d'eau dans le casier.

Afin de modéliser les interactions entre le lit mineur et le lit majeur, ces casiers sont reliés entre eux par des points unidimensionnels. On fixe alors deux types de liaisons :

- Liaison fluviale : la loi d'échange provient essentiellement du frottement sur le fond (description par un profil en travers, une longueur et un coefficient de Strickler). Les termes d'inerties  $\gamma$  sont négligés (faible vitesse d'écoulement)
- Liaison « bidimensionnelle type déversoir » : loi d'échange où le frottement n'intervient plus. C'est le cas d'un débordement par-dessus une digue. Les caractéristiques hydrauliques sont définies par une cote de déversement, la longueur du seuil, un coefficient relatif à l'ouvrage.

Les modélisateurs considèrent qu'entre chaque pas de temps que la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortants.

« Malgré cela il permet de simuler correctement la propagation des crues » (Fofana et al, 2007). Il est possible de s'interroger sur ces conclusions en sachant que ce modèle connaît d'importantes limites :

- Les sections en travers sont espacées de plusieurs dizaines de kilomètres ;
- Les casiers ne sont pas délimités par des limites naturelles ou artificielles aux écoulements (remblais, digues, routes). De plus, les casiers n'ont pas non plus été délimités par des suivis photographiques ou satellitaires ;
- Les données topographiques pour décrire les casiers sont insuffisantes ;
- Les profils dans le lit majeur sont quasi inexistantes.

Pour ces différentes raisons les modélisateurs n'ont pas porté leurs efforts de calage sur les coefficients de rugosités mais sur la géométrie des casiers. Ainsi, le modèle semble toutefois avoir des difficultés à reproduire les crues de grandes importantes (crues fortement débordantes). La précision obtenue semble d'une vingtaine de centimètres au droit des stations hydrométriques sans toutefois connaître l'incertitude portée sur la hauteur d'eau simulée dans le lit majeur.

### ➤ Le modèle de Lamagat (1993)

Ce modèle est prévu initialement pour effectuer la prévision entre l'entrée et la sortie du DIN, mais il a été étendu depuis Koulikoro jusqu'à Niamey. L'objectif est de développer un modèle de propagation souple et pratique aussi bien sur le mode de calage que de la simulation. Cependant, il se doit de reproduire le caractère non linéaire des phénomènes de propagation de l'onde de crue. Cette souplesse signifiant que le modèle puisse aussi bien travailler sur des côtes que des débits. Afin de s'affranchir de certains problèmes le calage n'est pas basé sur des caractéristiques hydrauliques ou géométriques du cours d'eau, mais sur une chronique raisonnable de débits ou de hauteurs d'eaux.

En débit, il consiste à établir une relation permettant de passer d'un débit  $Q_{amont}$  à un instant  $t$ , au débit  $Q_{aval}$  à un instant  $t + \Delta t$ . Pour déterminer les fonctions  $Q_{aval} = f(Q_{amont})$  et  $\Delta t = f(Q_{amont})$ , on calcule à partir de données observées, par tranche de valeur de  $Q_{amont}$  et pour différentes valeurs de  $\Delta t$ , les relations linéaires entre  $Q_{amont}$  et  $Q_{aval}$ . Pour chaque tranche on teste différentes valeurs de  $\Delta t$ . On garde le délai qui donne le meilleur coefficient de corrélation, la valeur moyenne  $Q_{amont}$  correspondante à cette erreur type et la valeur de  $Q_{aval}$ .

Ce procédé permet de travailler dans les sens amont/aval et aval/amont.

Le modèle peut être synthétisé ainsi :  $X_{aval}(t + \tau(X_{amont}(t))) = k(X_{amont}(t))$

Où :  $X_{amont}$  la variable amont ;  $X_{aval}$  la variable aval ;  $k$  une fonction de correspondance entre  $X_{amont}$  et  $X_{aval}$  ;  $\tau$  u temps de propagation entre les stations amont et aval, déterminé en fonction de la variable amont ;  $t$  est le temps correspondant à la variable  $X_{amont}$ .

L'erreur moyenne commise par ce modèle est inférieure à 20 centimètres, et le critère de Nash est supérieur 0,90. Malgré ces bons résultats le modèle s'appuyant sur des chroniques d'observations, il ne pourra pas être utilisé pour prévoir les changements liés aux aménagements du fleuve. De plus, il ne pourra pas être extrapolé à des stations voisines en vue de définir des conditions aux limites dans un modèle (cas d'une convergence ou divergence sans stations hydrométrique à proximité).

### ➤ Le Modèle MikeBasin de BRL & DHI, 2002-2003

Réalisé pour le compte de l'Agence de Bassin du Niger, le « Danish Hydraulic Insitute » (DHI, concepteur du logiciel Mike Basin) et le bureau d'études BRL ont conçu un modèle dans le but de pouvoir évaluer les différentes possibilités d'aménagements hydrauliques et de gestion « stratégique et technique » de ces ouvrages, dans le bassin du Niger, en fonction d'objectifs clairement définis tels que : l'irrigation, la production d'énergie et le soutien d'étiage.

Les données hydrologiques parfois manquantes ont été reconstituées par comblement, avec l'utilisation de relevés de stations voisines (avec un faible coefficient de corrélation), ou en linéarisant les données mensuelles dans le but d'obtenir des données journalières, montrant là une des limites du modèle.

Le réseau hydrographique est discrétisé en nœuds, situés aux endroits stratégiques des cours d'eau (barrages, stations hydrométriques, confluences, points de prélèvements ou d'irrigation).

Le modèle est développé sous Mike Basin® (DHI). Sur chaque nœud, on effectue un bilan des entrées et des sorties au pas de temps journalier. Les sorties des nœuds (débits) sont propagées jusqu'au niveau suivant par les équations à l'aide des équations simplifiées de Muskingum. Cependant, la difficulté d'appréhension des écoulements dans le DIN a conduit à le symboliser par un réservoir fictif (prise en compte du laminage et de l'écrêtement). La géométrie du réservoir est alors considérée comme une entrée dans le modèle : les niveaux d'eau, les volumes et les surfaces inondées correspondantes sont calés à partir des données observées à Diré.

Le modèle est calé tant pour ses pertes globales, que la propagation des hydrogrammes et leur atténuation, à partir des niveaux d'eau, au droit de Akka et Mopti. La période de calage et de validation couvre la période de 1966 à 2002.

En raison de la complexité du fonctionnement hydrologique et hydraulique du DIN, le modèle peut alors atteindre plusieurs dizaines de centimètres entre les valeurs observées et simulées. Ces écarts pouvant entraîner des erreurs très importantes sur l'évaluation des surfaces inondées. De plus, les mécanismes ne sont alors pas appréhendés.

En effet, pour principale limite on citera l'utilisation des équations de Muskingum-Cunge, pour tenir compte de la propagation entre points. Ces équations sont simplifiées par rapport à la résolution complète des équations de Barré de Saint-Venant. En effet, ce modèle ne tient pas compte des influences aval (concept problématique lorsqu'on est en écoulement fluvial) (Vazquez et Zug, 2011). Bien que Semsar (1995) exprime « en assainissement, des modèles utilisant des formulations simples de type Muskingum peuvent conduire à des résultats quasi-similaires à ceux du modèle monodimensionnel de Barré de Saint-Venant », leur utilisation dans le DIN semble illégitime tant les influences aval (régime fluvial) semble un mécanisme prépondérant dans celui-ci. Les équations du modèle Muskingum (modèle conceptuel basé sur la conservation des volumes, pas de prise en compte de la célérité) sont (Vazquez et Zug, 2011) :

$$\begin{cases} Q_e(t) - Q_s(t) = \frac{dV_s}{dt} ; \text{Loi de conservation des débits} \\ V_e(t) = K[\alpha Q_e(t) + (1 - \alpha)Q_s(t)] ; \text{Equation de stockage} \end{cases}$$

### ➤ Le Modèle Intégré du Delta Intérieur du Niger (MIDIN), 1999-2003

Le modèle a été développé par Kuper et al. (2002f). Ce modèle du type Système Multi Agents (SMA) a pour objectif d'analyser les relations entre les dynamiques spatiales des ressources naturelles et les activités humaines. Le modèle s'étend de Ké Macina et San jusqu'à Tombouctou. Le modèle a été calé sur 3 années hydrologiques (1993/1994, 1994/1995, 1995/1996). Le pas de temps de simulation est de 15 jours. On y représente non seulement les unités hydrologiques mais également des « agents » (au sens de ressources).

Pour des raisons pratiques, dans le cadre de ce rapport, la présentation du MIDIN sera exclusivement limitée à son module hydrologique. Trois types d'entités hydrologiques y sont définis :

- Les rivières et canaux schématisés par des segments ;
- Les points de contacts lorsque les cours d'eau divergent et convergent ;
- Les plaines d'inondations ou lacs.

Pour représenter les lacs et les plaines inondées, il convient de calculer le rayon de ceux-ci au temps  $t$ . Ce rayon est une fonction du niveau d'eau et de la géométrie de l'objet considéré. Les rayons minimaux et maximaux déterminent l'extension des inondations :  $R(t) = S + (l - S) \frac{W_t}{d}$  où  $R(t)$  le rayon de la plaine ou du lac au maximum de la crue,  $S$  le rayon de la plaine ou du lac à faible débit,  $d$  la profondeur de la plaine ou du lac,  $W_t$  le niveau d'eau. Les caractéristiques de 109 entités hydrologiques ont été modélisées. Celles-ci permettent de mettre en évidence les impacts des singularités hydrauliques telles que les barrages de Sélingué et Tossaye. Cependant la dynamique des crues n'est pas appréhendée.

### ➤ Le Modèle de Simulation des Canaux d'Irrigation (SIC), 2008-2010

Le modèle de Simulation des Canaux d'Irrigation a été conçu par le Cemagref de Montpellier.

Oleksiak (2008) a étudié le suivi par télédétection de la dynamique d'inondation au sein du DIN, dans le but de concevoir un modèle SIC de fonctionnement hydraulique 1D à casier (utilisation des équations BSV 1D). A partir d'images MODIS et LANDSAT, elle a mis en place une méthodologie pour détecter les surfaces en eau, en utilisant les indices radiométriques MNDWI et NDMI. Ces indices représentent un ratio entre compte numérique de différentes bandes. Après analyse la crue a été étudiée temporairement et spatialement. L'analyse temporelle a été effectuée au niveau des casiers hydrauliques du maillage du modèle Carima (Sogreah, 1985).

Par la suite, la partie hydraulique a été étudiée par Mullens (2009). Il s'est intéressé à la dynamique de la propagation de l'inondation dans le lit majeur au niveau des zones de submersion contrôlées, pour cela il s'est appuyé sur la réalisation de courbes hauteur/surface. Un autre objet de son étude était d'étudier les connexions entre le lit mineur et le lit majeur dans une zone dépourvue de stations de mesures.

Ferret (2009) s'est lui aussi intéressé aux aspects hydrologiques du DIN et à l'impact sur les usages. Au cours d'une mission réalisée sur le Delta, de nombreuses données topographiques ont été collectées (nivellement échelle de crue, profil). Une modélisation hydraulique a été effectuée. Ce modèle inclut des profils IGN de 1970, ainsi que des profils abscisse-cotes (ADCP). La faible densité des profils (environ tous les 20 km) en travers limitent la modélisation au niveau de la description du lit majeur. Néanmoins à une échelle plus locale les résultats ont été satisfaisants.

Mycek (2010) a complété le travail effectué par ces prédécesseurs, sous le logiciel SIC. Son travail consistait à caler et à géoréférencer les profils ADCP obtenus par Belaud et al. en 2009. La méthode utilisée consiste à effectuer un calcul en régime permanent (au pic de crue). Une fois la ligne d'eau obtenue, les profils ADCP sont recalés en altimétrie.

Enfin, Paris (2010) a fusionné et structuré l'ensemble des données topographiques disponibles (choix d'un référencement). De plus, son étude a permis de disposer d'un MNT issu du capteur SRTM.

## ➤ Les modèles d'Olivry (1994) et DelmaSIG (2000)

Le modèle élaboré par Olivry est basé uniquement sur une approche hydrologique (Orange et al. 2002). Le DIN comprend les lacs et plaines d'inondations où les pertes annuelles, dues essentiellement à l'évaporation varient de 6 à 40 kilomètres cubes, soit 47 % des entrées en période humide et 30 % en période sèche du fait de la réduction des surfaces inondées (Olivry, 2002). Le bilan annuel des pertes est un bon indicateur de l'extension de l'inondation, les pertes sont pour l'essentiel consommées par l'évaporation. Le modèle n'est cependant pas adapté aux périodes de très hautes eaux. Cependant, les déterminations proposées par Olivry (1995) restent une approximation acceptable pour les conditions hydrauliques moyennes et faibles. Ainsi, le maximum des surfaces inondées varie de 35 000 km<sup>2</sup> en période humide à 7000 km<sup>2</sup> en période sèche.

Le logiciel DELMASIG a été élaboré par Marie (2000). Il s'agit d'un Système d'Information Géographique (SIG) modélisant (MULLENS, 2009) :

- Les formations végétales et leur relation avec les surfaces inondées ;
- L'évolution des rizières depuis 40 ans ;
- L'évolution des parcours pastoraux ;
- Les données démographiques de 1975 à 1998.

Cet outil permet de proposer un outil de gestion et d'aide à la décision pour le développement du Delta Central du Niger. L'espace traité couvre les plaines de la cuvette du Niger depuis Ké Macina jusqu'au lac Débo (Zone amont). C'est un modèle intéressant pour l'étude car il porte en partie sur les associations végétales et leur relation avec la crue. Il en résulte donc un modèle de surfaces inondées selon les hauteurs de crues par une étude phyto-sociologique (IRD-IER, 2002).

Au même titre que le MIDIN, bien que l'hydrodynamique au sein du DIN ne soit pas modélisée, il permet dans une certaine mesure de s'affranchir de MNT grâce à ses classes de hauteurs d'eau et ses capacités d'analyses (Poncet et al. 2002).

## ANNEXE 2 : Présentation de la suite utilisée par RUBAR 3 ET RUBAR 20

Logiciel	Rôle
<b>Fudaa Modeleur</b> (développé sous JAVA 1.6)	Ce logiciel permet de définir les secteurs à modéliser. Les données sources, sous forme ASCII, sont apparentées à un semis de points (gestion du MNT dans le lit majeur), de profils en travers (gestion de lit mineur) ou de lignes directrices (lignes perpendiculaires à l'écoulement).
<b>Secma</b> (développé en langage Fortran)	Il permet de réaliser un fichier de maillage, en interpolant de nouvelles sections et directrices à partir de celles définies dans Fudaa Modeleur, puis en interpolant les altitudes. Plusieurs passages d'un fichier peuvent être effectués pour raffiner une partie précise du maillage.
<b>Pamhyr</b> (développé sous Java)	Il permet d'effectuer une simulation monodimensionnelle de l'écoulement par bief. Il est également possible d'y purger le nombre de points constitutifs des profils. La version multibiefs n'étant pas opérationnelle, il convient d'effectuer une simulation bief par bief. Le couplage des biefs s'effectue alors par modifications des fichiers de résultats. La simulation du couplage (multibiefs) peut alors être effectuée par un second passage dans le code de calcul de Rubar 3.
<b>Mcoxima</b> (exécutable fortran)	Il utilise le fichier de sortie de Secma et crée trois fichiers : un fichier de maillage plan, un fichier d'altitudes et un fichier de frottements. Le programme permet d'identifier les petites mailles (de tailles inférieures à une limite fixée par l'utilisateur), afin de pouvoir les éliminer manuellement.
<b>Mail20</b> (exécutable fortan)	C'est à cette étape que la structure du maillage à proprement parlé est effectuée, à partir du maillage plan. Il est également possible de considérer des points comme confondus, suivant une limite renseignée. Le maillage peut alors être modifié en ajoutant ou en modifiant des éléments.
<b>FudaaPrepro</b> (développé sous Java)	Il comporte trois sous applications : un visionneur de maillage, un éditeur de projets et un traitement post-processeur. Dans le second cas, il permet de renseigner les conditions aux limites, de modifier les valeurs du coefficient de Strickler pour chaque élément, d'intégrer des ouvrages hydrauliques, et de définir les paramètres de calculs. Dans le derniers cas, il permet d'afficher sous forme graphique les résultats du calcul numérique.
<b>Vf2m</b>	Cet utilitaire intervient en parallèle de l'utilisation de Fudaa-prepro, dans le cas d'u calcul hydraulique. Il permet de bâtir le fichier utilisé lors du calcul en projetant sur les nœuds du maillage la bathymétrie, ainsi que les valeurs de frottements définies graphiquement dans Fudaa-prepro.
<b>Rubar 20</b>	Rubar 20 (2D) réalise le calcul hydraulique. Les résultats intermédiaires sont enregistrés dans un nouveau fichier qui est par la suite exploité par le traitement de post-processeur.

➤ **Schéma numérique utilisé par le logiciel : RUBAR 3**

• **Les équations utilisées**

Le calcul des écoulements en rivières en régime transitoire s'effectue actuellement à l'aide de logiciels résolvant les équations de Barré de Saint-Venant. Celles-ci permettent de déterminer les caractéristiques d'un écoulement à surface libre dans un écoulement privilégié défini par la plus grande pente de fond.

Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x}$$

Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} + P \right) = -gS \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{Q|Q|}{K^2 S R^{\frac{4}{3}}} + B + kq \frac{Q}{S}$$

où t est le temps, x l'abscisse longitudinale, S la section mouillée, Q le débit, q le débit d'apport latéral, k un coefficient, g l'accélération de la pesanteur, Z la côte du fond, K le coefficient de Strickler (frottement), R le rayon hydraulique, h la hauteur d'eau, L la largeur,  $P = \int_0^h g(h-y)L(x,y)dy$  la pression et

$B = \int_0^h g(h-y) \frac{\partial L}{\partial x} dy$  la pression latérale.

• **Description du schéma numérique aux différences finies**

Le schéma numérique aux différences finies utilisé est explicite du second ordre. Il est issu des travaux de Van Leer. Le schéma comprend quatre tapes :

- Etape 1 : on estime indépendamment sur chaque variable scalaire et sur chaque maille, les pentes à partir de la valeur moyenne sur la maille en question et sur les deux mailles de part et d'autres ; pour chaque variable scalaire A, la pente  $\delta_j$  sur la maille j est définie ainsi :  $\delta_j = \sigma \max(0, \min(\alpha \delta_j^1, \sigma \delta_j^2, \alpha \delta_j^3))$  où  $\alpha$  est coefficient compris entre 1 et 2,  $\sigma$  est le signe de  $\delta_j^2$  et  $\delta_j^1, \delta_j^2, \delta_j^3$  les pentes respectivement calculées à partir de 2 mailles de gauche, des 2 mailles de part et d'autre et des deux mailles de droite.

- Etape 2 : On calcule de façon approchée à temps  $t_{n+1/2} = t_n + 0,5\Delta t$  et à chaque interface d'abscisse  $x_{j-1/2} = 0,5(x_{j-1} + x_j)$ , les valeurs  $U_{j-1/2}^{n+1/2}$  des variables en fonction des valeurs  $x_{j-1}$  (ou  $x_j$ ). Le passage du temps  $t_n$  au temps  $t_{n+1/2}$  s'effectue à l'intérieur d'une maille par la formule de type centrée :

$$\begin{cases} U_{j-1/2}^{n+1/2} = U_{j-1/2}^n + 0,5\Delta t G \left( x_j, U_{j-\frac{1}{2}}^n \right) - 0,5 \\ \frac{\Delta t}{\Delta x} [f(x_{j+1/2}, U_{j-1/2}^n) - f(x_{j-\frac{1}{2}}, U_{j-\frac{1}{2}}^n)] \end{cases}$$

On obtient ainsi pour chaque variable, 2 valeurs :  $U_{j-1/2L}^{n+1/2}$  obtenue à partir de la maille j-1 et  $U_{j-1/2R}^{n+1/2}$  obtenue à partir de la maille j.

- Etape 3 : On résout le problème de Riemman constitué du système homogène (sans second membre), posé en chaque  $x_{j-1/2}$  et  $t_{n+1/2}$  par un solveur approché qui donne la valeur de  $f \left( U_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)$ . Le solveur retenu est une linéarisation de Roe.
- Etape 4 : On calcule la solution au temps  $t_{n+1}$  par :



$$\left\{ \begin{array}{l} U_{j+1}^{n+\frac{1}{2}} = U_j^n + \Delta t G_j^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \\ \left[ f(x_{j+\frac{1}{2}}, U_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) - f(x_{j-\frac{1}{2}}, U_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}) \right] \end{array} \right.$$

où  $G_j^{n+\frac{1}{2}}$  est une valeur approchée de  $G(x_j, U_j^{n+\frac{1}{2}})$

La stabilité d'un tel schéma repose sur la limitation du pas de temps. Il faudra donc limiter le nombre de courant. L'intérêt de l'utilisation d'un schéma de ce type est qu'il intègre (en tant que points ordinaires des discontinuités, ce qui permet de traiter les écoulements successivement en régimes torrentiel et fluvial.

### ➤ Méthode de résolution utilisée par le logiciel RUBAR 20 (2D)

Le maillage est constitué de quadrangles ou triangles ayant ou 1 arrête entière commune.

La similitude des équations 1D, et 2D suggère d'utiliser des méthodes de résolution proche. En fait, le schéma numérique utilisé est en volume finis pour tenir compte des 2 dimensions d'espace mais il repose sur le même principe de résolution. En particulier, il est explicite, et a pour base la résolution du problème de Riemann 1D, par un solveur approché de Roe. On peut y retrouver les 4 mêmes étapes :

1. Détermination du gradient constant par maille ;
2. Estimation des valeurs des variables conservatives au milieu des arrêtes au temps  $t_{n+1/2}$  ;
3. Résolution du problème de Riemann 1D dans la direction normale à l'arrête  $t_{n+1/2}$  ;
4. Obtention de la valeur finale  $W_i^{n+1}$ , par somme algébrique des flux puis addition du second membre :

$$W_i^{n+1} = W_i^n + \sum_j \frac{\varepsilon_{ij} l_i}{A_i} \Delta t f_1 \left( W_{m_{ij}}^{n+\frac{1}{2}} \right) + S_i^{n+1/2} \Delta t$$

Où la fonction  $f_1$  représente le flux selon la direction x, la sommation sur j porte sur les éléments ayant un arrête commune avec  $M_i$  (d'aire  $A_i$ ) et  $\varepsilon_{ij}$  prend la valeur 1 ou -1 selon l'orientation de l'arrête  $m_{ij}$  (de longueur  $l_{ij}$ ) commune aux éléments  $M_i$  et  $M_j$ . Comme pour le logiciel monodimensionnel, la précision du schéma tient à un choix judicieux des valeurs à gauche et à droite dans le problème de Riemann.

Le calcul de  $S_i^{n+1/2}$  correspondant au second membre est effectué terme à terme en utilisant éventuellement les valeurs approchées de  $W^{n+1/2}$  et  $W^{n+1}$  obtenus précédemment. De même qu'en 1D, la stabilité numérique est obtenue en limitant le nombre de courant.

### ➤ Schéma de couplage Rubar 3 (1D)/RUBAR 20 (2D)

#### • Description

Le couplage étudié dans ce cas est celui où le lit mineur est décrit en 1D et le lit majeur en 2D. Le choix de base consiste à considérer que le modèle 2D s'étend sur tout la zone étudiée avec un maillage pour le lit mineur réduit à une maille en largeur. On n'y considère donc que la partie de l'écoulement au dessus des berges. En fait, sur ces mailles du lit mineur, un calcul 1D est effectué dans la topographie réelle du lit mineur complétée par des murs verticaux. Les termes du second membre q et  $kqQ/S$  correspondant aux débits débordants constituent alors les termes du couplage entre le modèle 1D et le modèle 2D.

#### • Techniques de résolution

A chacune des 4 étapes des 2 schémas :

1. Le gradient du modèle 1D est calculé indépendamment alors que le modèles 2D tient compte des valeurs 1D dans son calcul du gradient.
2. Seules les valeurs côté 1D aux milieux des arrêtes couplant les deux modèles exigent un traitement particulier. Les valeurs des hauteurs d'eau et vitesses longitudinales proviennent d'une estimation au centre de la maille

1D (gradient transversal supposé nul) ; les valeurs des vitesses transversales sont supposés égales à celles côté 2D.

3. Les problèmes de Riemann des arrêtes de couplage sont résolus comme dans le modèle 2D.
4. Les flux obtenus à l'étape 3 pour les arrêtes de couplages sont utilisés en l'état pour le modèle 2D et transformés en apport latéraux pour le modèle 1D.

En résumé, le couplage est constitué de l'immersion d'un modèle 1D dans un modèle 2D plus vaste. Dans ce contexte, le modèle 1D peut aisément être remplacé par un autre modèle dès l'instant où, à chaque pas de temps, ce dernier donne les valeurs des variables au centre de la maille 1D et reçoit les apports en masse et n quantités de mouvement. Le seul problème réel est la détermination du pas de temps. La solution simple consiste à choisir le pas de temps du modèle exigeant le plus petit.

Sur le plan informatique, les programmes Rubar 3 et Rubar 20 étant écrits en Fortran, l'opération du couplage a consisté à les transformer en sous programmes d'un programme plus général (lecture de données et transferts des termes de couplage).

## ANNEXE 4 : Profils bathymétriques dans le lit mineur

