



**HAL**  
open science

# Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique

A. Oleksiak

► **To cite this version:**

A. Oleksiak. Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique. Sciences de l'environnement. 2008. hal-02590764

**HAL Id: hal-02590764**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02590764v1>**

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 2 professionnel TGAE :  
Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement

Aurélie OLEKSIK

Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta  
intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de  
fonctionnement hydraulique



Rapport de stage

Septembre 2008

# Remerciements

Je remercie Gilles Bélaud et Carole Delenne, mes maîtres de stage, Gilles Belaud pour ses explications en hydraulique, et Carole Delenne, dont l'aide en programmation m'a été précieuse.

Je tiens à remercier Christian Puech pour avoir partagé son expérience sur la détection des surfaces en eau à l'aide d'images satellites.

Je remercie également Jean-Stéphane Bailly qui m'a aidée dans l'analyse des données.

Je remercie aussi les personnes travaillant à la Maison de la Télédétection (chercheurs, ingénieurs, stagiaires...) pour leur aide, leur avis, leur bonne humeur et qui ont permis que ce stage se déroule au mieux.

Enfin, je remercie pour leur soutien, ma famille, Émilien, Lise, Aurélia et Nelly.

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	3
<b>I. Acquisition des données</b> .....	6
I.1. Les données hydrologiques.....	6
I.2. Les données géographiques et satellitaires .....	8
I.3. Pré-traitements des données satellitaires .....	10
<b>II. Méthodologie de traitements des images</b> .....	13
II.1. Le comportement radiométrique de l'eau.....	13
II.2. Validation des indices retenus pour détecter l'eau .....	17
II.3. Constitution d'un maillage .....	22
II.4. L'automatisation.....	25
<b>III. Résultats</b> .....	28
III.1. Dynamique de la crue à l'échelle globale du DIN .....	28
III.2. Analyse de la dynamique temporelle de la crue par maille.....	32
III.3. Analyse de la dynamique spatiale de la crue par maille .....	37
III.4. Évaluation de la forme des surfaces en eau par l'indice d'agrégation .....	39
III.5. Conclusions sur la dynamique de la crue .....	40
<b>Conclusion</b> .....	42
Bibliographie.....	44
Annexes.....	47
Table des figures .....	xvii
Table des tableaux.....	xviii
Table des matières.....	xix

# Introduction

## 1. Site de l'étude :

Le Niger, troisième fleuve d'Afrique après le Nil et le Congo, prend sa source dans les monts du Fouta Djallon en Guinée, puis le fleuve prend une direction nord-est, traversant ainsi la zone sahélienne. Le Niger reprend alors une direction sud-est pour se jeter dans le Golfe de Guinée, parcourant ainsi 4 200 km (Figure 1). Lors de sa traversée du Mali, le Niger déverse ses eaux dans une vaste zone, le delta intérieur du Niger (DIN). Cette zone inondable de 40 000 km<sup>2</sup> est située exactement entre 13°N et 17°N et entre 2°30'W et 6°30'W, elle est orientée selon un axe sud-ouest nord-est. Lors de la période de crue du fleuve, entre août et décembre, les eaux s'étendent sur 400 km de long et sur 100 km de large.

Dans le delta, on distingue habituellement deux grandes zones :

- le delta amont, de Ke Macina à Akka. Le delta y est caractérisé par des chenaux larges et bien tracés en période sèche, alors qu'en période de crue, les eaux couvrent totalement la zone.
- le delta aval, de Akka à Koryoumé. Dans cette zone, les eaux du Niger remplissent de nombreuses petites mares et lacs, séparés par des dunes d'orientation est-ouest.

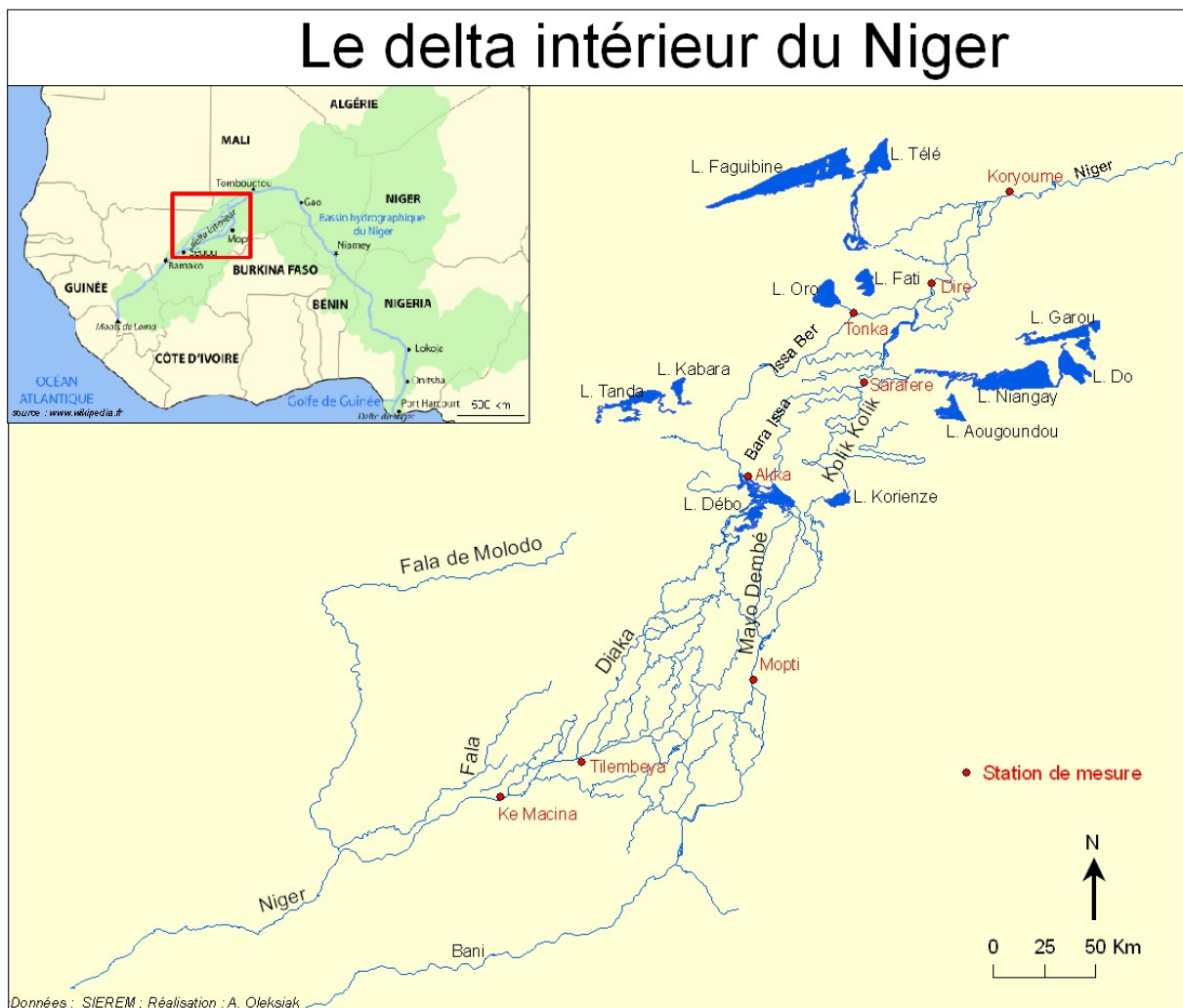


Figure 1 : Carte de localisation du delta intérieur du Niger

## 2. Problématique

Le fleuve Niger et ses affluents sont encore peu dotés de grandes infrastructures hydrauliques. Cependant, d'importants projets d'aménagement sont prévus (barrages de Fomi en Guinée, de Taoussa au Mali, extension des périmètres d'irrigation). Ces aménagements sont susceptibles de forts impacts sur les écoulements du fleuve, et par conséquent sur les usages qui en dépendent, comme les cultures de décrue, la pêche, ainsi que sur la durabilité des écosystèmes. Le delta intérieur du Niger sera certainement l'une des zones les plus affectées par ces aménagements. À cela, il faut aussi ajouter l'effet de possibles changements climatiques. Le DIN est une vaste plaine d'inondation de 40 000 km<sup>2</sup>, située dans le bassin moyen du Niger et qui retarde la crue annuelle du fleuve de deux à trois mois environ (Figure 1). Son rôle dans la propagation des écoulements est primordial. La zone est également peuplée d'un million d'habitants dont les activités dépendent de la dynamique de la crue annuelle. Il est alors nécessaire d'anticiper les conséquences sur la vie des populations riveraines et sur l'environnement. C'est dans ce cadre que l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) cherche à construire des scénarios d'évolution possibles de l'hydrologie du fleuve et des conséquences des aménagements.

La construction d'un modèle hydraulique du DIN, basé sur la modélisation physique des écoulements, devrait permettre d'évaluer l'impact des divers aménagements. Pour cela, il faut être capable de simuler la nouvelle dynamique de submersion et les hauteurs correspondantes. Cependant, la construction d'un modèle hydrodynamique du DIN se heurte à des difficultés liées à la complexité des écoulements dans cette zone, extrêmement plate, avec de nombreux biefs d'écoulement et de nombreuses cuvettes dont les dimensions ne sont pas connues précisément.

Plusieurs modèles de fonctionnement hydraulique ont déjà été élaborés. Par exemple, le plus récent (BRL, 2007) représente le delta comme une zone de laminage homogène, ce qui masque la complexité du delta, très hétérogène. D'autres travaux ont étudié les connexions entre les principales cuvettes du DIN. De plus, la dynamique d'écoulement et de l'ordre de remplissage des cuvettes constitue des variables à prendre en compte dans la construction d'un modèle hydraulique.

Dans ce contexte, l'apport des images satellites est important, notamment en raison de la taille du bassin étudié et de la difficulté de l'accès aux zones inondées en période de crue. Ainsi, la dynamique annuelle des eaux et zones submergées est visible sur des images satellites. Des satellites, tel MODIS, à basse résolution spectrale, mais à haute résolution temporelle permettent un suivi journalier. D'autres, tel Landsat, à plus grande résolution spatiale, mais à moins grande résolution temporelle permettent de mieux connaître la morphologie du Delta. Les images satellites permettent de préciser l'ordre de remplissage des différentes zones du delta et de préciser l'échelle de variabilité spatiale de l'inondation. Elles fournissent, en outre, un jeu de données de référence pour la modélisation de la crue, notamment des surfaces inondées en fonction du temps.

## 3. Contexte scientifique

Pour répondre à cette problématique et aux enjeux de connaissances sur le fonctionnement hydraulique du DIN, sur la modélisation hydraulique des grands fleuves et sur l'enjeu méthodologique de l'utilisation de la télédétection appliquée au suivi des masses d'eau, un projet « HydroDIN » « Hydrodynamique du Delta Intérieur du Niger » a été constitué.

Ce projet est soutenu par l'IFR ILEE, l'Institut de recherche Languedocien sur l'Eau et l'Environnement, qui permet de regrouper des unités de recherche sur les enjeux de l'eau et par différentes approches scientifiques. Il rassemble de nombreuses unités mixtes de recherche telles G-EAU (Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages), HSM (Hydrosciences Montpellier) et TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale). Les trois UMR citées précédemment participent au projet HydroDIN.

Plus précisément, le stage s'est déroulé au sein de l'UMR G-EAU, également financeur. L'UMR G-EAU, unité mixte de recherche, regroupe six établissements de recherche : l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), le Cemagref (Institut de recherche pour l'ingénierie de

l'agriculture et de l'environnement), le CIRAD (la recherche agronomique au service des pays du sud), l'Engref (École nationale du génie rural des eaux et des forêts), Supagro Montpellier et l'IAMM (Institut agronomique méditerranéen de Montpellier). L'UMR G-EAU organise ses recherches sur différents thèmes à la fois dans les pays du Nord et du Sud : ressources en eau, usages de l'eau, comportements ou perceptions des usagers, systèmes de productions et cultures irriguées.

Enfin, le stage s'inscrit aussi dans la continuité des études menées par l'IRD, financeur de ce projet. Dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest, l'IRD a participé avec succès au développement d'un outil de gestion pour le barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal. L'IRD est un établissement public français à caractère scientifique et technologique, placé sous la tutelle du ministère de la recherche et ministère de la coopération. Il s'appuie sur sa fonction d'agence pour mobiliser les organismes de recherche et les universités en faveur de la recherche pour le développement.

#### 4. Objectif

L'objectif de ce stage est alors de déterminer une méthode semi-automatique de détection et de suivi des surfaces en eau au moins à une période de l'ordre de huit jours, afin de voir la dynamique de la crue, le cheminement de l'eau à travers les chenaux et le remplissage des cuvettes. Les données issues de cette étude doivent pouvoir être intégrées dans un modèle hydraulique de propagation de crue. Ceci permettra d'aider à construire un modèle hydraulique en permettant de fournir un jeu de données de calage ou de validation des surfaces inondées estimées par modélisation.

#### 5. Méthodologie générale

A partir des données hydrologiques (stations, crues, débits...) et des images satellites existantes, une première évaluation a consisté à choisir une année hydrologique de référence pour l'étude. Dans un second temps, il a fallu mettre au point une méthodologie pour identifier les zones en eau sur les images des satellites choisis, en l'occurrence, Landsat et MODIS. Puis, sur les séries temporelles de MODIS, un maillage en casiers a été appliqué, permettant d'évaluer au sein des mailles la surface en eau à une date donnée. Par ailleurs, pour chacune de ces mailles, un taux d'agrégation des pixels en eau a été calculé permettant ainsi d'évaluer indirectement la forme des surfaces en eau dans chaque maille (lacs, mares temporaires, chenaux).

# I. Acquisition des données

## I.1. Les données hydrologiques

### I.1.1. Le régime hydrologique du delta intérieur du Niger

Afin de comprendre le régime hydrologique du fleuve, il est nécessaire d'analyser le climat sur son bassin afin de voir les apports des précipitations, mais aussi afin d'avoir une connaissance sur la période de couverture nuageuse, essentielle dans le traitement des images satellites.

La zone de convergence intertropicale (CIT), mécanisme déterminant pour le climat de la zone intertropicale, est la zone de contact des deux masses d'air issues des deux hémisphères. Cette rencontre provoque une ascendance de l'air, ce qui engendre des précipitations. La CIT possède un mouvement régulier au cours de l'année, elle se situe au nord de l'équateur à partir de juin, et au sud à partir de décembre. Les pluies les plus fortes sur l'équateur, et donc sur le Fouta Djallon, source du Niger, ont lieu au printemps, lorsque la CIT remonte. Mais sur le DIN, les précipitations sont plus fortes en été et maximales en août. Puis, en septembre, la CIT commence sa descente vers le sud. Ainsi, le sud du DIN reçoit 600 mm/an et le nord 200 mm/an. En raison des températures (29°C en moyenne à Ségou, à l'entrée du DIN), du stockage de l'eau dans des cuvettes, retenues par vanes ou des digues et de la superficie en eau dans le delta, l'évapotranspiration est importante, ce qui a pour effet une diminution de 2/3 des volumes en sortie du delta (Mahé *et al.*, 2002). Enfin, l'infiltration est presque nulle comparée à l'évapotranspiration, car compensée par les précipitations (Brunet-Moret *et al.*, 1986)

Le régime hydrologique du delta intérieur du Niger est en relation avec les pluies tombées à l'amont et sur le delta. Pour l'étude et conformément aux anciennes études sur le Niger, l'année hydrologique commence en mai. Ainsi, si l'on compare cinq stations pour lesquelles les données ne sont pas interrompues sur la période 1999 à 2007, Koulikouro et Ke Macina toutes deux à l'entrée du delta, Mopti, à la confluence du Bani, affluent principal, Dire à la sortie du delta, et Ansongo, environ 400 km après le delta, alors on voit que l'onde de crue est retardée et ralentie entre toutes ces stations (Figure 2). A l'entrée du delta, la crue est maximale en octobre, mais à Mopti, environ 100 km à l'aval, le pic de crue arrive un mois plus tard. La courbe de la station de Dire indique qu'à la sortie du delta, l'onde de crue arrive 2 mois plus tard. L'étalement des eaux dans le delta et l'évaporation ont pour conséquence un amortissement du pic de crue et un décalage de celui-ci de deux mois environ entre l'amont et l'aval du DIN.

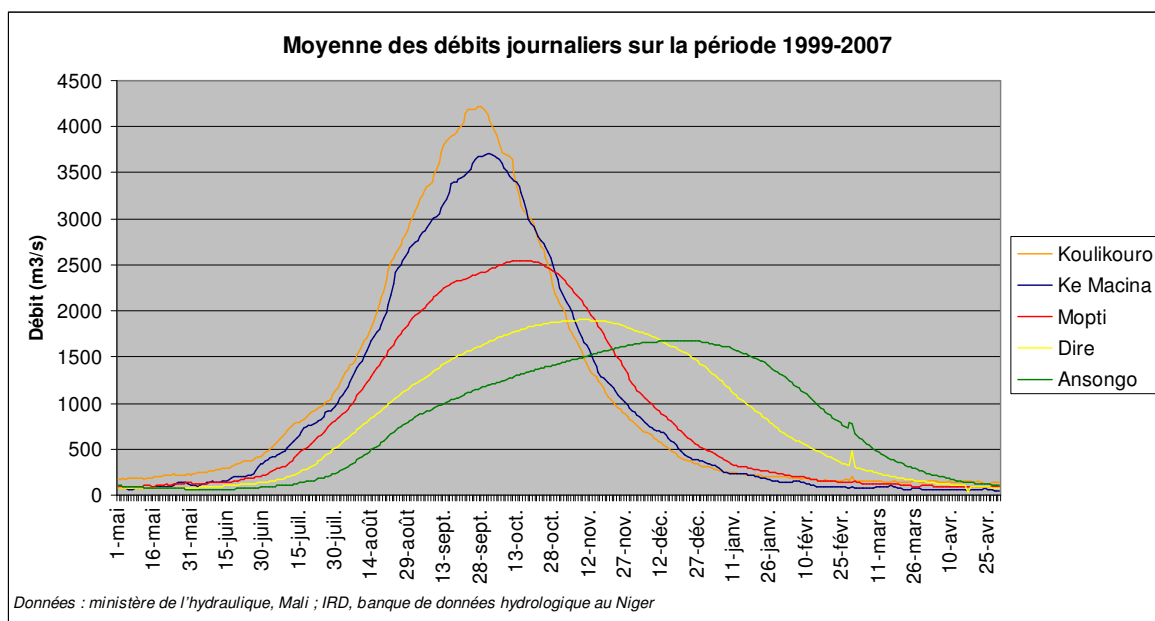


Figure 2 : Moyenne des débits journaliers pour quelques stations du delta intérieur du Niger (1999-2007)



## I.1.2 Choix de l'année de référence

Ces moyennes sur les huit dernières années masquent les variabilités interannuelles. Or, les crues de la dernière décennie sont des crues moyennes par rapport à celles étudiées depuis les années 1950. À partir de données journalières des débits de stations, les totaux annuels des volumes d'eau ont été calculés. Lorsque l'on regarde les volumes sur la période 1949/2007 à Koulikoro, station d'entrée du DIN, la moyenne des volumes est de 40,3 milliards m<sup>3</sup>. Mais, dans les années 1950, les volumes étaient plus importants avec un maximum pour l'année 1951/1952 de 66,9 milliards m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une moyenne de débit annuelle de 2115 m<sup>3</sup>/s. Cependant, dans les années 1980, une sécheresse, commune à l'ensemble du Sahel, a eu pour conséquence une diminution des volumes annuels, avec un volume minimum à Koulikouro en 1989/1990 de 19,9 milliards m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un débit de 631 m<sup>3</sup>/s en moyenne sur l'année.

Pour l'élaboration d'un modèle hydraulique, il est intéressant d'étudier une année avec de forts volumes afin de voir l'étalement maximal de la crue. En effet, lors d'une forte crue, des biefs et des cuvettes, rarement inondés, peuvent être mobilisés. On s'intéresse aux huit années hydrologiques de 1999 à 2007, correspondant aux dates des images satellites, les images MODIS commençant en 2001 et Landsat ETM+ en 1999 (Figure 3). Par ailleurs, ces années sont les plus récentes et sont donc à même de représenter au mieux les effets des aménagements, l'utilisation de l'eau et la tendance climatique actuels. L'année retenue est l'année 2001/2002, car son volume en entrée est le plus important. Mais il ne faut pas oublier que même si cette crue semble la plus forte, avec un débit moyen annuel de 1269 m<sup>3</sup>/s à Koulikouro, elle reste une année moyenne sur les cinquante dernières années.

Enfin, l'année 2003/2004 semble être une année intéressante. Certes, le volume à Koulikouro est un peu moins important, mais sur la station de Ke Macina, station voisine à l'aval, et sur les suivantes, le volume est supérieur cette année. Il faudrait alors étudier les mécanismes engendrant ces différences. Pourquoi la baisse de volume est-elle plus forte entre les deux stations en 2001/2002 ? L'onde étant très forte en entrée en 2001/2002, est-ce que l'eau aurait été stockée en des endroits, comme des cuvettes, qui empêchent un retour de l'eau vers le lit mineur ? Est-ce que la station de Ke Macina a reçu plus de précipitations ? Ces questions seront étudiées dans le cadre du projet HydroDIN.

Nous avons finalement retenu l'année 2001/2002 pour laquelle les images Landsat de bonne qualité sont les plus nombreuses.

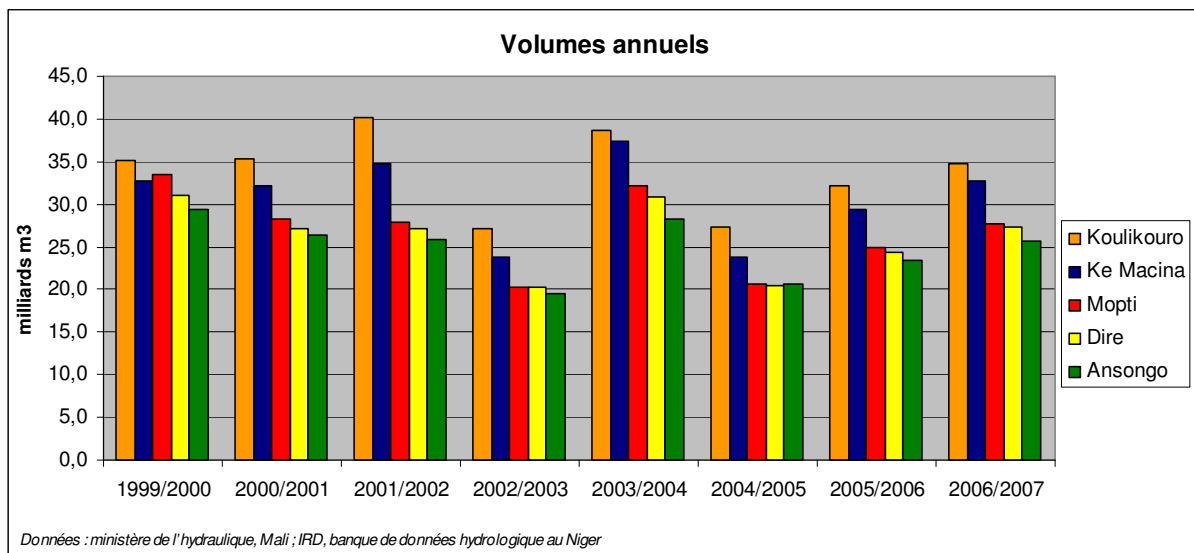


Figure 3 : Volumes annuels d'eau pour quelques stations du delta intérieur du Niger (1999-2007)

## I.2. Les données géographiques et satellitaires

### I.2.1. Les données retenues pour la constitution d'un fond SIG

Plusieurs types de données ont été regroupés pour constituer une base SIG.

Ainsi, un fond de données concernant le tracé du Niger et de ses affluents a été téléchargé à partir du site SIEREM : Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation, élaboré par le laboratoire HSM (Hydrosciences Montpellier). A partir de ce site, ont aussi été téléchargés les tracés du bassin versant principal et des sous bassins versants du Niger. Par ailleurs, il est possible de trouver sur ce site des données sur le calcul des capacités en eau des sols.

Ensuite, pour compléter le tracé des cours d'eau, le tracé des lacs a été téléchargé, disponible à partir du site : <http://biogeo.berkeley.edu/bgm/gdata.php>. Ce site permet aussi le téléchargement d'autres données pour chaque pays du monde : les aires administratives, les routes, les voies ferrées, l'altitude, des données climatiques (températures, précipitations mensuelles)... Ces données sont issues de différents organismes dans le monde. Ainsi, les cours d'eau et lacs proviennent du DCW (The Digital Chart of the World) qui est un institut ESRI, originalement développé pour produire des données pour l'agence cartographique de défense américaine.

Le site <http://www-gem.jrc.it/glc2000/> permet d'obtenir la couverture végétale au Mali, créée par le GVM (The Global Vegetation Monitoring), qui soutient par ailleurs un projet de couverture végétale : le « Global Land Cover 2000 Project ».

Pour aider à la localisation, des couches de données représentant les principales villes du Mali, ainsi que les principales stations hydrométriques sur le Niger ont été rajoutées. Par ailleurs, des cartes papiers topographiques géoréférencées, réalisées entre le milieu des années 1950 et le début des années 1970, apportent une précision sur la morphologie des cours d'eau, des lacs et des zones humides, ainsi que sur la toponymie. Ce sont des cartes scannées au 1/200 000<sup>ème</sup> de l'IGN.

Enfin, des impressions d'écran (Google Maps, Google Earth) d'images satellites ont été ajoutées et géoréférencées. Même si ces images ne sont pas datées, elles sont globalement de meilleure résolution que les images utilisées dans l'étude (Landsat, MODIS).

Pour finir, d'autres cartes issues de la littérature, numérisées, présentent des informations complémentaires (végétation, géologie, activités humaines, résultats d'études sur les zones inondées...).

### I.2.2. Les données satellitaires

#### I.2.2.1. Les données Landsat

Le capteur ETM+, dont les images seront utilisées par la suite, est embarqué sur le satellite Landsat 7, lancé en avril 1999. Ce satellite a une orbite héliosynchrone à 705 km d'altitude. Le cycle orbital complet dure seize jours. La fauchée ou champ d'observation du capteur est de 185 km de large. Il possède six bandes spectrales de 30 m de résolution du visible au moyen infrarouge, une bande à 60 m de résolution dans l'infrarouge thermique et une bande à 15 m de résolution dans le panchromatique (Tableau 1).

Numéros de bande	Bandes spectrales (nm)	Spectre	Résolution spatiale (m)
1	450-520	Bleu	30
2	520-600	Vert	30
3	630-690	Rouge	30
4	770-900	Proche Infrarouge	30
5	1 550-1 750	Moyen Infrarouge	30
6	10 400-12 500	Infrarouge thermique	60
7	2 080-2 350	Moyen Infrarouge	30
8	520-900	Panchromatique	15

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur ETM+ présent sur le satellite Landsat

Pour couvrir la grande majorité du delta, il faut deux images (path : 197 ; row : 49 et path : 197 ; row : 50), qui ont été assemblées en mosaïque. (Annexe 1). En raison de l'année hydrologique observée et de la qualité des images (une couverture d'image inférieure à 5 %), on possède trois dates d'images : 28 juillet 2001 (delta amont et aval), 16 octobre 2001 (delta amont et aval) et 17 novembre 2001 (delta amont seulement). Ces images possèdent un niveau de correction L1G, elles ont donc subi des corrections radiométrique et géométrique.

### I.2.2.2. Les données MODIS

- *Le capteur MODIS*

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un capteur présent sur les satellites Terra et Aqua, tous deux héliosynchrones. Le satellite Terra passe au-dessus de l'équateur dans la matinée, tandis que le satellite Aqua traverse l'équateur dans l'après-midi. La fauchée de l'instrument MODIS est de 2 330 km si bien que la totalité de la surface terrestre est couverte en un à deux jours. Le capteur est composé de 36 bandes spectrales allant des longueurs d'onde de 0,4  $\mu\text{m}$  à 14,4  $\mu\text{m}$ . Deux bandes ont une résolution spatiale de 250 m, cinq bandes ont une résolution de 500 m, les 29 autres bandes ont une résolution de 1 km (Tableau 2).

Numéros de bande	Bandes spectrales (nm)	Spectre	Résolution spatiale (m)
1	620-670	Rouge	250
2	841-876	Proche Infrarouge	250
3	459-479	Bleu	500
4	545-565	Vert	500
5	1230-1250	Proche Infrarouge	500
6	1628-1652	Moyen Infrarouge	500
7	2105-2155	Moyen Infrarouge	500
8 à 36	405 à 14 385	Du visible à l'infrarouge thermique	1000

*Tableau 2 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MODIS présent sur le satellite Terra*

Les images MODIS sont gratuites, il faut en faire la demande au préalable sur le site <http://edcdaac.usgs.gov/MODIS/dataproducts.asp>. Il existe de nombreux produits réalisés par la NASA. Par exemple, il existe des produits concernant la réflectance, d'autres sont des produits de végétation, de température, certains sont constitués d'images journalières, d'autres d'images de synthèse à huit jours. Les corrections atmosphériques et géométriques ne sont pas les mêmes pour tous ces produits, il en est de même pour les résolutions spectrale et spatiale. Il existe ainsi presque 90 types de produits. Il faut donc savoir, avant de télécharger un produit, l'utilité de celui-ci et les objectifs à atteindre. Une aide à la commande d'images est proposée par Houlès (Houlès, 2006b). En annexe est donnée une aide à la compréhension du nom d'image, qui complète l'aide au téléchargement des images (Annexe 2).

- *Les produits de réflectance de surface*

La présente étude vise à analyser l'évolution journalière de la crue dans le delta intérieur du Niger. La méthodologie retenue, et détaillée par la suite, s'appuie sur l'analyse de bandes de réflectance<sup>1</sup> du visible au moyen infrarouge. Les produits retenus sont des images de réflectance journalières, ainsi que des synthèses de réflectance à huit jours issues des mesures journalières, tous deux à 500 mètres de résolution.

<sup>1</sup> Rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi au rayonnement incident sur une surface dans une longueur d'onde.

Les produits « MODIS Surface Reflectance » sont le résultat d'une estimation de la réflectance de la surface comme si elle était mesurée au niveau du sol en l'absence de diffusion et d'absorption atmosphériques. Les corrections réalisées sur les produits L2G sont des corrections de diffusion et d'absorption par les gaz et les aérosols atmosphériques (troposphériques et stratosphériques), ainsi que des corrections géométriques.

Le produit MOD09GA est le produit qui contient les données de réflectance journalière. Les bandes (ou « sciences data sets ») fournies pour ce produit incluent les bandes de réflectance de 1 à 7, du visible au moyen infrarouge à 500 m de résolution (Tableau 2). Les bandes à 1 km incluent, entre autres, des données sur les angles solaires, un état de la qualité des pixels et des pointeurs d'orbite. Le détail de ces bandes est donné en annexe (Annexe 3), avec leur résolution et leur type de codage.

Le produit MOD09A1 est le produit qui contient les données de synthèse à huit jours. Chaque pixel contient la meilleure observation possible issue du niveau de correction L2G (c'est-à-dire des images journalières décrites ci-dessus), ceci sur une période de huit jours. Le meilleur pixel de la période est défini sur les critères suivants : meilleure couverture d'observation, angle de vue le plus faible possible, absence de nuages ou d'ombre de nuage, et minimum d'aérosols possible. Ce produit est alors considéré de correction L3. Les bandes fournies pour ce produit incluent les sept mêmes bandes de réflectance que les images journalières, ainsi que par exemple, une évaluation de la qualité du pixel, le jour du pixel composant l'image, et des données sur les angles solaire, de vue ou azimutal (Annexe 3).

Puisque la fauchée du capteur est de 2330 km, une seule image est utile pour couvrir le delta intérieur du Niger. Les images étant gratuites, une année hydrologique complète a été téléchargée pour les synthèses à 8 jours, allant du 1<sup>er</sup> mai 2001 au 1<sup>er</sup> mai 2002. Pour les images journalières, le traitement étant plus long, les données téléchargées commencent réellement au début de la crue, au 1<sup>er</sup> juillet 2001 et se terminent à la fin de la crue, le 29 février 2002 (Annexe 1).

	<b>Images journalières</b>	<b>Images de synthèse à 8 jours</b>
<b>Avantages</b>	-grande précision temporelle -possibilité de voir plusieurs jours de suite	-peu ou pas de nuages -bonnes corrections -bonne qualité générale
<b>Inconvénients</b>	-nuages -corrections de moins bonne qualité	-perte de la précision temporelle -pour 2 images successives, la donnée pour un même pixel peut être comprise entre 1 et 16 jours

*Tableau 3 : Comparaison des avantages et des inconvénients entre les images journalières et les images de synthèse à 8 jours*

Pour l'étude, les bandes MODIS comprises dans l'infrarouge thermique n'ont pas été utilisées car leur résolution est moins bonne, et car elles n'apportent pas de meilleurs résultats par rapport au domaine du visible et du proche et moyen infrarouge. Par ailleurs, l'utilisation du radar n'a pas non plus été retenue car l'objectif est un suivi journalier ou hebdomadaire. Les images radar sont plus rares et plus coûteuses que les images MODIS, toutefois, elles pourraient servir lors de la période de mousson, de mai à août. Les images MODIS retenues nécessitent un premier traitement pour être exploitables sur notre zone d'étude.

### I.3. Pré-traitements des données satellitaires

#### I.3.1. Reprojection, découpage et changement de format des images MODIS

Les bandes contenues dans le format hdf ont été reconverties au format geotiff, ceci afin de faciliter les traitements et la manipulation des bandes dans différents logiciels. Il existe un outil gratuit de

reconversion des images, le MRT (MODIS Reprojection Tool), disponible sur le site fournissant les images MODIS, le LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) (Annexe 4).

Ce logiciel permet dans le même temps le redimensionnement des images. Pour l'étude, celles-ci ont été centrées sur le delta, avec toutefois une extension vers le lit mineur à l'amont et à l'aval, ceci afin de comparer les images avec les données des stations limnimétriques<sup>1</sup> existantes (Tossaye à l'aval et Koulikouro à l'amont) (Annexe 1).

La projection utilisée pour les produits MODIS est la projection « Integerized sinusoidal » (ISIN), qui est un type de projection sinusoidale unique aux produits MODIS. Grâce à l'outil MRT, il est aussi possible de changer la projection. La projection retenue en sortie est la projection UTM zone 30 Nord, datum WGS 84, la même que celle qui est fournie pour les images Landsat.

Enfin, pour éviter les temps de calcul trop longs, un masque géographique a été tracé manuellement, visant à réduire les surfaces de désert, extérieures au delta.

### I.3.2. Évaluation de la qualité des images MODIS

Même si les images de niveau L2G et L3 ont fait l'objet de corrections atmosphériques, des tests effectués sur la méthode retenue par la suite (ratio de bande de type B1-B2/B1+B2 et seuil unique appliqué sur toutes les images afin de faire ressortir l'eau) montrent des sous- ou sur- estimations des surfaces en eau sur certaines images. Une correction relative, la méthode des invariants<sup>2</sup> a été testée sans résultats probants.

Au lieu de corriger toutes les images avec les défauts que cela peut entraîner, il a été jugé plus utile de supprimer les images entraînant des erreurs. Puisque les images posant problème sont celles où les nuages sont les plus nombreux, nous avons mis au point une méthode pour évaluer le pourcentage de nuages sur l'image.

Ainsi, sur les bandes de qualité (ou « science data set ») appelées « 500m Reflectance Band Quality » pour les synthèses à huit jours et « state 1 km, reflectance data set QA » pour les images journalières, il est possible de voir quels pixels sont clairs, c'est-à-dire jugés comme contenant aucun nuage. Pour ce faire, sur ces bandes qualité, les deux premiers bits (les deux derniers dans le sens de la lecture) sont extraits, ceci pour toutes les images de la série temporelle. La combinaison de ces deux bits renseigne sur l'état du pixel, ainsi le code 00 présente un pixel clair (Figure 4).

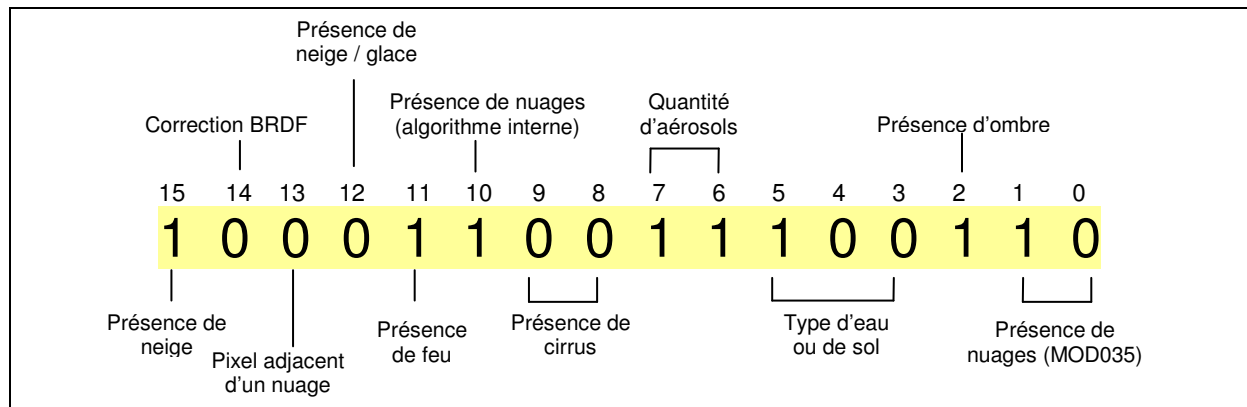


Figure 4 : Exemple de codage de la qualité des images de synthèse à huit jours

<sup>1</sup> Station limnimétrique : station mesurant la hauteur d'eau d'un cours d'eau ou d'un lac.

<sup>2</sup> Méthode des invariants : méthode de correction relative qui suppose qu'il existe dans la zone d'étude des surfaces qui conservent leurs propriétés radiométriques au cours du temps. Par exemple, peuvent être considérés comme invariants des toits d'immeuble, des pistes d'atterrissage, des autoroutes, des vastes surfaces sableuses. D'une date à l'autre, le compte numérique de ces objets ne doit *a priori* pas varier : si une variation est notée, elle n'est due qu'aux variations des conditions atmosphériques entre les deux dates. On choisit une image de référence dans la série. Cependant, les invariants présentent tout de même un écart d'une image à l'autre. Toutes les autres valeurs des autres pixels sont alors réduites ou augmentées d'un même écart. Ainsi, « on fait correspondre un même compte numérique à des pixels ayant même réflectance, sans tenir compte de la véritable valeur de cette réflectance au sol » (Song et al., 2001).

Le calcul est effectué sur tous les pixels de l'image sans le masque géographique. En effet, en dehors du masque géographique, il peut y avoir un gros nuage, qui va alors influencer sur la valeur de la réflectance globale de l'image. Il aurait été préférable de faire ce calcul sur les images de base n'ayant pas été redimensionnées, mais les bandes de ces images n'ont pas été transformées du format hdf au geotiff. Les images redimensionnées représentent seulement 30 % de l'image de départ, mais elles donnent tout de même une tendance.

Après des tests visuels, pour les images de synthèse à huit jours, on estime que lorsque les images présentent plus de 5 % de nuages, alors les erreurs de réflectance sont trop élevées pour que l'application du seuil unique soit possible. Pour les images journalières, on estime que lorsque les images présentent plus de 10 % de nuages, alors il existe un biais dans les valeurs de réflectance. Le seuil des images journalières est plus élevé car il est possible, lorsque les dates des images sont proches dans le temps, de lisser les effets. De plus, le traitement des images journalières inclut par la suite un traitement qui permet de supprimer les nuages.

Au final, cette étape supprime de nombreuses images du traitement, surtout en saison pluvieuse : de mai à mi-septembre (Annexe 5). Comme le pic de crue commence en octobre, il est tout de même possible d'étudier la crue sur le DIN, même si l'arrivée de la crue au mois d'août ne pourra peu ou pas être suivie.

## II. Méthodologie de traitements des images

### II.1. Le comportement radiométrique de l'eau

#### II.1.1. Généralités sur les caractéristiques de l'eau et les différentes méthodes d'identification

L'eau est presque un corps noir : elle absorbe une grande partie de l'énergie qu'elle reçoit dans le visible et le proche infrarouge, mais elle ré-émet la quasi-totalité de l'énergie reçue dans l'infrarouge thermique. En raison de ses caractéristiques propres, il existe alors plusieurs méthodes pour délimiter et évaluer la présence de l'eau libre par télédétection : par des capteurs passifs, dans les domaines de l'optique et de l'infrarouge thermique, mais aussi à l'aide de capteurs actifs : les radars.

L'utilisation de bandes dans l'infrarouge thermique permet de détecter l'eau car celle-ci possède une grande inertie thermique. Elle apparaît plus froide le jour comparée aux sols car elle se réchauffe moins vite que ceux-ci, mais apparaît à l'inverse plus chaude la nuit. Il est par ailleurs possible de déduire sa température en connaissant son émissivité<sup>1</sup>, égale à 0,95 (Reinart, 2008 ; Sentlinger *et al.*, 2008).

L'utilisation du radar est aussi utile car celui-ci est sensible à l'eau, en effet, la détection des surfaces en eau est possible car elles apparaissent comme des surfaces lisses homogènes. Mais avant tout, le radar permet de détecter l'eau en présence de nuages, ce qui peut s'avérer utile en période de mousson de mai à mi-septembre. Morley *et al.* (1996) ont comparé les superficies en eau des lacs entre la saison sèche et la saison humide grâce à des images du satellite ERS-1. Van de Giesen (2001) a également utilisé le radar pour évaluer l'étendue des inondations des plaines d'Afrique de l'Ouest.

Même si le radar et l'infrarouge thermique donnent de bons résultats, les méthodes se basant sur la réflectance de l'eau dans le domaine optique ont été étudiées depuis plus longtemps et, de ce fait, sont très diverses. Dans le domaine optique, l'eau a une signature radiométrique particulière. L'eau pure a une forte diminution dans le spectre visible, devenant quasi-nulle dans le proche infrarouge. Son comportement radiométrique est ainsi aisément différenciable de la végétation ou des sols. En effet, la végétation connaît une baisse relative dans le rouge et un très fort pic dans le proche infrarouge. La signature des sols se distingue par une croissance régulière du visible à l'infrarouge. Cependant, au Sahel, et en particulier dans le delta intérieur du Niger, la charge en limons est élevée, l'eau est très turbide. La réflectance de l'eau est modifiée par la présence de la végétation et de limons, elle n'est plus tout à fait celle de l'eau pure, mais est le résultat d'un mélange des comportements radiométriques de l'eau, des sols et de la végétation. Ainsi, plus l'eau est turbide, plus la pente de décroissance du visible à l'infrarouge est faible (Puech, 1993) (Figure 5).

---

<sup>1</sup> Rapport du rayonnement émis par une surface au rayonnement émis par un corps noir parfait porté à la même température.

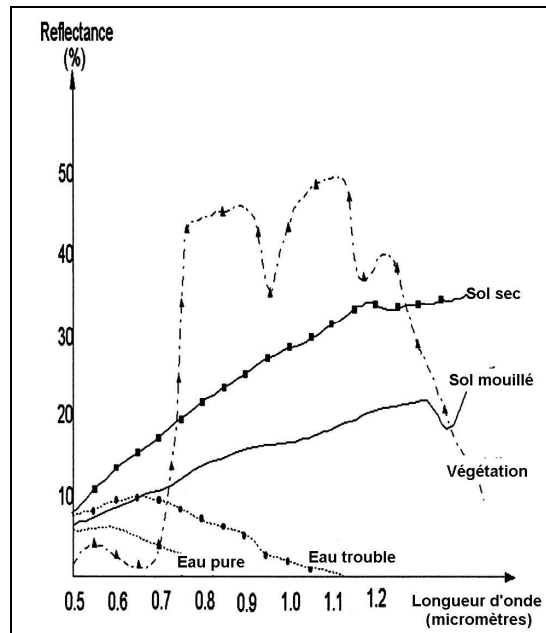


Figure 5 : Signatures spectrales de quelques objets courants ([www.wmo.ch](http://www.wmo.ch))

## II.1.2. Les méthodes de détection de l'eau dans le domaine de l'optique

### II.1.2.1. L'utilisation d'une seule bande

L'utilisation d'une seule bande consiste en l'étude des réflectances dans le moyen infrarouge (MIR) ou dans le proche infrarouge (PIR), plutôt utilisé dans le domaine de la photographie.

L'eau absorbe fortement les ondes du PIR tandis que la végétation et les sols secs réfléchissent les ondes du PIR. Sur une image en niveaux de gris, l'eau apparaît très sombre alors que la végétation apparaît blanche. Cette méthode peut comporter des erreurs : en effet, il revient à l'analyste de décider quels comptes numériques sont associés à l'eau et d'autres non : un sol humide peut être considéré comme étant de l'eau turbide et inversement. Il en résulte des erreurs de sur- ou sous-estimation des surfaces en eau (McFeeters, 1996).

Une autre méthode consiste à regarder l'histogramme des comptes numériques sur une bande. Verdin (1996) utilise la bande TM 5 de Landsat, bande dans le MIR, car elle offre le meilleur contraste entre l'eau et le sol parmi toutes les autres bandes TM, ceci pour évaluer la surface en eau de lacs temporaires au Niger. Une fenêtre est identifiée autour de chaque lac permettant de contenir 50 % des pixels en eau. L'histogramme résultant est bi-modal, le premier pic correspond à de l'eau pure, le second pic correspond à des pixels de sol purs. L'aire des lacs est obtenue en additionnant les pixels en eau purs et la moitié des pixels situés entre les 2 pics.

### II.1.2.2. Le calcul d'un ratio de bandes

Lorsque l'on dispose d'images multispectrales, la méthode la plus couramment utilisée consiste à calculer des indices à l'aide de deux bandes au minimum.

Un des indices les plus connus est le **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) :

$$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

où RED signifie une bande du satellite qui évalue la lumière rouge réfléchie, et NIR (Near Infrared) correspond à une bande du satellite évaluant la réflectance dans le proche infrarouge. Cet indice est utilisé pour faire ressortir la végétation sur une image. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1. En effet, plus la différence entre les valeurs du proche infrarouge et du rouge est grande, plus les



valeurs sont proches de 1. Cela traduit le pic de valeurs caractéristiques de la végétation lors du passage de la réflexion du rouge au proche infrarouge. Les pixels représentant les surfaces en eau ont des valeurs négatives, la végétation possède des valeurs élevées, tandis que les sols ont des valeurs proches de 0,1 ou 0,2. Cet indice est satisfaisant en première approche pour une différenciation visuelle entre la végétation, les sols et l'eau, mais ne permet pas de réellement faire ressortir les surfaces en eau. Une autre utilisation de cet indice consiste à différencier l'eau turbide de l'eau pure (Puech et Gadelle, 1993).

S'appuyant sur le même principe que le NDVI, d'autres indices ont été calculés pour faire apparaître les surfaces en eau. Ainsi, le **NDWI** (Normalized Difference Water Index), élaboré par McFeeters (1996), permet de faire apparaître l'eau. Il est calculé comme suit :

$$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Ce ratio utilise la propriété de l'eau à plus réfléchir dans le visible que dans le proche infrarouge. Ainsi, en appliquant cet indice aux images multispectrales, les surfaces en eau ont des valeurs positives, alors que le sol et la végétation ont des valeurs négatives ou proches de zéro, en raison de leur plus grande réflexion dans le PIR que dans le spectre du vert.

Afin d'améliorer l'indice NDWI de McFeeters, Xu (2006), au lieu d'utiliser une bande NIR, utilise une bande MIR. Ainsi, il appelle cet indice le **MNDWI** (Modified Normalized Difference Water Index) :

$$\frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR}$$

Cet indice repose sur les mêmes caractéristiques que le NDWI, c'est-à-dire que l'eau réfléchit plus dans le vert que dans l'infrarouge. Il est cependant légèrement plus efficace pour différencier l'eau, car d'après Xu, avec cet indice, l'eau pure a des valeurs positives plus élevées, mais le sol et la végétation ont toujours des valeurs négatives puisque le sol réfléchit plus le rayonnement du MIR que le NIR. Un autre indice, utilisant les mêmes bandes, mais dans l'ordre inverse du MNDWI, a été utilisé par Lacaux *et al.* (2006) au Sénégal pour identifier les mares temporaires : le **NDPI** (Normalized Difference Pond Index).

Afin de mesurer le degré de turbidité à l'intérieur des mares, Lacaux *et al.* (2006), utilisent le **NDTI** :

$$\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$$

L'eau pure possède une réponse faible dans le vert et qui diminue encore dans le rouge. L'augmentation de la turbidité dans les mares rend leur réponse spectrale proche de celle des sols nus. Cependant, comme les valeurs des réponses radiométriques de la bande rouge sont largement plus grandes que celles de la bande verte pour une mare turbide, les valeurs sont positives lorsque les mares sont turbides, et négatives lorsque les mares contiennent de l'eau pure.

Un dernier indice, le **NDMI** (Normalized Difference Moisture Index) (Xu, 2006), permet de faire ressortir initialement l'humidité de la végétation. Il est défini ainsi :

$$\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$$

Il est à noter que cet indice est aussi appelé dans la littérature NDII (Normalized Difference Infrared Index) calculé pour la première fois par Hardisky (1983) sur des bandes Landsat TM. Il est encore appelé LSWI (Land Surface Water Index) par Xiao (2005) et NDWI (Normalized Difference Water Index) par Gao (1996). Cet indice a souvent été utilisé pour évaluer le taux d'humidité dans le feuillage de la végétation. Par extension, il peut faire ressortir un mélange d'eau et de végétation dans un même pixel ou bien de la végétation inondée (Xiao, 2005). Plus la végétation contient de l'eau, plus sa réflectance dans le MIR est faible, plus le NDMI est élevé.

Le tableau ci-après récapitule les différents indices existant pour détecter l'eau, l'humidité de la végétation ou la turbidité (Tableau 4). Enfin, d'autres indices plus complexes qu'un simple ratio entre

deux bandes sont élaborés pour une étude donnée en fonction des bandes des capteurs disponibles et de la région étudiée (Mariko, 2003).

Nom de l'indice	Ratio de bandes	Auteur	Utilisation	Applications MODIS
<b>NDVI</b>	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Townshend and Justice, 1986	Essentiellement indice de végétation Indice de turbidité	$\frac{B2 - B1}{B2 + B1}$
<b>NDWI</b>	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	McFeeters, 1996	Indice d'eau libre	$\frac{B4 - B2}{B4 + B2}$
<b>MNDWI</b>	$\frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR}$	Xu, 2006	Indice d'eau libre	$\frac{B4 - B6}{B4 + B6}$
<b>NDMI</b>	$\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$	Xu, 2006	Essentiellement indice d'humidité de la végétation Indice d'humidité des sols	$\frac{B2 - B5}{B2 + B5}$  $\frac{B2 - B6}{B2 + B6}$
<b>NDTI</b>	$\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$	Lacaux, 2006	Indice de turbidité	$\frac{B1 - B4}{B1 + B4}$

Tableau 4 : Principaux indices permettant la détection de l'eau

La méthode se basant sur un ratio de bandes est retenue car elle semble la meilleure pour l'automatisation. En effet, en effectuant une division, les valeurs sont normalisées, et alors l'utilisation d'un seuil unique pour identifier l'eau est possible. Ainsi, Sakamoto *et al.* (2007), en utilisant deux indices normalisés, dont le NDMI, et en appliquant un seuil unique à chacun des deux indices, ont pu analyser la dynamique de l'inondation dans le delta du Mékong sur 5 ans, à l'aide d'images MODIS de synthèse de réflectance à huit jours. Les bandes du visible et du moyen infrarouge ont été retenues, il faut maintenant tester le ou les meilleurs indices pour notre étude.

### II.1.2.3. Tests des différents indices de détection de l'eau sur les images MODIS

Les différents indices cités ci-dessus ont été testés sur une image de synthèse à 8 jours lors de la saison humide (16 au 24 octobre 2001) et une autre lors de la saison sèche (22 au 30 avril 2002) (Tableau 5), les images correspondantes sont visibles dans l'Annexe 6. Pour identifier les états d'occupation du sol à ces deux dates, les images MODIS ont été comparées à des images Landsat et à d'autres cartes d'occupation du sol, des surfaces inondées issues d'études antérieures sur le DIN (Mariko, 2003 ; Marie, 2000). On aimerait faire ressortir l'eau et la végétation inondée sans, par la suite, faire de distinction entre ces deux types de surface.

Nom de l'indice	Saison humide	Saison sèche
<b>NDVI</b> $\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Cet indice fait bien ressortir la végétation, qu'elle soit inondée ou non. L'eau pure apparaît en noir, l'eau plus turbide ou mélangée à de la végétation apparaît en blanc. <b>Cet indice ne permet pas de différencier la végétation inondée du reste.</b>	L'eau moins turbide à cette saison, apparaît bien noire, en contraste avec les terres et la végétation.
<b>NDWI</b> $\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	L'eau pure apparaît en blanc, l'eau turbide est aussi visible, <b>la végétation inondée est un peu moins visible.</b>	L'eau apparaît bien en blanc, mais les sols secs également. <b>Les sols secs ont une réflectance voisine de celle de l'eau.</b>
<b>MNDWI</b> $\frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR}$	Le DIN apparaît en un seul tenant, il n'y a pas de différenciation entre l'eau pure, turbide ou mélangée à de la végétation. <b>Ce seul indice peut faire ressortir tous types d'eau.</b>	L'eau pure apparaît bien en blanc. Quelques bras du Niger dans le DIN apparaissent en gris clair.

Nom de l'indice	Saison humide	Saison sèche
<b>NDMI</b> $\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$	Cet indice fait aussi bien ressortir le delta. Il semblerait par contre que cet indice ne fasse pas toujours ressortir l'eau pure mais <b>fait ressortir essentiellement l'eau mélangée à la végétation.</b>	L'eau apparaît en blanc, mais aussi <b>une partie du DIN où la végétation est inondée</b> à cette période.
<b>NDTI</b> $\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$	Cet indice fait apparaître la végétation inondée en noir. <b>Le lit majeur</b> , contenant moins de végétation apparaît en gris, <b>de la même couleur que certains sols secs.</b>	L'eau apparaît très noire, mais il y a peu de différenciation entre des sols avec de la végétation, des sols secs au nord du DIN.

Tableau 5 : Tests des différents indices de détection de l'eau sur les images MODIS

L'indice MNDWI semble bien approprié pour faire ressortir tous types de surface en eau (eau pure, turbide, profonde ou non, mélange de végétation et d'eau). Le NDMI pourra servir en complément, car il fait ressortir le taux d'humidité contenu dans le feuillage de la végétation. Par extension, on peut considérer qu'il peut faire ressortir aussi un mélange d'eau et de végétation dans un pixel ou alors de la végétation inondée dans un autre pixel.

Après avoir retenu deux indices possibles pour identifier toutes les surfaces en eau du DIN, il faut à présent trouver un seuil unique applicable sur toutes les images. Puisque l'on ne dispose pas de relevés de terrain, on utilise une image Landsat de meilleure résolution spatiale comme « vérité terrain ».

## II.2. Validation des indices retenus pour détecter l'eau

### II.2.1. Constitution d'une vérité terrain ou d'une référence de validation à partir d'une image Landsat

Pour valider les résultats des images MODIS, il est utile de les confronter à d'autres données, le meilleur type de données étant des relevés de terrain. Or, on ne dispose pas de relevés de terrain datant de 2001 ou d'une autre année. Pour illustrer la méthode retenue pour valider les résultats, on se propose d'utiliser l'image Landsat du 16 octobre 2001, lors du maximum du pic de crue.

Sur cette image et sur les deux autres images Landsat, une classification non supervisée a été réalisée, grâce à la méthode K-means ou classification non supervisée par nuées dynamiques (Annexe 7). Pour la classification de l'image Landsat du 16 octobre 2001, 15 classes ont été choisies. Le résultat produit une carte de classification des zones en fonction de leur réflectance dans les 6 bandes de Landsat (Annexe 7). Afin de voir les différents comportements spectraux des classes, il est nécessaire d'étudier les courbes de réflectance des classes (Figure 6).

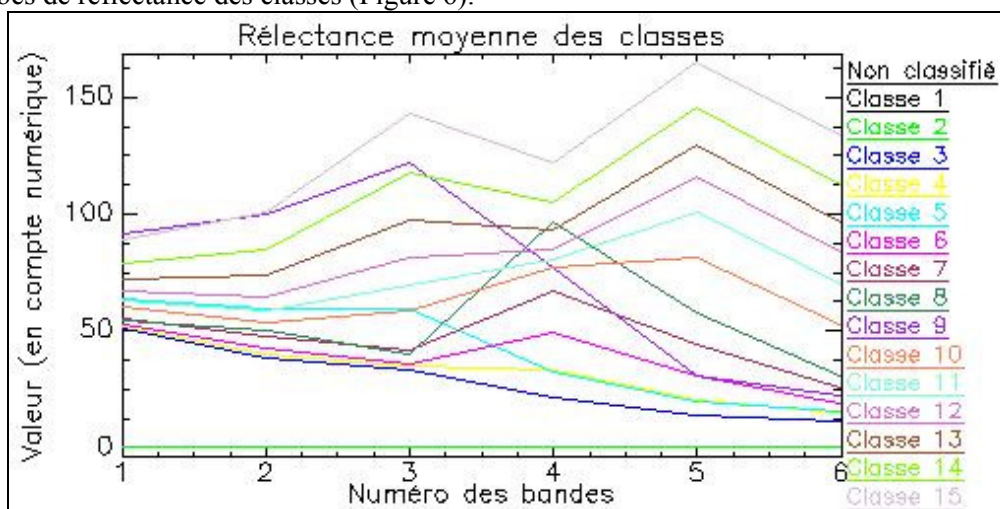


Figure 6 : Réflectances moyennes de classes (en compte numérique) issues d'une classification en nuées dynamiques sur l'image Landsat du 16 octobre 2001

Ces 15 classes représentent parfois des objets de réflectance semblable qui peuvent alors être regroupés dans une nouvelle classe. Pour regrouper les classes issues de cette classification non supervisée, les comportements radiométriques respectifs de l'eau, de la végétation et des sols ainsi que des compositions colorées ont été analysés.

Sur l'histogramme ci-dessus, les classes 3 et 4 ont leur profil radiométrique qui descend progressivement du visible à l'infrarouge. Ces courbes sont celles de l'eau, la classe 4 ayant une pente légèrement plus faible, elle est moins pure ou moins profonde. Ces deux classes sont reclassées en eau libre. La classe 5 et la classe 9 représentent de l'eau très turbide. Les pentes sont toujours négatives entre la bande du rouge et le moyen infrarouge. Cependant, les valeurs élevées dans la bande bleue et la progression entre le bleu et le rouge pour la classe 9 montrent que ces classes sont un mélange d'eau et de matières du sol, donc de l'eau très turbide.

Les classes 11, 12, 13, 14, et 15 ont toutes le même profil : leur courbe augmente du visible au moyen infrarouge. Elles représentent des sols, plus ou moins secs et avec plus ou moins de végétation. La classe 11 représente un sol avec de la végétation éparse.

Grâce à l'aide d'interprétation visuelle, il est possible de voir que la classe 10 représente de la végétation, plutôt sèche ou mélangée au sol.

Les classes 6, 7 et 8 présentent le même profil : une baisse dans le visible, un pic significatif du rouge au proche infrarouge, puis une baisse du proche infrarouge au moyen infrarouge. Le pic du rouge au PIR est caractéristique de la végétation. Mais la forte diminution dans le MIR indique aussi la présence d'eau, ou tout du moins, de forte humidité. De même, dans le visible, les faibles valeurs et la baisse relative confirme la présence d'eau. Grâce à une vérification par interprétation visuelle, ces trois classes sont considérées comme représentant des pixels de mélange eau et végétation.

On obtient alors quatre classes : 1. eau ; 2. végétation inondée ; 3. sols secs ; 4. végétation sèche. La carte est visible en annexe, ainsi que celles des deux autres images Landsat (Annexe 8). Ici, pour l'étude, on veut uniquement les surfaces inondées du reste des autres types de surface. On considère alors que la végétation inondée et l'eau font partie d'une seule et même classe : zone inondée. La végétation sèche et les sols sont groupés dans une autre classe : zone non inondée.

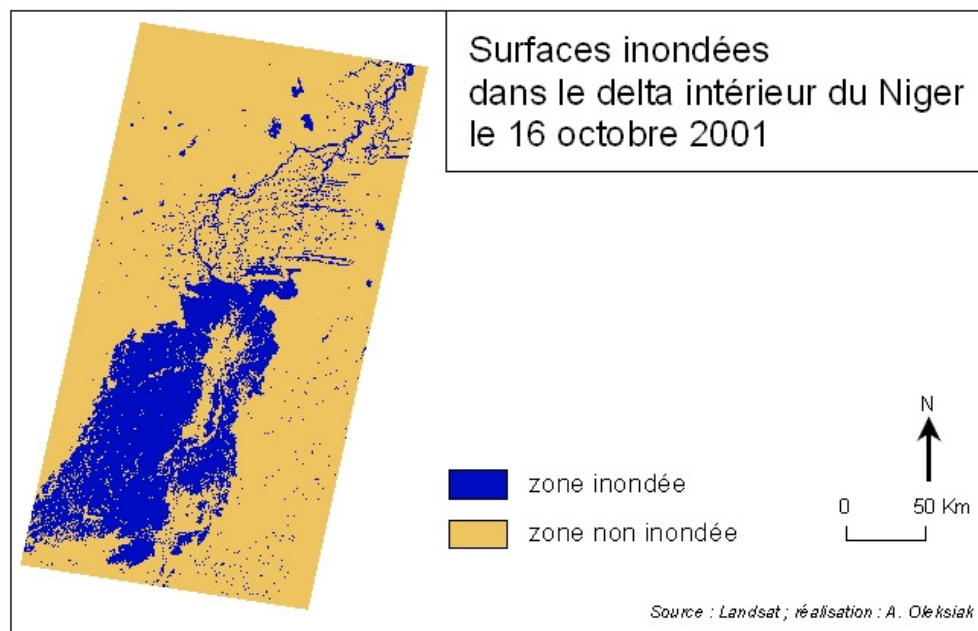


Figure 7 : Surfaces inondées dans le delta intérieur du Niger le 16 octobre 2001

Dans la partie amont du delta, la crue est à son maximum à cette période, toute la superficie du delta est inondée. Cette carte constitue la « vérité terrain », elle sera la base de la validation. Ces traitements ont été effectués sur les deux autres images Landsat de juillet et de novembre. Elles serviront également de base à la validation.

## II.2.2. Détermination d'un seuil unique de l'indice MNDWI des images MODIS à partir de l'image Landsat

Grâce au type de carte réalisée ci-avant, les zones inondées ont été déterminées à 3 dates différentes. La méthode utilisée par la suite consiste en un seuillage unique sur l'indice MNDWI, indice discriminant au mieux les zones inondées, et utilisé pour toutes les images de la série temporelle. Le test de choix de seuil unique a été réalisé sur les images journalières et les synthèses à huit jours. Ici, pour illustrer la méthode, les images journalières ont été retenues et testées sur l'image Landsat du 16 octobre.

Pour une approche visuelle, les seuillages ont été réalisés sur deux images de la série temporelle, de bonne qualité, avec peu de nuages : le 18 octobre 2001, image de très bonne qualité la plus proche de la date de l'image Landsat, et le 16 février 2002, image de très bonne qualité, mais en fin de crue (Annexe 9). Visuellement, c'est-à-dire en comparant une composition colorée avec l'indice MNDWI, et en testant à première vue les seuillages sur l'indice MNDWI, on constate que le seuil se trouve entre -0,3 et -0,4. Le seuil à -0,4 surestime des zones inondées, tandis que le seuil à -0,30 les sous-estime. L'estimation du meilleur seuil à appliquer sur toutes les images est alors définie en prenant comme « vérité terrain » l'image Landsat. L'image MODIS du 18 octobre 2001 est comparée à l'image Landsat du 16 octobre 2001. Pour ce faire, la classification Landsat zone inondée/zone non inondée est rééchantillonnée à des pixels de 463,3 m, taille des pixels MODIS. Une zone test-témoin dans le delta amont est choisie en fonction des éléments qui la composent. La zone choisie est une région en plein centre du delta, à l'ouest de Mopti, légèrement plus élevée que le reste du delta, qui présente donc des zones sèches, mais aussi des zones inondées. Le tracé de cette zone test a été effectué à main levée en suivant les contours de la zone terrestre, tout en incluant une zone inondée autour de cette zone. Cette zone représente 3 100 km<sup>2</sup>, soit un échantillon de 14 445 pixels (Figure 8).

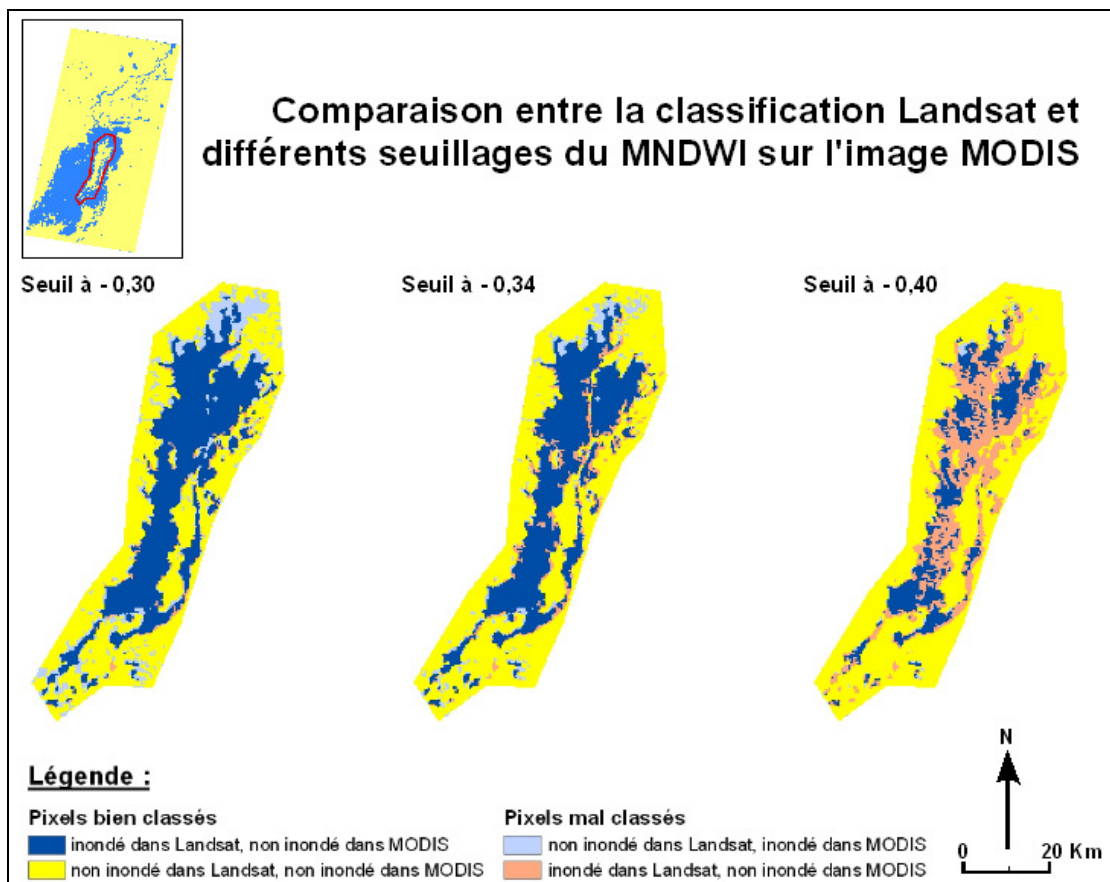


Figure 8 : comparaison entre la classification Landsat et différents seuillages du MNDWI sur l'image MODIS.

Tous les seuils de -0,40 à -0,30 par pas de 0,01 sont effectués sur l'image MODIS. Ensuite, une matrice de confusion est réalisée entre l'image Landsat classifiée et rééchantillonnée et chaque image MODIS seuillée. Puisque le MNDWI est censé faire apparaître les zones inondées, alors le meilleur seuil doit coïncider avec les résultats de la classification Landsat zone inondée-zone non inondée (Tableau 6).

Seuils	Pixels inondés sur les images Landsat et MODIS (en %)	Pixels non inondés sur les images Landsat et MODIS (en %)	Pixels inondés dans Landsat et non inondés dans MODIS (en %)	Pixels non inondés dans Landsat et inondés dans MODIS (en %)	Pixels bien classés (en %)
-0,30	38	46	3	13	84
-0,31	37	48	3	11	86
-0,32	36	50	5	9	86
-0,33	36	50	6	8	86
-0,34	34	53	7	7	86
-0,35	32	54	9	5	86
-0,36	30	55	11	4	85
-0,37	27	56	14	3	83
-0,38	24	57	17	2	81
-0,39	20	57	21	2	77
-0,40	16	58	23	1	74

**Tableau 6 : Récapitulatif des différentes matrices de confusion entre la classification Landsat zone inondée-zone non inondée et différents seuils de MNDWI de l'image MODIS aux 16 et 18 octobre 2001.**

Le fait de ne pas obtenir 100 % de pixels bien classés est à imputer aux erreurs dans la chaîne de traitement : mauvaise classification Landsat, rééchantillonnage Landsat, résolution des images MODIS... Sur tous les seuils effectués, les seuils de MNDWI entre -0,31 et -0,35 ont tous le même pourcentage de corrélation avec l'image Landsat à l'arrondi près: 86 %, le plus élevé. Le seuil optimal est de -0,33 car c'est la médiane. Les seuils compris entre -0,31 et -0,35 donnent des résultats comparables (86%) et très satisfaisants. Cependant, le seuil à -0,34 semble aussi bien fonctionner, car il existe autant de sur-estimations de zones inondées que de sous-estimations. Pour étudier la validité de ces seuils, on conduit la même analyse sur les images de juillet et de novembre. Sur l'image de juillet, le seuil optimal se situe à -0,34 avec un taux de corrélation de 88 % entre l'image Landsat et l'image MODIS, contre 87 % pour les taux de -0,33 et -0,35. Sur l'image de novembre, les meilleurs taux de corrélation sont trouvés pour les seuils de -0,34 et -0,35 avec 79 %, contre 78 % de corrélation pour les seuils -0,33 et -0,36. Après l'analyse de ces résultats, nous avons décidé de garder le seuil -0,34 pour l'ensemble des images. La validité de ce seuil a été vérifiée visuellement sur l'ensemble des images MODIS étudiées, y compris dans la zone des dunes et pour les lacs, dans le delta aval. Dans la littérature, les auteurs (Sakamoto *et al.*, 1997) ne prennent qu'une seule décimale, pourtant les taux de variation entre -0,3 et -0,4 sont assez élevés, il nous apparaît alors nécessaire de considérer la deuxième décimale. En effet, sur toutes les images de la série, des taux de variations ont été calculés entre des seuils de -0,33 et -0,34 ainsi que -0,34 et -0,35. En saison de crue, les taux de variation d'un seuil à l'autre sont de l'ordre de 4 %, mais en période d'étiage, les taux de variation peuvent aller jusque 23 %. Cependant, il serait inutile de rajouter une troisième décimale en raison de l'impossibilité de vérifier la validité et de l'échelle du delta.

L'indice MNDWI est très utile en période des plus hautes eaux. Cependant, lorsque l'eau se retire, elle fait place à une végétation herbacée abondante. Les végétaux peuvent être regroupés en trois grands ensembles : les bourgoutières, les oryzaies et les vétiveraies. Leur répartition dépend de la hauteur maximale de l'eau, de la durée de l'inondation, et de la vitesse de montée et de baisse des eaux. Le Bourgou peut supporter jusqu'à 4 m d'eau et être submergé pendant 6 mois (Quensière *et al.*, 1994). Les pousses aériennes sont utilisées pour le pâturage dans l'eau des premiers troupeaux, puis les tiges immergées sont consommées après exondation. Les oryzaies sont constituées de riz sauvage vivace. Ces formations peuvent supporter jusqu'à 1 m d'eau et l'inondation peut durer quatre mois. Les vétiveraies sont formées essentiellement de vétiver dont le taux de recouvrement des touffes varie entre 50 et 100 %. L'inondation peut durer jusqu'à 2 mois et la hauteur d'eau maximale est comprise entre 0 et 0,6 mètre. Si la montée d'eau est rapide, la touffe de vétivier peut être recouverte et les



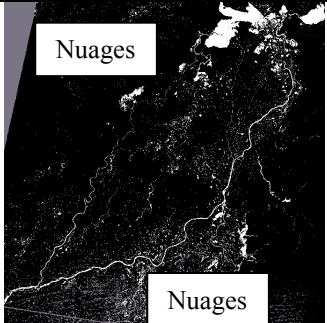
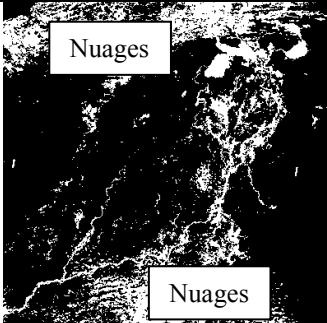
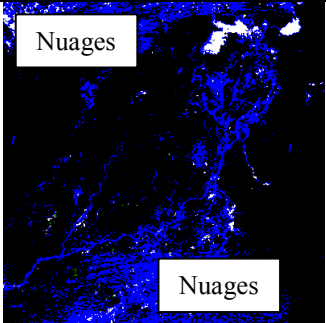
plantes ne se développeront alors qu'à la décrue. Mais si la crue est lente et n'excède pas 30 cm, le vétivier se développe en période de submersion. Enfin, dans tout le delta amont, il ne reste que trois ou quatre forêts inondées à *Acacia kirkii* de quelques dizaines d'hectares, la hauteur d'eau maximale à l'étales dans ces forêts est de 1 m (Quensière *et al.*, 1994).

Le taux de recouvrement de ces différentes espèces, ainsi que le moment auquel ils croissent constituent une difficulté dans la distinction des zones en eau par télédétection. Ici, il se pose la question de savoir si le seul indice MNDWI permet de faire ressortir l'eau et surtout la végétation inondée. Mariko (2003) a fait ressortir la différence entre eau libre et végétation inondée, ce que nous n'avons pas fait. Or, lorsque l'on compare ses résultats à ceux obtenus en utilisant seulement le MNDWI, il en ressort une sous-estimation systématique des surfaces en eau dans notre étude, surtout en période de décrue dans le delta amont, c'est-à-dire à partir de novembre. Dans le détail, ce sont en grande majorité des surfaces de végétation inondée qui sont sous-estimées.

### II.2.3. Utilisation d'un indice complémentaire : le NDMI

Si l'on se base sur les images Landsat et sur d'autres données (Mariko, 2003 ; Marie, 2000), on trouve une sous-estimation des surfaces en eau. Un autre indice pouvant faire ressortir les surfaces manquantes va être utilisé : le NDMI (Normalized Difference Moisture Index) :  $(NIR - MIR)/(NIR + MIR)$ . Cet indice a été identifié ci-avant comme étant un indice pouvant identifier de la végétation mélangée à de l'eau ou de la végétation inondée (Xiao, 2005).

Cet indice a été testé à l'entrée du delta, zone où l'eau se retire en premier, et où la végétation se développe en premier. Il a été testé de la même façon que la méthode citée ci-avant : en utilisant les trois images Landsat comme référence et en effectuant des matrices de confusion. Cependant, comme cet indice ne peut pas faire ressortir à lui-seul la grande majorité des zones inondées, il a été additionné au seuil MNDWI issu précédemment. Ainsi, la combinaison qui fait le mieux ressortir l'eau pour les images journalières est le seuil de MNDWI à -0,34 et le seuil de NDMI à 0,15, la végétation inondée ayant un NDMI supérieur à 0,15. Cet indice ne fait pas ressortir l'eau pure, peu turbide. Avant la crue et en période de crue, le NDMI n'intervient pas beaucoup dans l'identification des surfaces en eau. Cependant, en période de décrue dans la zone amont, il est un vrai complément au MNDWI. Le plus souvent, il indique les mêmes zones en eau que le MNDWI. Cet indice a, par la suite, été testé sur la zone entière. De ces tests, il apparaît que cet indice fait apparaître quelques rizières sur le Fala de Molodo et quelques zones de forêts au sud de la zone au mois d'octobre, mais ces régions se trouvant en dehors de la zone d'expansion des eaux, les pixels correspondant ne seront pas pris en compte dans le calcul. L'indice NDMI et son seuil à 0,15 peuvent alors être utilisés sur toute la série temporelle.

	Images Landsat ré-échantillonnées à 463,3 m (sauf image du 28 juillet)	Combinaison des indices MNDWI et NDMI en niveaux de gris	Combinaison des indices MNDWI et NDMI en couleur
28 juillet 2001			<p>Blanc : contribution des 2 indices                      Bleu : MNDWI seul                      Vert : NDMI seul</p> 


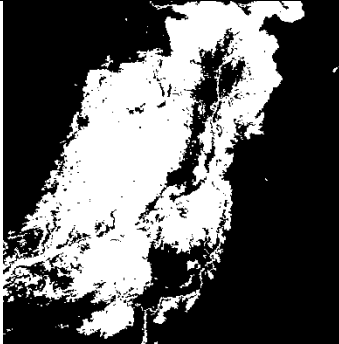
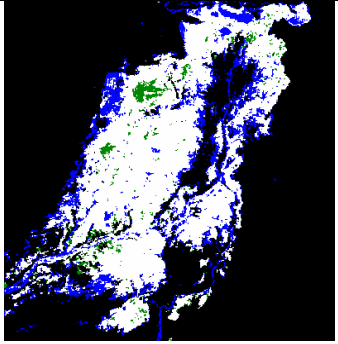
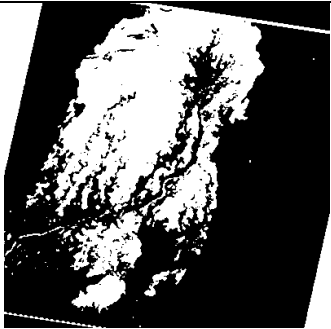
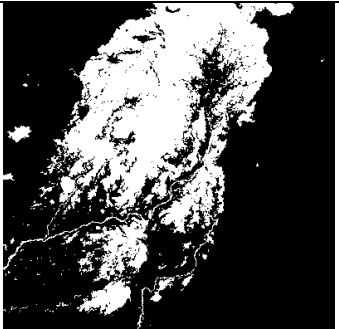
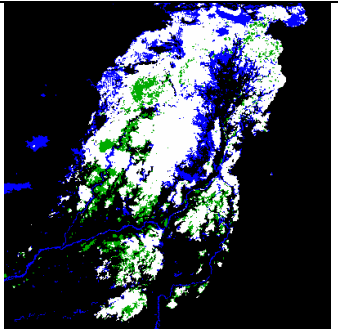
	Images Landsat ré-échantillonnées à 463,3 m (sauf image du 28 juillet)	Combinaison des indices MNDWI et NDMI en niveaux de gris	Combinaison des indices MNDWI et NDMI en couleur Blanc : contribution des 2 indices Bleu : MNDWI seul Vert : NDMI seul
16 et 18 octobre 2001			
17 novembre 2001			

Figure 9 : Comparaison des surfaces en eau entre les images Landsat de référence et la combinaison des indices MNDWI et NDMI seuillés sur les images MODIS

Pour les images journalières, deux indices complémentaires ont été retenus pour identifier les surfaces en eau : le MNDWI et le NDMI. Avec le MNDWI, les pixels en eau sont supérieurs à  $-0,34$  et avec le NDMI, indice secondaire complémentaire, les pixels en eau et avec de la végétation ont un indice supérieur à  $0,15$ . Les mêmes tests sur les images de synthèse à huit jours indiquent que le meilleur seuil pour identifier l'eau avec le MNDWI est de  $-0,36$ . Le seuil du NDMI est identique ( $0,15$ ) aux images journalières. Ces seuils ne varient pas sur toute la série temporelle, que ce soit celle des images journalières ou celle des images de synthèse à 8 jours.

### II.3. Constitution d'un maillage

#### II.3.1. Le modèle hydraulique en casiers

Les images des surfaces en eau sont élaborées à l'échelle du delta, mais la finalité de l'étude est de pouvoir affiner cette échelle. Les études précédentes par télédétection sur le DIN ont permis l'analyse du DIN à une échelle globale, améliorant la connaissance des superficies inondées, sans toutefois analyser les connexions à l'intérieur du DIN (Batti, 2001, Mariko, 2003). D'autres études de télédétection des surfaces en eau dans le DIN ont certes une résolution spatiale plus précise, contribuant ainsi à mieux connaître la dynamique de remplissage des lits (Thomson, 1990) ou encore des mares ou lacs, comme le lac Kabara étudié par Puech et Gadelle (1993), mais ces études ne permettent pas l'étude totale du DIN.

Ici, les images de surface en eau créées ont pour but d'être découpées en d'autres petites images. Parmi les différents maillages testés, pour avoir un premier visuel des surfaces inondées, on a commencé par un maillage régulier de mailles constituées de carrés de 10 pixels de côté chacun, soit 5 km de côté. La taille de 10 pixels sur 10 a été définie comme étant celle qui permet d'avoir des chiffres significatifs en fonction de la résolution du satellite (Puech, communication orale). Pour



définir le contour de la zone à mailler, on a pris en compte tous les pixels ayant été considéré en eau au moins une fois sur la série temporelle.

Par la suite, pour améliorer les résultats, un maillage plus structuré a été élaboré. En effet, les mailles tracées correspondent à des casiers hydrauliques sur le terrain. Le modèle à casiers est un type de modèle hydraulique utilisé lorsque les fleuves débordent de leur lit. On considère alors que le champ d'expansion des crues est composé d'un réseau de casiers qui se remplissent les uns après les autres. Ces casiers peuvent avoir une superficie variable, ils sont délimités le plus souvent par des obstacles physiques existants comme des levées, des coteaux, ... Ce modèle hydraulique calcule pour chaque casier les niveaux et les vitesses de l'eau en faisant une moyenne sur toute la surface du casier. L'évolution de ces données dans le temps permet de connaître le temps de remplissage et de vidange des casiers (SOGREAH, 1985). Pour notre étude, ce modèle hydraulique en casiers permet de tester la dynamique temporelle de la crue à plusieurs échelles. Il permet par ailleurs d'analyser la dynamique de la crue spatialement, en évaluant les connexions des casiers les uns avec les autres.

Les images sont découpées par un réseau de mailles. Ces mailles (ou polygones) peuvent être dessinées à l'aide d'un logiciel SIG ou être créés par un logiciel mailleur (comme le logiciel SMS) en entrant des points définis à l'avance. De nouvelles images, plus petites, sont ainsi créées, correspondant au découpage par les mailles. A l'intérieur de ces images, seuls les pixels définis par le contour de la maille sont pris en compte.

Différents maillages à différentes échelles ont été testés pour évaluer en un premier temps la dynamique, puis, peu à peu les mailles ont été affinées. Nous nous sommes appuyés sur le maillage proposé par SOGREAH (SOGREAH, 1985 ; Six), tout en analysant des cartes et des images satellites de plus grande extension de la crue. Ce maillage a cependant été affiné dans certaines zones. Dans un premier temps, le lit majeur a été tracé linéairement puis élargi par une zone tampon, le lit faisant alors 5 km de largeur. Le lit a ensuite été découpé environ tous les 50 km, tout en essayant d'intégrer une station limnimétrique en son centre. Ensuite, le contour des principaux lacs a été défini. Enfin, le maillage ne devant laisser aucun interstice, les intervalles restant ont été comblés par des mailles de taille variable (en moyenne 500 km<sup>2</sup>) en découpant le DIN en casiers perpendiculaires au cours du lit majeur (Figure 10). Le résultat est un maillage structuré test, il est encore possible de l'améliorer, de l'affiner en fonction des résultats obtenus et en fonction d'autres données (hauteur d'eau, topographie...).

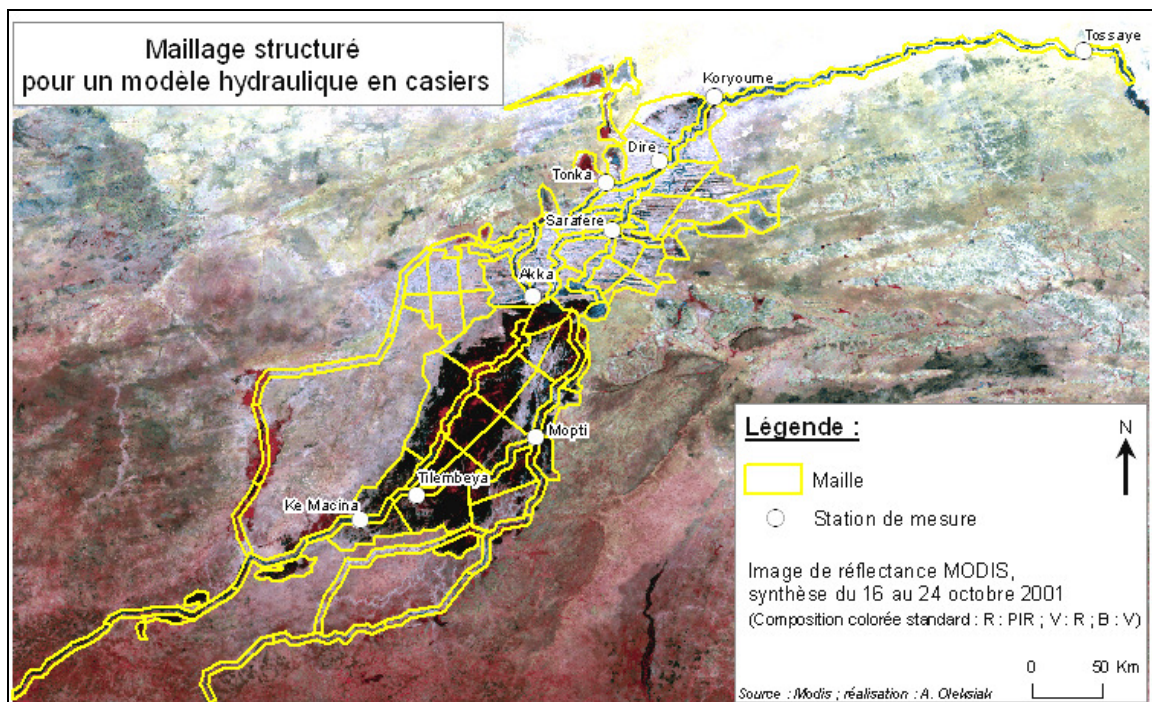


Figure 10 : Maillage structuré sur le delta intérieur du Niger retenu pour l'étude

## II.3.2. Un indice d'agrégation de l'eau par maille

Au sein de chaque maille ainsi définie, il est intéressant de voir si les pixels caractérisant l'eau sont regroupés ou non. Ainsi, on aimerait traduire par un indice la forme des surfaces en eau à l'intérieur d'une maille et évaluer par exemple si ce sont des lacs ou des mares temporaires dispersées.

L'indice d'agrégation ou Aggregation Index (AI) est un indice qui a été mis au point par HE *et al.* (2000) en écologie du paysage afin de mesurer le fractionnement du paysage. L'indice d'agrégation est utilisé pour les images raster, dans lesquels les paysages sont découpés en petites images carrées de plusieurs pixels de côté. L'indice mesure un taux d'agrégation pour chaque classe, représentant un type d'élément constitutif du paysage (bois, champs...), et cet indice pondère la représentation de chaque classe par le nombre de pixels de cette classe. Au final, l'indice mesure le taux d'agrégation total pour une image.

On s'inspire de cet indice pour mesurer le taux d'agrégation de l'eau. Ici, on ne considère que l'agrégation d'une seule classe au sein d'une maille.

Soit  $e_{i,j}$  le total des côtés de la classe  $i$  adjacents à la classe  $j$ . Si l'on considère une seule classe, alors  $e_{i,i}$  représente le total de côtés partagés par la classe  $i$  avec elle-même. Avec l'indice d'agrégation, les côtés communs sont comptés une seule fois, et pour un pixel donné, seuls 4 voisins sont considérés.

Soit  $A_i$  l'aire d'une classe  $i$ , ici, cela correspond au nombre de pixels de la classe  $i$ .

Soit  $n$  l'entier le plus grand obtenu lorsque l'on calcule la racine carré de  $A_i$ ,  $n \leq \sqrt{A_i}$

Soit  $m = A_i - n^2$

Alors, le plus grand nombre de côtés communs pour la classe  $i$ ,  $\max\_e_i$ , donné par la formule de HE *et al.* (2000), est de la forme :  $\max\_e_{i,i} = 2n(n-1) + 2m - 1$

L'indice d'agrégation  $AI_i$  pour la classe  $i$  est calculé comme tel :

$$AI_i = e_{i,i} / \max\_e_{i,i}$$

Etant donné une classe  $i$  d'aire  $A_i$ , le maximum d'agrégation est atteint quand  $A$  est rassemblé en une tache qui a le plus grand  $e_{i,i}$  (sans forcément être un carré).

Le résultat de l'indice d'agrégation est indépendant du nombre de pixels en eau à l'intérieur d'une maille, ses valeurs sont comprises entre 0 et 1. La valeur 1 correspond à un niveau très agrégé, et 0 correspond à un niveau où aucun des pixels en eau est contigu à un autre (Figure 11). Cet indice a été utilisé pour des carrés, cependant, il peut très bien fonctionner pour l'étude présente, car cet indice fait le rapport entre le nombre maximum de côtés communs possibles dans un ensemble de pixels et le nombre de ces pixels. La forme du raster n'est donc pas un élément primordial, excepté lorsque la maille est petite (ce qui n'est pas le cas ici) ou lorsqu'elle est de type linéaire, en raison des effets de bord. L'indice s'avère alors parfois légèrement supérieur à 1, ce qui montre tout de même que tous les pixels de l'ensemble sont contigus. Dans tous les cas, cet indice est un bon indice pour appréhender l'agrégation des pixels en eau au sein d'une maille.

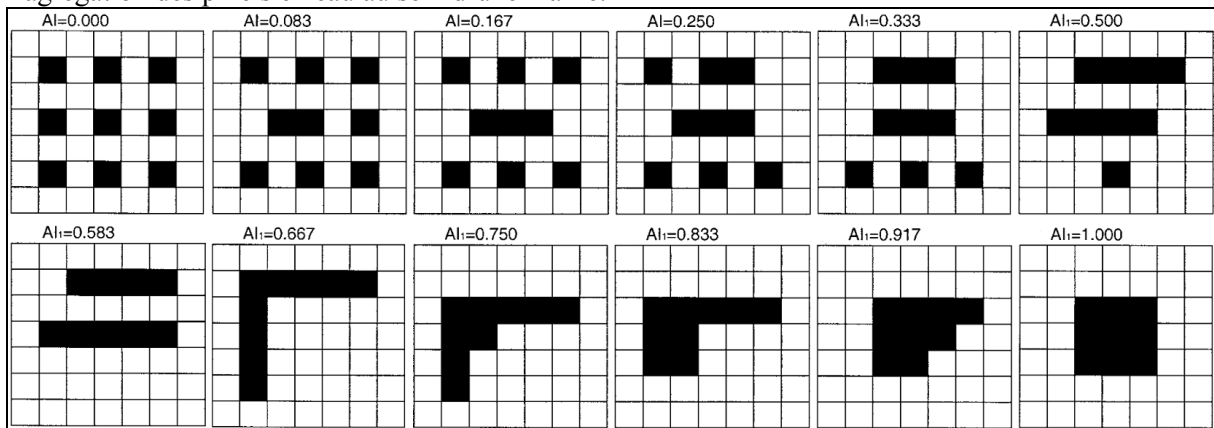


Figure 11 : Illustration de l'indice d'agrégation pour un raster de type binaire, d'après He *et al.*, 2000.

Pour chaque image, il y a 40 pixels blancs et 9 pixels noirs. Les éléments de la classe noire sont de plus en plus agrégés, aboutissant au final à un indice d'agrégation égal à 1.

## II.4. L'automatisation

### II.4.1. La chaîne de traitements générale

Pour faire apparaître l'eau sur toutes les images, il faut créer une chaîne de traitements automatique. Premièrement, l'eau est évaluée sur chaque image grâce à deux indices : le MNDWI et le NDMI. Un pixel est considéré en eau si le taux de MNDWI correspondant est supérieur à un seuil défini à l'avance, ou si le taux de NDMI est supérieur à un certain seuil, ou bien s'il respecte ces deux conditions. L'eau est considérée au sens large : eau pure, turbide, végétation inondée ou mélange d'eau et de végétation dans un pixel. Le résultat est une image codée en binaire (en 1 : l'eau et en 0 : le reste). Ensuite, un maillage est appliqué sur l'image. Le pourcentage de pixels en eau est ainsi calculé pour chaque maille. Dans le même temps, un indice d'agrégation de l'eau par maille est calculé. Ceci est effectué pour toutes les mailles de toute l'image. Le programme passe alors à l'image suivante où les mêmes opérations sont effectuées. Le résultat final consiste en un tableau avec en colonne, les jours correspondant aux dates des images, et en ligne, les mailles. Il y a deux tableaux : un pour les pourcentages d'eau par maille et par jour. Un autre tableau contient l'indice d'agrégation également par maille et par jour. En connaissant la superficie de la maille, la taille du pixel étant connue (463,3 m), il est possible de retrouver la superficie inondée pour une maille ou sur l'image totale.

### II.4.2. La chaîne de traitements sur les images journalières

Les images journalières peuvent contenir un pourcentage de nuages allant jusqu'à 10 %, puisque un premier tri a été effectué au tout début ne gardant que les images ayant moins de 10 % des pixels en nuages. L'automatisation contient un traitement permettant d'appliquer un masque sur les pixels considérés en nuages. Des tests ont été effectués sur la bande qualité de plusieurs images sans nuages. La bande qualité permet de voir, entre autres, si un pixel contient des nuages. Ces tests ont fait apparaître que certains pixels du lit du Niger ont été considérés comme des nuages. Cette bande ne peut pas servir pour notre étude de constitution de masque sur les nuages. Un autre indice basé sur les propriétés de l'eau a été utilisé, comme tel :

$$\text{Masque}_{\text{nuages}} = \frac{\text{BLUE} - \text{GREEN}}{\text{BLUE} + \text{GREEN}}$$

où Blue et Green signifient des bandes du satellite évaluant la réflectance des objets respectivement dans le spectre du bleu et du vert. Cet indice utilise les propriétés de réflectance de l'eau. Les nuages, constitués d'eau, ont une réflectance voisine à celle de l'eau. Cependant, l'eau du Niger étant turbide, sa réflectance est légèrement différente. La réflectance des nuages est plus élevée dans le spectre du bleu ainsi que dans celui du vert, mais légèrement moins. En faisant un ratio de bandes entre les bandes B3 et B4 de MODIS, et en appliquant un seuil à -0,13, les pixels ayant une valeur supérieure sont considérés comme des nuages. Afin de traiter l'ombre des nuages au sol, la méthode automatique la plus simple consiste en une dilatation des pixels considérés en nuage, par une fenêtre glissante de six pixels de côtés (Figure 12).

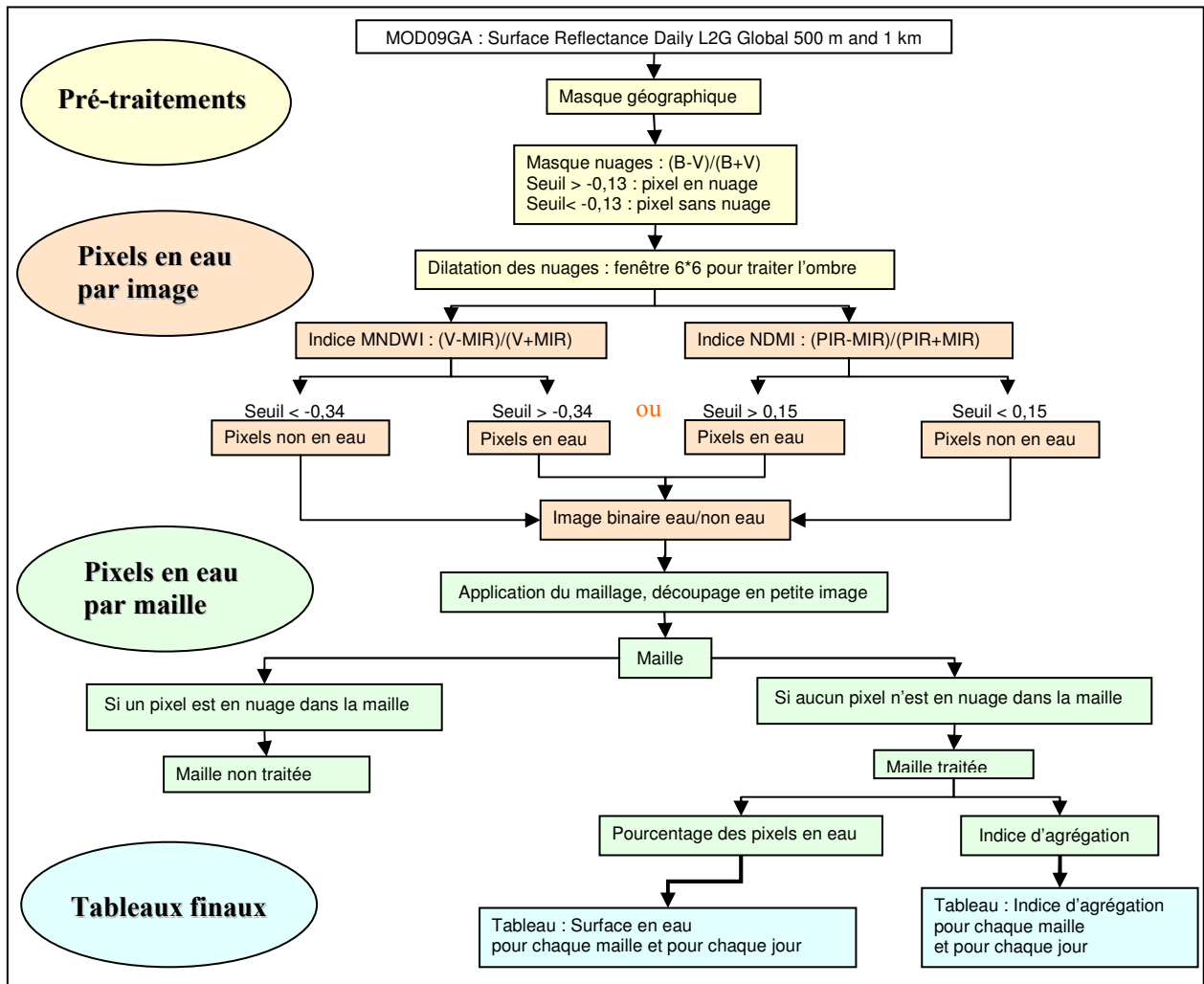


Figure 12 : chaîne de traitements automatique sur les images journalières

#### II.4.3. La chaîne de traitements sur les images de synthèse à huit jours

Pour les images de synthèse à huit jours, il n'est pas nécessaire d'appliquer un masque de nuages, même si dans un premier temps, il est vrai qu'on a gardé des images pouvant contenir jusqu'à 5% de pixels en nuages. Des tests ont montré que très peu d'images atteignaient un tel pourcentage. En effet, en saison sèche, les meilleurs pixels et sans nuages sont choisis parmi les huit jours des images constituant la synthèse. Par ailleurs, même s'il y a un peu de nuages, certes cela augmente la superficie en eau sur une maille, mais cette augmentation temporaire est alors lissée sur l'ensemble de la série.

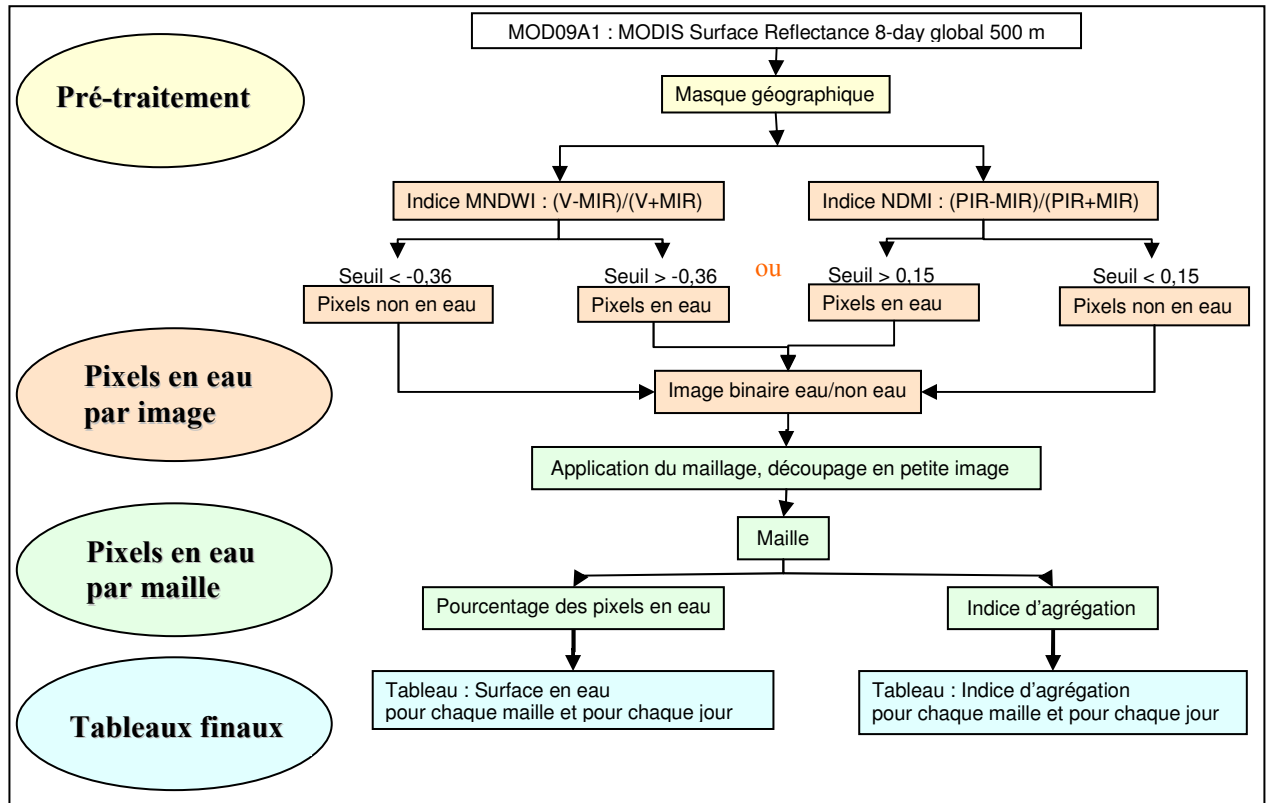


Figure 13 : chaîne de traitements automatique sur les images de synthèse à 8 jours

L'automatisation permet un traitement rapide de la série de données MODIS. Deux indices sont retenus qui permettent d'appliquer un seuil unique sur l'ensemble du delta intérieur du Niger et sur l'ensemble de la série temporelle, après avoir écarté les images posant problème. La méthode retenue permet d'évaluer l'évolution de la surface inondée sur toute la zone. Grâce à la constitution d'un maillage, une analyse à plus grande échelle est possible : l'évolution des pourcentages en eau par maille peut être étudiée, ainsi que les connexions entre les différentes mailles.

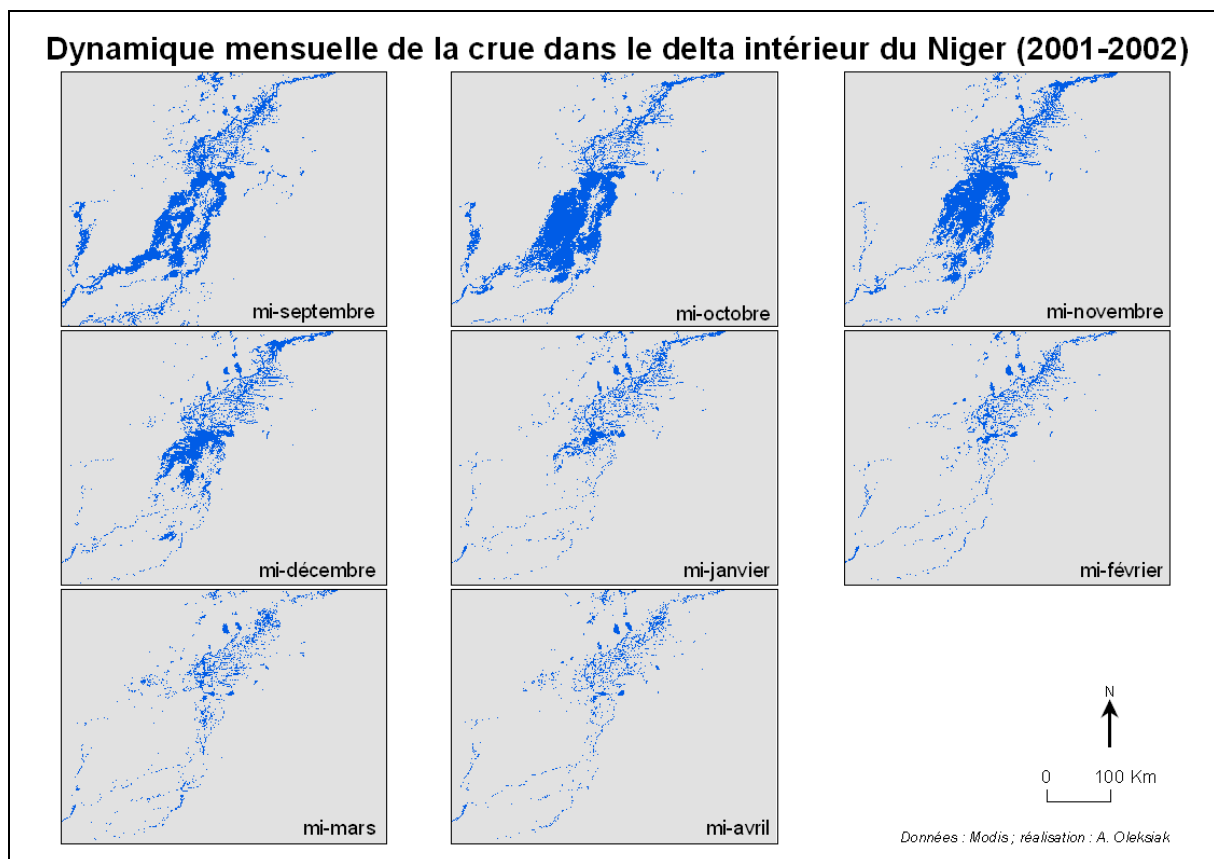
## III. Résultats

L'automatisation des traitements permet d'obtenir un grand nombre de données, exploitables de différentes façons dans l'intégration d'un modèle hydraulique.

### III.1. Dynamique de la crue à l'échelle globale du DIN

#### III.1.1. Dynamique mensuelle de la crue par les images MODIS

Tout d'abord, il est intéressant d'avoir une vision globale de la dynamique du delta. Ceci permet d'avoir un aperçu de l'étalement des eaux à un temps donné et de voir le rythme de montée de crue et de décrue. Ici, l'illustration est donnée à l'aide d'images de synthèse à huit jours. En effet, les images journalières ont une fréquence temporelle trop variable pour illustrer ce fait, comme nous le détaillerons par la suite. Ainsi, une image de synthèse à huit jours datée du milieu de chaque mois a été exploitée de septembre à avril.



**Figure 14 : Dynamique mensuelle de la crue dans le delta intérieur du Niger (2001-2002)**

Cette figure montre qu'au mois de septembre, une grande partie du delta est inondée, essentiellement à l'amont. Au mois d'octobre, le delta connaît un étalement maximal des eaux. Puis, l'eau se retire progressivement de l'amont vers l'aval. La fin de la crue peut être datée de février, puisque durant les mois de mars et avril, les changements sont peu visibles. Ces cartes reflètent bien le régime hydrologique du DIN et sont en accord avec les hydrogrammes de crue des stations étudiées.

On observe également que le type de débordement est sensiblement différent entre la zone amont et la zone aval. L'inondation semble relativement homogène (marais) et compacte à l'amont, alors que l'aval est constitué de petits lacs et de nombreux petits chenaux, produisant une masse d'eau peu compacte.

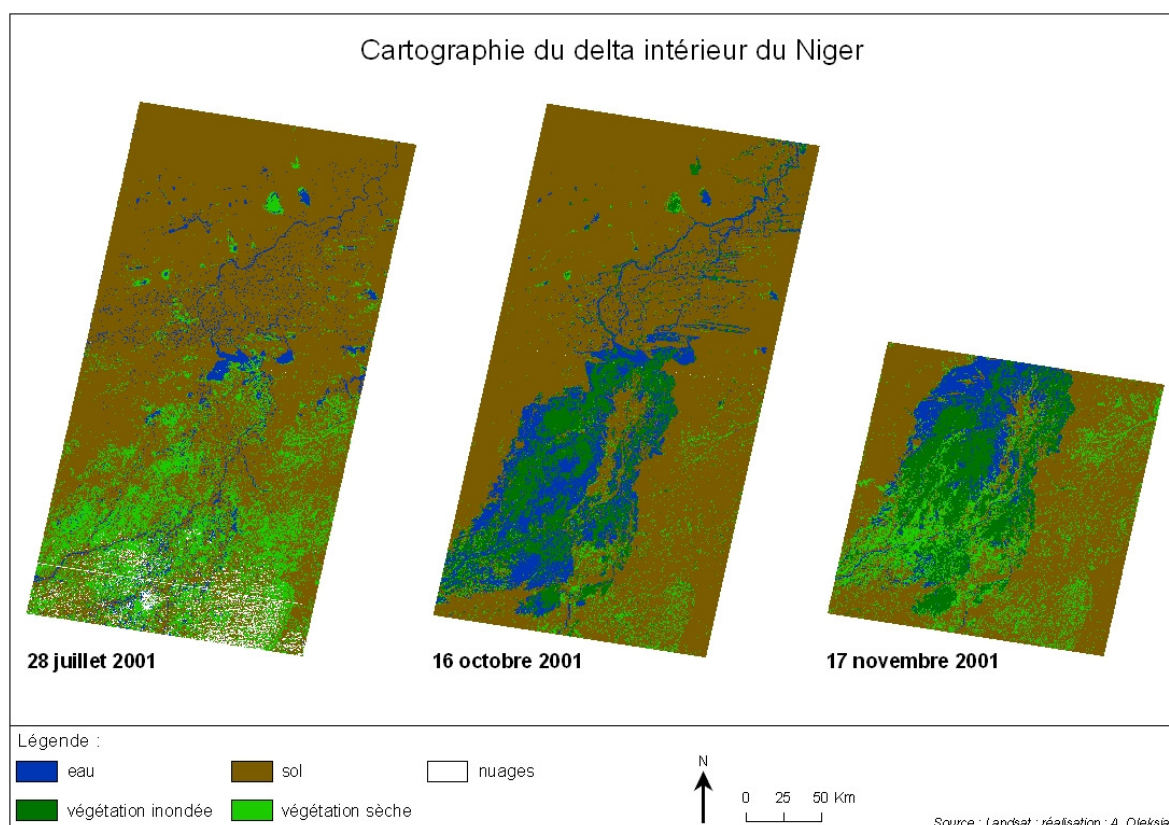


Ces cartes illustrent la dynamique de la crue dans le delta, cependant, elles ne montrent pas la dynamique à une plus grande échelle, dans la zone des dunes par exemple. Des images à meilleure résolution pourraient montrer l'extension de la crue dans les petits bras secondaires.

### III.1.2. Apport des images Landsat sur la dynamique de la crue

Les images Landsat peuvent compléter les images MODIS de deux façons : elles ont une meilleure résolution spatiale et permettent la distinction entre eau seule et végétation inondée ou mélange eau-végétation.

Il est vrai que l'on ne possède que trois dates de prise de vue d'images Landsat (juillet, octobre et novembre). Cependant, en raison de la méthode appliquée au départ pour discriminer l'eau sur ces images, la méthode non supervisée en nuées dynamiques, il est possible de faire la différenciation entre la végétation inondée et l'eau seule, données que les indices utilisés ne font pas apparaître sur les images MODIS. En effet, le MNDWI fait essentiellement ressortir de l'eau et dans une moindre mesure de la végétation inondée, tandis qu'avec le NDMI l'eau pure n'apparaît pas, mais l'eau turbide et surtout la végétation inondée sont très apparentes. Avec la méthode utilisée sur les images Landsat, et grâce à l'analyse des courbes de réflectance par classe résultant de cette méthode, il est possible de faire la distinction entre végétation inondée et eau. Les cartes reclassifiées sont visibles ci-dessous (Figure 15) et en annexe (Annexe 8) pour une meilleure visibilité.

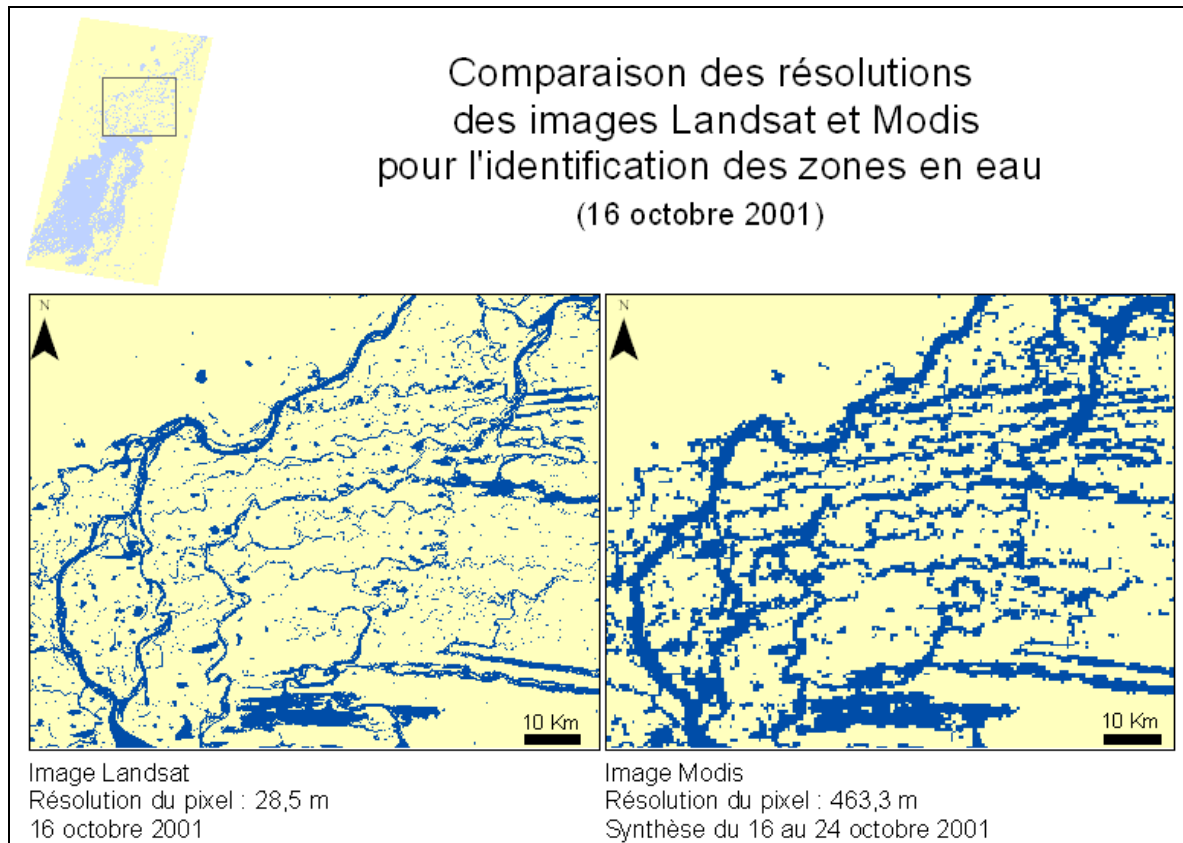


**Figure 15 : Cartographie du delta intérieur du Niger à trois dates différentes à partir d'images Landsat**

Normalement, au mois de juillet, l'eau commence à arriver sur le delta à l'amont, mais ceci n'est pas vraiment visible sur la première carte. Il faut noter que sur cette carte, la méthode de classification par nuées dynamiques, ou la reclassification, ou bien les deux à la fois, ont certainement surestimé la végétation sèche dans le sud du delta, qui doit être sur le terrain un mélange de sol et de buissons épars, ceci explique la différence avec les deux autres cartes. Sur la carte suivante, au mois d'octobre, l'eau couvre entièrement le delta, et une partie de la végétation sèche initialement est inondée

(vétiviers), tandis que des plantes croissent en raison de l'apport d'eau (bourgou). Enfin, au mois de novembre, l'eau se retire, laissant apparaître à nouveau de la végétation exondée.

Par ailleurs, la résolution des images Landsat est environ quinze fois meilleure que celle des images MODIS. Cette qualité permet de faire apparaître des détails non visibles sur les images MODIS, par exemple dans la zone avale : dunes, bras secondaires, mares temporaires (Figure 16). Cependant, la différence de résolution entre ces deux capteurs ne permet pas de comparer les surfaces en eau.



**Figure 16 : Comparaison des résolutions des images Landsat et MODIS pour l'identification des zones en eau**

Sur cette figure, on voit qu'en raison de la résolution du pixel MODIS (463,3 m), certaines petites mares ou cours d'eau n'apparaissent pas. Parfois, au contraire, quelques pixels en eau contigus de MODIS peuvent faire apparaître comme une grande mare, une zone qui, dans la réalité, n'est formée que de petites mares. Les images Landsat permettent donc une meilleure connaissance de la morphologie du delta, en particulier sur les connexions entre les différentes cuvettes par des bras secondaires.

Ainsi, en couplant les images MODIS et Landsat, il est possible de regrouper plusieurs types d'information : dynamique globale de la crue, végétation dans le DIN, morphologie du DIN. Mais, par ailleurs, les images des séries MODIS permettent de voir un autre type d'information : les temps d'inondation.

### III.1.3. Synthèse : carte des temps d'inondation

Si l'on considère la série temporelle MODIS du 14 septembre 2001 au 30 avril 2002, il ne manque que deux images de synthèse, écartées en raison de leur moins bonne qualité de réflectance. Sur ces images de type binaire (1 : pixel inondé, 0 : pixel non inondé), il est possible d'additionner le nombre de fois où un pixel est inondé et en déduire alors un temps d'inondation en périodes de huit jours (Figure 17).



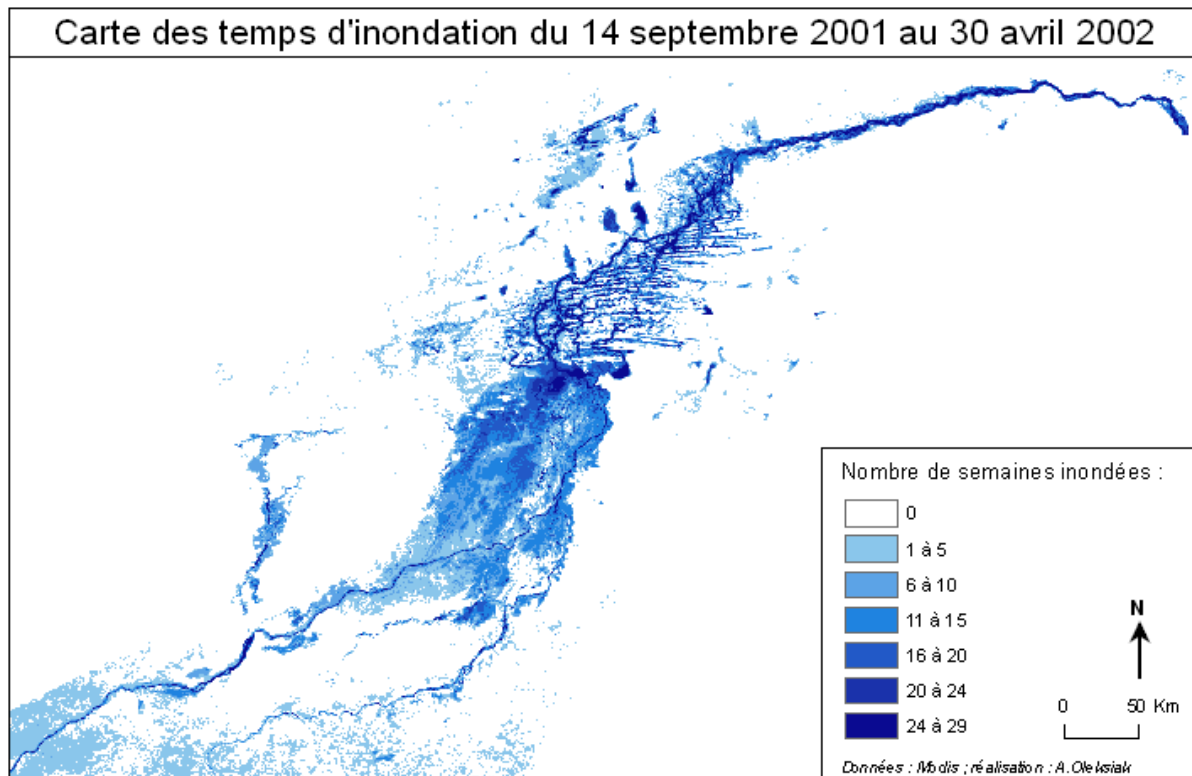


Figure 17 : Carte des temps d'inondation du 14 septembre 2001 au 30 avril 2002

Plus les pixels sont bleus foncés, plus l'eau est présente longtemps. Les lacs et le lit majeur apparaissent inondés sur plus de vingt-quatre semaines, ce qui valide cette approche. Le sud du delta est inondé moins longtemps (moins de cinq semaines), ce qui traduit le fait que l'eau se retire vite dans cette zone. Cette carte peut éventuellement servir à comprendre la morphologie du delta. En effet, indirectement, ces données peuvent traduire la profondeur d'une zone : plus une zone est profonde, plus l'eau stagne, moins les effets de l'infiltration et de l'évaporation sont sensibles. Les données peuvent aussi traduire la présence de seuils, de bourrelets : lorsque l'eau arrive avec l'onde de crue, l'énergie mobilisée est forte, ainsi l'eau de l'onde de crue peut passer par-dessus des seuils. L'énergie de l'eau à la décrue étant moins importante, l'eau stagne. Ces données, pour être validées, ont besoin d'être couplées avec d'autres informations, comme la topographie du delta.

Il est à noter qu'au sud-ouest de la zone de la carte, de nombreux pixels apparaissent comme étant inondés. Ceci est le fait du NDMI qui fait apparaître la végétation inondée ou très humide. En regardant de plus près les images donnant ces résultats, elles sont datées de septembre et octobre. Durant cette période, la CIT (convergence intertropicale), phénomène à l'origine des nuages et de la pluie, se retire lentement vers le sud, arrosant ces zones de forêts. Ceci rend la végétation humide et entraîne une augmentation de l'activité chlorophyllienne. On voit ici les limites de l'indice NDMI. Heureusement, pour notre étude, cette limite ne gêne pas l'interprétation des résultats, les grandes forêts étant exclues de l'intérieur du delta.

Cette approche à l'échelle du delta permet d'avoir un premier aperçu de la dynamique temporelle et de la morphologie du delta. Cependant, la constitution d'un maillage permet d'affiner l'échelle et peut-être alors d'évaluer une dynamique spatiale et des connexions entre les mailles.

## III.2. Analyse de la dynamique temporelle de la crue par maille

### III.2.1. Évolution de la superficie en eau par maille à partir des images journalières et de synthèse à huit jours

L'automatisation des traitements permet au final la constitution d'un tableau de sortie avec le pourcentage en eau pour chaque maille et chaque date (Annexe 10). Donc, pour une maille donnée, en prenant toutes les surfaces en eau sur toutes les images, il est possible de traduire par une courbe l'évolution de la superficie en eau d'une maille au cours du temps. Ceci peut être effectué pour les 98 mailles du maillage structuré créé. Ici, seules quatre mailles représentatives vont être étudiées. La maille n° 7 est située sur le lit majeur amont, avant l'entrée du delta. La maille n° 34 est une maille située au centre du delta amont, à proximité du bras secondaire Diaka. La maille n° 38 correspond au lac Débo, situé entre les deux zones distinctes du DIN, c'est-à-dire entre la zone d'étalement des eaux à l'amont et la zone des dunes à l'aval. Enfin, la maille n° 73 est une maille située au centre de la zone des dunes, dans le delta aval. La localisation précise de ces mailles est visible en annexe (Annexe 11).

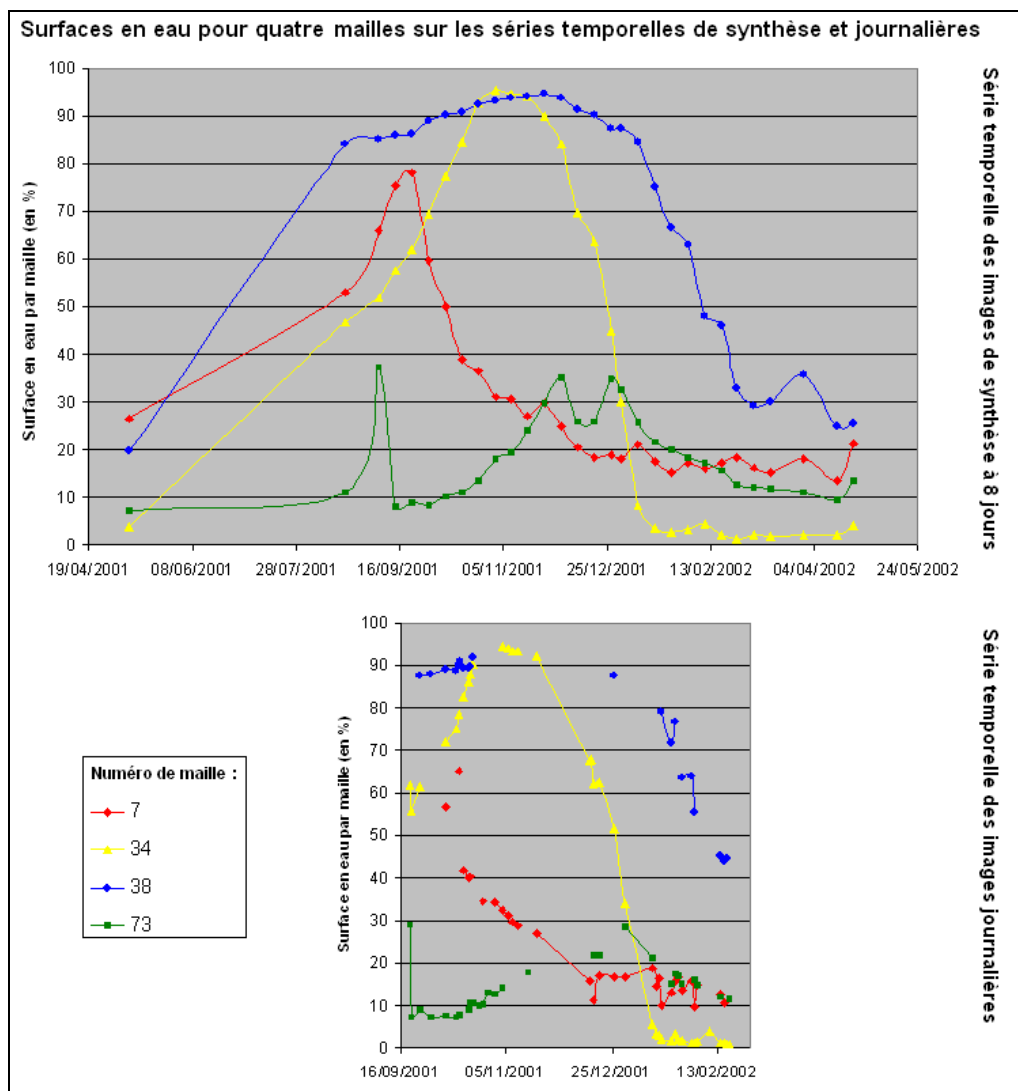


Figure 18 : Surfaces en eau pour quatre mailles sur les séries d'images temporelles et journalières

### III.2.1.1. Comparaison entre les résultats issus des séries des images journalières et de synthèse

Sur le graphique (Figure 5), les résultats montrent l'analyse des surfaces en eau à la fois pour les images journalières et à la fois pour les images de synthèse à huit jours, ceci pour les mêmes mailles. Il est alors possible d'établir une comparaison des résultats observés pour une même maille.

En premier lieu, l'analyse des courbes de surfaces pour la série des images journalières montre un manque important de données. Ceci s'explique par la chaîne de traitement automatique. En effet, s'il y a un seul pixel en nuage dans la maille, alors, la maille n'est pas traitée afin de ne pas fausser les résultats. Au contraire, pour les images de synthèse, sur une période de huit jours, et étant donné le premier tri effectué, il est rare de trouver dans une maille un pixel comportant un nuage sur les huit jours. Il faut, par ailleurs, signaler que dans la série des images journalières, les mailles correspondant aux lacs Oro et Fati, situés à l'ouest de la zone des dunes, mais non traités dans l'exemple, sont considérés comme étant des nuages à partir du mois de décembre. Leur réflectance étant, à partir de cette date, voisine de l'eau pure, elle est alors voisine de celle des nuages. Finalement, les images journalières semblaient présenter un avantage en raison de la très haute fréquence des données et donc la possibilité d'analyser l'évolution quasi-quotidienne des surfaces en eau. Mais, dans les faits, en raison de la présence de nuages, il est rare de trouver, dans la série, des images journalières se succédant, sauf pour quelques périodes : du 12 au 20 octobre 2001, du 16 au 19 février 2002. Néanmoins, ces données restent exploitables, car elles traduisent tout de même la dynamique de la crue et peuvent, en outre, être comparées aux images de synthèse à huit jours pour valider ces dernières.

Maintenant, si l'on compare les surfaces obtenues par les images journalières et par les images de synthèse, alors on voit que les courbes suivent la même évolution. Pour effectuer une comparaison plus précise, on prend comme exemple les chiffres issus des données du mois d'octobre. Il existe une image de synthèse datée du 16 octobre 2001, qui est constituée des meilleurs pixels des images journalières entre le 16 et le 23 octobre 2001. Par ailleurs, on dispose des images journalières du 16, 18, 19, 20 et 23 octobre 2001, sans toutefois posséder des données sur les cinq jours pour les quatre mailles, en raison de nuages. En effectuant la moyenne des surfaces en eau sur ces cinq images journalières, les surfaces en eau par maille obtenues devraient être voisines de celles issues de l'image de synthèse (Tableau 7).

Maille		N° 7	N° 34	N° 38	N° 73
<b>Série d'images Synthèse</b>		38,8 %	84,7 %	90,8 %	11,2 %
<b>Journalières</b>	<b>Moyenne</b>	40,6 %	86,7 %	90,1 %	10,0 %
	<b>Minimum</b>	39,9 %	82,7 %	89,1 %	9,0 %
	<b>Maximum</b>	41,7 %	90,4 %	91,8 %	10,6 %

**Tableau 7 : Surfaces en eau estimées à partir des séries d'images journalières et de synthèse entre le 16 et le 23 octobre 2001**

Les superficies en eau observées entre les images journalières et l'image de synthèse sont assez proches. La superficie en eau résultant de l'image de synthèse est comprise dans l'intervalle des résultats obtenus par les images journalières une fois sur deux, mais n'en est jamais éloigné. Pour expliquer les différences, il faut prendre en compte le manque des données issues des images journalières sur certaines mailles, de plus, les images de synthèse ne sont pas composées de la réflectance moyenne des pixels mais des meilleurs pixels de la série de huit jours. Après avoir analysé les données de toutes les mailles et sur toutes les images, les différences de surface en eau entre les images journalières et de synthèse à huit jours sont rarement importantes, en moyenne entre 0 et 5 points. Enfin, les seuils retenus pour le MNDWI pour les images journalières et les synthèses présentent initialement une différence de 2 centièmes (-0,34 pour les images journalières et -0,36 pour les synthèses). Or, les résultats présentés ici indiquent que, même si le seuil est légèrement plus élevé pour les images journalières, cela n'entraîne pas une sous-estimation des surfaces en eau par rapport aux images de synthèse.

Nous avons vérifié que les résultats issus des images de synthèse et des images journalières étaient concordants. Mais la variabilité de fréquence temporelle des données issues des images journalières ne permet pas l'étude de la crue. En effet, en raison des nuages, il apparaît difficile d'avoir, pour une maille, des données sur plus de trois jours de suite. Certaines mailles présentent même des absences de résultats sur plus de vingt jours de suite. Au regard de ces différents résultats, il apparaît plus judicieux de garder, pour la suite de l'analyse des résultats, uniquement les données issues des images de synthèses à huit jours.

### III.2.1.2. Evolution de la superficie en eau par maille à partir des images de synthèse à huit jours

Avant tout, le type de graphique présenté précédemment (Figure 18) permet d'analyser la dynamique temporelle de la crue. Les quatre mailles présentent différents types de surface de l'amont à l'aval. Ainsi, la maille n° 7 correspond à une zone du lit mineur à l'entrée du delta. Le pic de crue est rapide et est daté de mi-septembre. Sur la maille n° 34, zone au centre du delta amont, le pic de crue arrive un peu plus tard, au début de novembre, et l'onde de crue est plus étalée et ralentie. Au mois de janvier, l'eau s'est presque totalement retirée pour laisser la place à de la végétation. La maille n° 38 correspond au lac Débo, la surface en eau pour cette maille est toujours plus importante au cours de l'année que sur les autres mailles. Le lac est à la fois alimenté par le lit mineur, il est donc rempli dès le début de la crue. Par la suite, le lac reçoit également l'eau par diverses autres connexions au sein du delta. Le lac est donc plus longtemps en eau, ce qui est encore favorisé par sa forme de cuvette. Enfin, la maille n° 73 correspond à une maille située dans la zone des dunes, dans le delta aval. L'onde de crue arrive début décembre, bien plus tard que dans le delta amont. Les surfaces en eau ne sont pas très importantes, car dans cette zone, l'eau ne couvre pas totalement les surfaces, mais le réseau hydrographique est composé de chenaux étroits et de petites mares. Sur cette maille, la forme bimodale de la courbe entre novembre et décembre peut soit correspondre à deux ondes de crues différentes, ce qui est peu probable, soit être le fait d'une mauvaise estimation des surfaces en eau par les images. En effet, dans cette zone, un pixel représentant une mare peu profonde peut ne pas apparaître deux fois de suite sur les images. Au final, les évolutions des surfaces en eau pour ces quatre mailles représentent de façon correcte la dynamique de la crue.

Les premiers résultats issus des images de synthèse et présentés ici montrent que les mailles ont un bon niveau de représentativité de la dynamique de la crue. Sur le modèle en casier constitué, il en existe en tout 98 qui sont autant de données restant à exploiter.

### III.2.2. Analyses hauteur-surface

Un autre moyen de validation est l'étude des correspondances entre surface inondée et hauteur d'eau. Dans un plan d'eau horizontal, de géométrie fixée, la largeur au miroir, et donc, la surface au miroir est directement fonction de la hauteur d'eau.

Par exemple, pour un lit trapézoïdal de largeur au fond  $L_0$ , de pente de berge (fruit)  $f$ , la largeur au miroir  $L(z)$  est donnée par :  
 $L(z) = L_0 + 2f(z - z_0)$  (Figure 19)

Dans ce cas, la relation est linéaire. Dans le cas général, la relation  $L(z)$  peut être donnée par la géométrie du chenal, mesurée à certaines sections par des techniques de nivellement au sol.

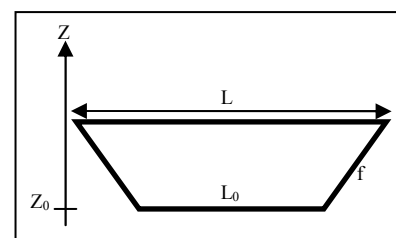


Figure 19 : Relation Hauteur d'eau-Largeur dans un lit trapézoïdal

Cependant, la relation  $L(z)$  peut être différente entre la crue et la décrue. En effet, il peut exister des différences importantes de surface entre la crue et la décrue, liées au remplissage du lit majeur. En effet, au moment de la décrue, l'eau est stockée dans des cuvettes. La hauteur d'eau mesurée dans le lit mineur diminue, mais la surface obtenue sur les images satellites reste importante en raison des débordements de l'eau dans le lit majeur (Figure 20). Peu à peu, l'eau de ces cuvettes est évaporée.

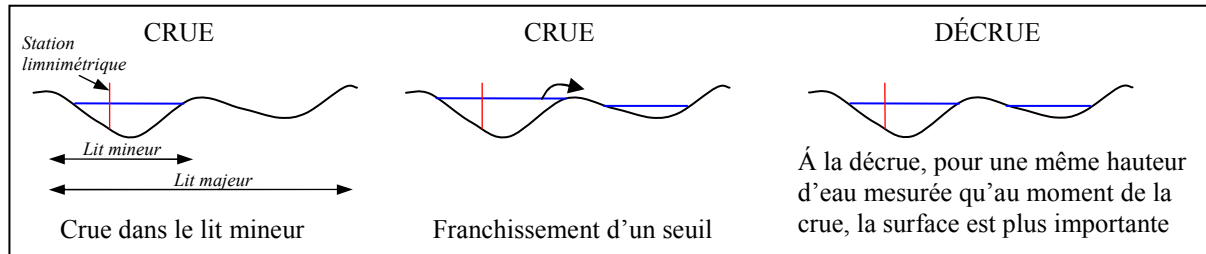


Figure 20 : Illustration du débordement de l'eau dans le lit majeur (effet d'hystérésis)

Au niveau des stations limnimétriques, les hauteurs d'eau sont enregistrées quotidiennement. Ainsi, pour une image de synthèse couvrant huit jours, la moyenne des hauteurs d'eau mesurées correspondant aux huit jours de l'image de synthèse a été calculée. Pour les données de surface, on a pris en compte la maille du lit majeur dans laquelle était située la station. Puis, pour obtenir les superficies en eau en km<sup>2</sup>, les résultats en pourcentage du tableau de sortie ont été multipliés par la superficie réelle de la maille. Les données correspondantes sont datées de fin août 2001 à fin avril 2002, elles couvrent alors une grande partie de la montée de la crue et la totalité de la décrue. Ce type de traitement a été réalisé sur les quelques grandes stations de mesure du DIN. On en présente quatre ici : Ke Macina à l'entrée du DIN, Mopti à la confluence du Bani et du Niger, Dire, dans la zone des dunes du delta aval, et Koryoume, à la sortie du delta (Figure 21).

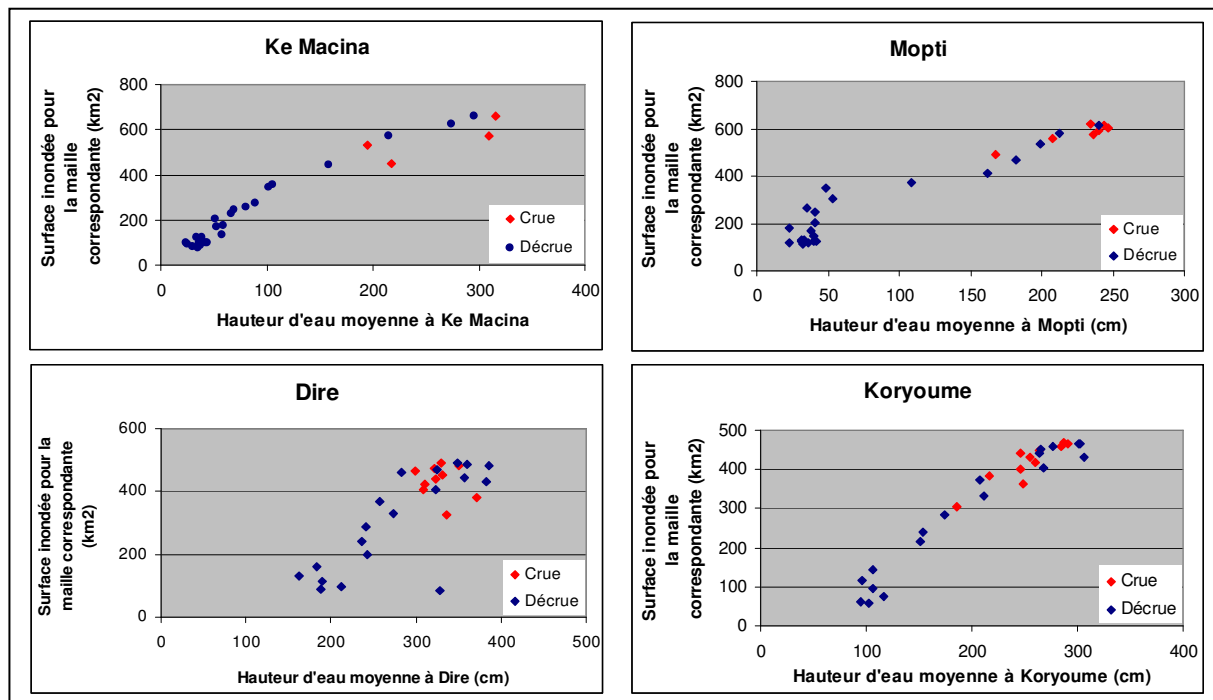


Figure 21 : Courbes hauteur-surface de quatre stations du delta intérieur du Niger

Ces mailles présentent une relation entre la hauteur moyenne mesurée et la surface de la maille en eau. La surface inondée de la maille augmente avec la hauteur d'eau moyenne mesurée à la station. Les superficies mesurées sont fonction de la taille et de la forme de la maille. Par ailleurs, pour les mailles de Dire et Koryoume, certains points mesurés en période de décrue semblent au-dessus des points de mesure de crue. Pour une même hauteur d'eau mesurée, la surface estimée par télédétection est plus

importante en décrue. Ceci pourrait illustrer l'effet d'hystérésis et le piégeage de l'eau dans des cuvettes du lit majeur. Comme nous l'avons montré ci-avant, au moment de la crue, l'eau inonde le lit majeur et reste stockée dans des cuvettes. Cette eau n'est pas mobilisée dans le lit mineur au moment de la décrue. Pour voir si l'eau est stockée dans le lit majeur, on a réalisé des graphiques montrant simultanément l'évolution de la hauteur d'eau mesurée dans les stations et la surface en eau de la maille estimée par télédétection au cours du temps (Figure 22).

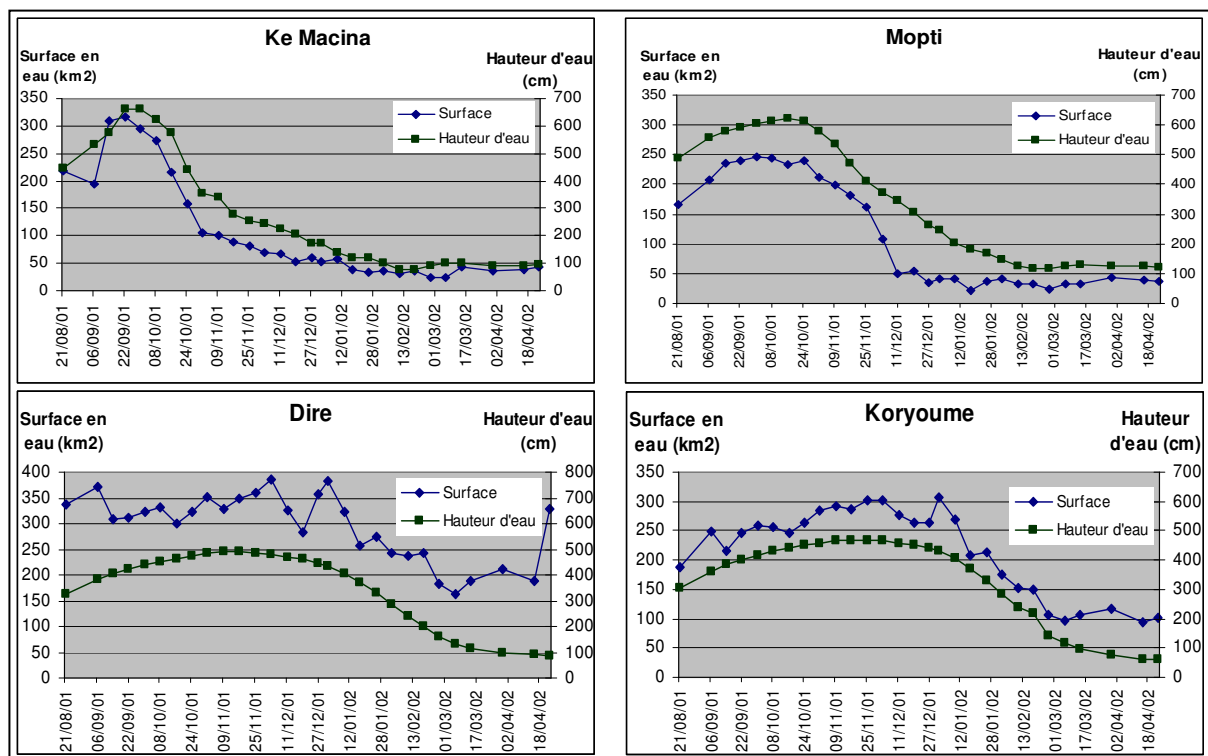


Figure 22 : Comparaison de l'évolution des hauteurs d'eau mesurées et des surfaces d'eau estimées par images satellites pour quatre mailles

De manière générale, les surfaces en eau et les hauteurs d'eau évoluent de la même façon. Cependant, sur les mailles des stations de Dire et de Koryoume, au moment de la décrue, les surfaces diminuent moins rapidement que les hauteurs d'eau mesurées dans le lit mineur. Ces résultats illustrent bien le stockage de l'eau dans le lit majeur pour la maille de Koryoume, mais surtout pour la maille de Dire. Ce phénomène n'est pas visible sur les deux autres mailles de Ke Macina et de Mopti.

Ces deux types de graphiques (Figure 21 et Figure 22) restent intéressants, à la fois pour valider les résultats, mais aussi pour élaborer un modèle hydraulique. Ils permettent de déduire quelle serait, en fonction d'une hauteur d'eau mesurée, la superficie de la maille inondée. Par extension, on peut aussi considérer que le delta entier constitue une seule maille et déduire alors la surface inondée dans le delta en fonction de la hauteur d'eau mesurée dans telle ou telle station.

Etant donné que ces graphiques permettent de mettre en relation une superficie inondée et une hauteur d'eau, il serait intéressant de multiplier les stations de mesure limnimétriques notamment dans le lit majeur. Ceci sera effectué par la suite grâce à des campagnes de terrain. Des stations seront essentiellement posées dans le delta amont. En effet, dans cette zone, les mesures ne sont pas abondantes, en raison du difficile accès à la zone en période de crue. Par ailleurs, une trace du capteur radar Topex-Poséidon passe perpendiculairement à l'écoulement de l'eau dans la zone aval du delta, au niveau des cuvettes et des dunes. Ce capteur est un altimètre, il permet de mesurer l'altitude de la zone en période sèche et en période de crue. Des travaux récents ont permis de quantifier la précision de ces mesures (Bercher *et al.*, 2007). Il est alors possible de déduire la hauteur d'eau en période de crue le long de cette trace.

Les mailles donnent une première estimation de la dynamique de crue à une échelle plus fine qu'à l'échelle globale du DIN. Il serait maintenant intéressant d'analyser les relations entre ces mailles.

### III.3. Analyse de la dynamique spatiale de la crue par maille

Un autre type de données exploitables à partir des résultats issus du traitement des images MODIS de synthèse, consiste à regarder, pour une maille donnée, la date correspondant au maximum de surface inondée. Cela donne non seulement de nouvelles données sur la dynamique temporelle de la crue, mais aussi indirectement sur la dynamique spatiale. En effet, en établissant une carte des dates correspondant aux maximums d'inondation par maille, il est possible de déduire le sens d'écoulement de l'eau. Pour une maille, si l'on a la date du maximum d'inondation, et si l'on regarde les dates des mailles autour de cette première maille, alors on peut en déduire le sens de l'écoulement de l'eau d'une maille à l'autre. Le résultat sur le maillage structuré est le suivant (Figure 23) :

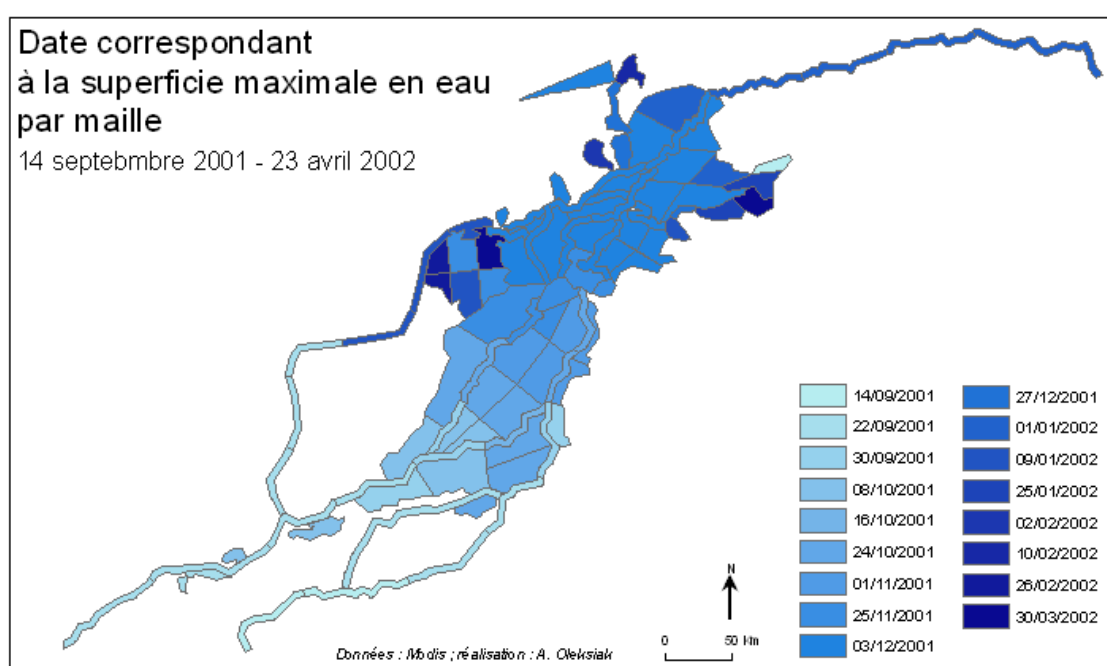


Figure 23 : Date correspondant à la superficie maximale en eau par maille (maillage structuré)

Plus la couleur de la maille est foncée, plus la date de l'inondation maximale par maille est tardive. Ainsi, à l'entrée du delta, le maximum de crue est à la mi-septembre, alors que le maximum d'inondation dans le lit majeur à la sortie du DIN se situe fin décembre. A première vue, la carte présentée ci-dessus illustre bien la dynamique temporelle de la crue. Enfin, il ne faut pas oublier que les dates commencent seulement mi-septembre. À l'entrée du delta, le maximum de crue peut apparaître un peu avant, mais les images précédentes montraient une trop grande surestimation des surfaces en eau sur toute la zone du delta et n'ont pas été traitées dans cette carte. Les dates les plus tardives d'inondation par maille sont relevées sur des mailles situées sur les marges du delta. Cela pourrait alors montrer le cheminement de l'eau au sein du delta. En effet, pour s'étendre sur les bordures du delta, l'eau mettrait plus de temps que pour parcourir le lit mineur, ce qui concorde avec les données issues d'autres études (Batti, 2001 ; Mariko, 2003). Cependant, dans le détail, la date du 30 mars semble avancée pour les zones à l'ouest (mailles n° 55, n° 58 et n° 59 (Annexe 11)). Ces résultats constitueraient-ils du bruit ? Par ailleurs, dans la zone des dunes, la date de maximum de crue est presque la même pour toutes les mailles : fin décembre. Il est possible que la date de maximum de crue soit effectivement identique pour toutes ces mailles, mais on peut aussi se demander si la forme, l'orientation et la taille des mailles ne permettraient pas de faire une distinction précise dans cette zone. Il faudrait alors regarder ces résultats sur un maillage un peu plus serré.



Ainsi, pour tester ces résultats, un maillage régulier constitué de mailles de dix pixels de côté, soit de cent pixels par maille a été réalisé. Pour réaliser ce maillage, une maille a été tracée sur chaque pixel ayant été inondé au moins une fois sur la série temporelle. La zone traitée est donc plus grande que le maillage structuré, car pour ce dernier, les limites du DIN correspondent aux limites habituelles trouvées dans d'autres sources (Mariko, 2003 ; Marie, 2000). Ainsi, pour chaque maille, les surfaces en eau ont été calculées à chaque date. Et donc, il a aussi été possible d'analyser sur la série temporelle et pour chaque maille la date correspondant au maximum d'inondation (Figure 24).

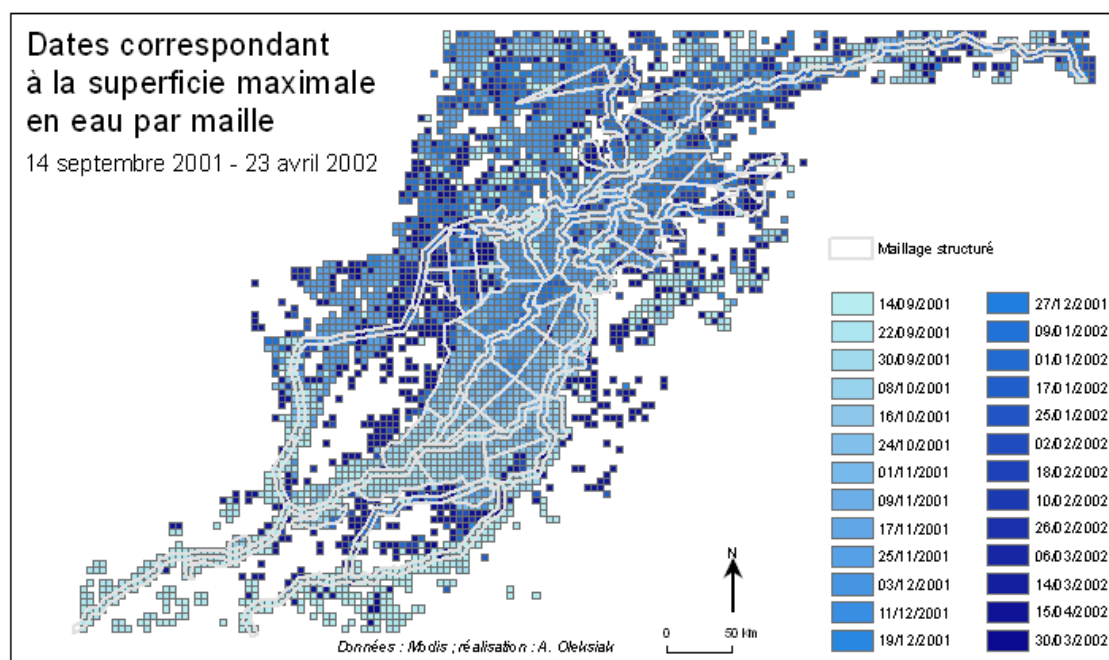


Figure 24 : Date correspondant à la superficie maximale en eau par maille (maillage carré)

La forme du delta est visible sur cette carte, même si dans la partie nord il apparaît plus large. Il est possible de voir que les mailles à l'amont ont un maximum de crue en septembre et les mailles à l'aval sont datées de décembre. Si l'on compare de façon générale ces dates avec les résultats de la carte précédente (Figure 23), on voit que la date la plus tardive est le 15 avril 2002 (contre le 30 mars 2002 sur la carte précédente). De plus, sur le maillage carré, les mailles ayant un maximum d'inondation au mois d'avril sont assez nombreuses, essentiellement en dehors des limites classiques du DIN. On peut se demander alors si ces résultats sont vraisemblables et s'ils ne constituent pas du bruit. En effet, les mailles ne regroupant que 100 pixels, les erreurs peuvent être plus importantes. Dans les zones situées hors du delta, si un ou quelques pixel(s) apparaissent en eau le 15 avril en raison de leurs valeurs de MNDWI ou de NDMI, alors, cette date est retenue comme étant celle du maximum d'inondation. Pour vérifier ces résultats, il faudrait des données de terrain pour voir si ces zones peuvent être en eau, ou voir les réflectances des pixels dans toutes les bandes sur l'image initiale. Les effets de bruit peuvent être illustrés par quelques mailles isolées à l'est du delta amont ayant leur maximum d'inondation en avril. Cependant, en dehors du delta, certaines données semblent plus correctes. Il faudrait notamment voir à l'ouest si les pixels qui rejoignent le Fala de Molodo (bras montant vers le nord avant l'entrée du delta) et les lacs Tanda et Kabara, sont bien des pixels en eau. C'est une zone intéressante à étudier par la suite, car ce bras est rarement mobilisé en entier et les connexions dans cette zone ne sont pas clairement établies. Finalement, en dépit du bruit que peuvent induire les mailles constituées de peu de pixels en eau, cette carte présente des résultats cohérents. Dans le centre du DIN, la dynamique est assez visible. Dans la zone des dunes, notamment, on voit une progression du centre du delta vers les bords, plus nette que sur les grandes mailles du maillage structuré. Le pic de crue entre le lit et les mailles extérieures est de trois semaines environ. Donc, grâce à ce type de carte, il est possible d'avoir une estimation de la dynamique latérale, car on peut voir pour chaque maille, les quatre mailles voisines et les dates correspondantes, et donc une estimation du sens de l'écoulement de l'eau. En dépit du bruit que ce type de maillage peut induire, ce maillage constitue un complément



d'information sur l'autre type de maillage, et notamment des données complémentaires en dehors du tracé initial du DIN.

Le fait d'établir des cartes avec les dates correspondant aux maximums d'inondation par maille permet d'apporter une information complémentaire sur la crue. Initialement, on aurait voulu voir les relations entre les mailles et déduire le sens de remplissage des casiers grâce à cette donnée. Sur le maillage structuré, même si les résultats sont cohérents, ils ne sont pas assez précis à cause de la trop grande taille des mailles. S'ajoute à cette contrainte, la temporalité des images, en effet, la fréquence de huit jours limite la précision sur la date. Cependant, grâce au maillage régulier constitué de carrés, il a été montré qu'un maillage plus fin pouvait apporter une précision sur la date de maximum de crue. Même si le maillage régulier de carrés semble apporter cette précision, il est tracé sans prise en compte de la morphologie du DIN. Pour améliorer les résultats obtenus ici, il faudrait, à partir du maillage structuré, redéfinir des zones plus petites, et mieux tracer les chenaux, si la résolution des images MODIS le permet.

### III.4. Évaluation de la forme des surfaces en eau par l'indice d'agrégation

Pour évaluer la forme des surfaces en eau au sein du DIN, un indice d'agrégation est calculé pour chaque maille et pour chaque image. Les résultats sont compris entre 0 et 1. Une valeur proche de 0 indique qu'au sein d'une maille, les pixels en eau ne sont pas contigus. Une valeur proche de 1 indique au contraire que les pixels sont très agrégés. Cet indice est indépendant du nombre de pixels en eau à l'intérieur d'une maille (Chapitre II.3.2.). Nous illustrons ces résultats par quatre cartes à des dates différentes qui montrent l'évolution de l'indice par maille (Figure 25). Ces cartes visent à donner un aperçu de l'indice, cependant, il existe pour chaque maille et chaque date un indice d'agrégation. Par ailleurs, l'amplitude des classes (0,20), assez grande, peut masquer les variations d'une date à l'autre pour une même maille.

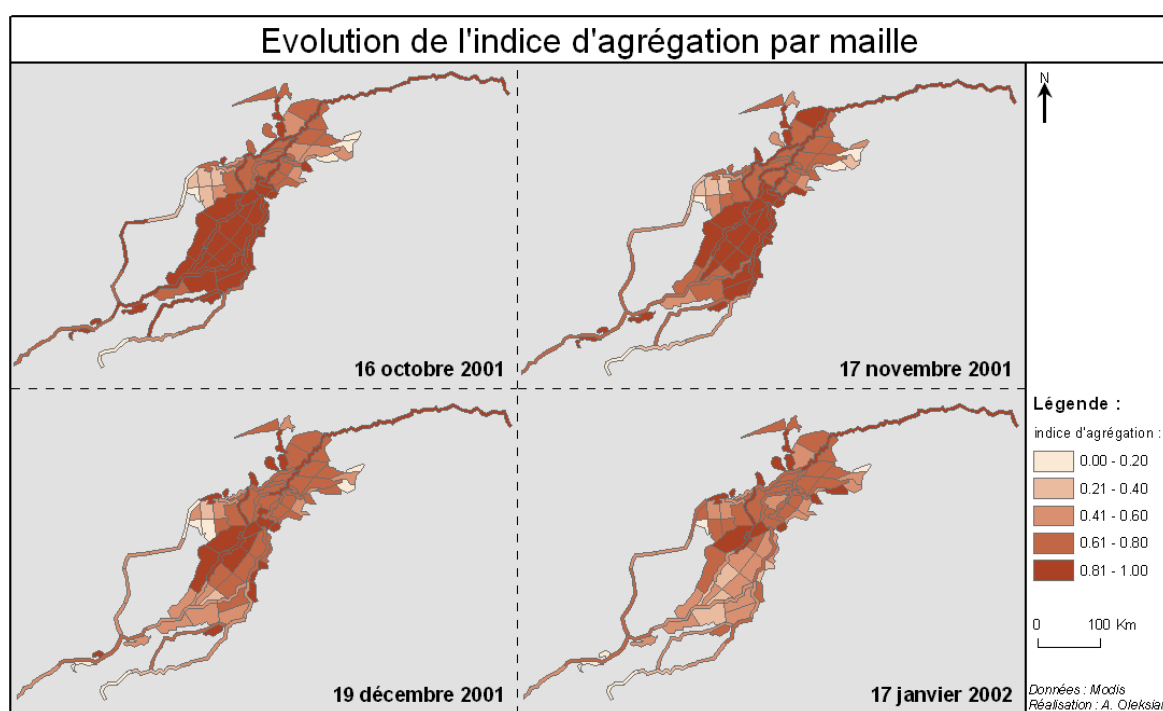


Figure 25 : Evolution de l'indice d'agrégation par maille

Si l'on prend l'exemple du 16 octobre 2001, date de maximum de crue dans le delta amont, alors on voit que les mailles à l'amont ont un indice d'agrégation élevé (entre 0,81 et 1). Ceci est dû au fait que

ces mailles sont uniformément recouvertes d'eau. Au contraire, dans le delta aval, les mailles ont un indice d'agrégation moins élevé (entre 0,41 et 0,8), ce qui traduit la non contiguïté des pixels en eau, ces mailles regroupent, en effet, des petites mares temporaires. Si l'on regarde maintenant l'évolution de l'indice au cours du temps, on voit qu'il diminue dans le delta amont, ce qui traduit le lent recul de l'eau, qui se retire en laissant des mares, les pixels compris dans ces mailles sont alors dispersés. A l'inverse, dans la zone des dunes, les surfaces varient, mais l'indice d'agrégation ne varie pas. Pour le lac Débo, situé au centre du delta, la superficie inondée varie également, et son indice d'agrégation reste élevé au cours du temps, ce qui traduit bien le fait que la surface en eau à l'intérieur de la maille est composée d'une entité quasi unique.

Cet indice, couplé avec les superficies en eau, donne bien pour chaque maille, une idée de la forme et de la dispersion des surfaces en eau.

### III.5. Conclusions sur la dynamique de la crue

À partir des résultats montrés ci-avant, il en ressort que la dynamique de la crue est bien traduite par rapport aux données des hydrogrammes de crue, mais cette fois avec une représentation spatiale.

On peut étudier la superficie totale inondée dans le delta au cours l'année hydrologique 2001-2002 (Figure 26), ceci donne un résumé sur la dynamique temporelle de la crue.

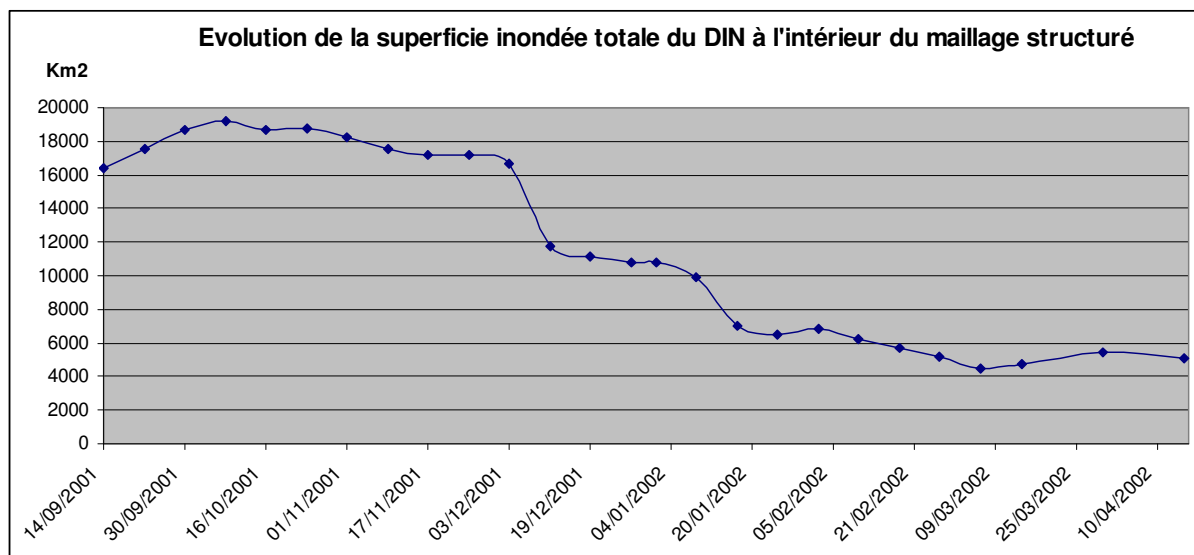


Figure 26 : Évolution de la superficie inondée totale du DIN à l'intérieur du maillage structuré

Le maximum est atteint le 8 octobre 2001 avec 19 000 km<sup>2</sup> environ. Mariko (2003) trouvait pour la totalité des superficies inondées pour l'année 1999/2000 22 000 km<sup>2</sup>. Ces valeurs sont comparables : l'ordre de grandeur est presque le même. La différence peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, l'année hydrologique 2001/2002 est une année où les volumes diminuent fortement entre les stations de Ke Macina (35 milliards m<sup>3</sup>) et Mopti (28 milliards m<sup>3</sup>) par rapport aux autres années. Deuxièmement, le résultat obtenu par Mariko correspond à la totalité des surfaces inondées au moins une fois, or, en octobre, le delta aval n'est pas encore entièrement inondé. De façon générale, la forme de la courbe traduit bien une montée des eaux en septembre, un maximum en octobre, puis une lente diminution de l'eau à partir de novembre.

La crue est ralentie dans le delta. En effet, il y a un retard de deux mois et demi entre l'entrée et la sortie du DIN. La maille correspondant à la station de Ke Macina connaît son maximum d'inondation la semaine du 22 septembre 2001, ce qui coïncide avec le maximum de hauteur d'eau mesuré à la station, tandis que le maximum de surface en eau pour la maille de Koryoume, à la sortie du delta, est

daté de la semaine 3 décembre 2001, par contre, le maximum de hauteur d'eau mesuré à la station est daté du 25 novembre 2001.

Les résultats présentés auparavant permettent aussi d'analyser la dynamique spatiale de la crue. Au sein du DIN, l'écoulement ne se fait pas de manière uniforme et linéaire. D'après les premiers résultats engendrés par l'étude, il semblerait que dans le delta amont, l'eau n'emprunte pas des chenaux mais s'écoule en grande nappe. Le maillage carré superposé au maillage structuré permet d'identifier quelques dynamiques. En effet, les dates de maximum de crue sont atteintes en même temps : le 30 septembre 2001. L'eau se retire aussi assez vite. Plus à l'aval, mais toujours avant le lac Débo, l'eau semble stagner plus longtemps. Les maximums d'inondation peuvent varier d'un mois entre début novembre et début décembre, mais toujours dans le même temps que le lit mineur. Après le lac Débo, dans le delta aval, et plus précisément après la station de Sarafere, il est possible d'observer une légère dynamique latérale. La propagation de la crue dans cette zone est visible à l'est des chenaux principaux orienté sud-nord. À proximité du lit principal, le maximum d'inondation est daté de début décembre, plus à l'est encore, les maximums pour chaque maille sont datés de mi-décembre, puis de début janvier. Ceci n'est visible que dans la zone des dunes. La propagation de la crue n'est pas clairement établie à l'ouest dans la zone des lacs (Oro, Fati, Télé). Il faut signaler que l'entrée de l'eau pour ces lacs est contrôlée par un réseau de barrages et de digues.

On peut noter une autre différence entre la zone amont et l'aval. En effet, les surfaces en eau des mailles à l'amont connaissent une très nette augmentation, compris entre 80 et 100 % de surface en eau pendant la crue, et ayant moins de 1 % de surface inondée en période d'étiage (mailles n° 29, n° 30, n° 31, n° 32 (Annexe 11)). Au contraire, dans la zone des dunes, l'augmentation de la surface en eau est moins importante, en période d'étiage, les mailles peuvent contenir 10 % à 20 % d'eau, et en période de crue la surface en eau peut atteindre jusqu'à 50 % d'eau (mailles n° 73 et n° 74). Cette différence est traduite par l'indice d'agrégation. Lorsque, dans le delta amont, la superficie est maximale, l'indice d'agrégation est très élevé, (entre 0,9 et 1) confirmant le fait que l'eau est constituée d'une seule entité, puis il diminue en période de décrue, entre 0,3 et 0,5 (mailles n° 29, n° 30, n° 31, n° 32). A l'inverse, dans la zone des dunes, l'indice d'agrégation varie peu, entre 0,5 et 0,8 en moyenne (mailles n° 73 et n° 74). Dans ces mailles, l'eau n'est donc pas constituée d'une seule entité, mais d'un grand nombre de mares.

Les premiers résultats obtenus grâce aux différents traitements d'images sont assez concluants. Ils sont en accord avec les données mesurées par les stations, mais apportent en plus des précisions sur l'extension spatiale de la crue et sur la dynamique temporelle. Ces résultats montrent par ailleurs qu'il faudra modifier le maillage, l'affiner, surtout dans la zone aval, en fonction de la morphologie de la zone. Il faudra donc des données complémentaires à la fois pour affiner le maillage, mais aussi pour les confronter avec les données issues des images satellites, ceci pour améliorer le modèle hydraulique de la zone.

## Conclusion

Pour conclure cette étude, nous allons revenir sur les apports de la méthode retenue, mais aussi sur ses limites, et enfin sur les perspectives possibles à l'issue de cette étude.

L'objectif de ce stage était en premier lieu de déterminer une méthode semi-automatique de détection et de suivi des surfaces en eau dans le delta intérieur du Niger. Ainsi, une méthodologie de traitement d'images a été mise au point. Elle est basée sur la combinaison de deux indices normalisés (le MNDWI et le NDMI) qui permettent de détecter tout type de surface en eau, qu'elle soit pure, turbide ou mélangée à de la végétation. Un seuil unique pour toute la série temporelle des images MODIS est appliqué sur chacun de ces indices. Ainsi, il est possible de traiter l'ensemble du DIN en une seule fois, sans distinction à effectuer entre le delta amont et le delta aval. L'intérêt de rendre l'extraction des surfaces en eau automatique réside en l'obtention rapide de nouveaux résultats à partir d'autres sources de données en entrée : nouveau maillage, nouvelle année hydrologique. Le potentiel des images Landsat, des images de réflectance MODIS journalières et de synthèse à huit jours a été évalué. Les images Landsat apportent des précisions sur la morphologie des chenaux et des cuvettes. Grâce aux images MODIS, des précisions sont apportées sur les superficies inondées au cours du temps et sur les connexions entre les cuvettes par l'intermédiaire des mailles. Au final, la méthode retenue pour évaluer les surfaces en eau du DIN, seuil sur deux indices sur les images de réflectance MODIS de synthèse à huit jours, permet de produire des données qui seront intégrées dans un modèle hydraulique de propagation de crue.

Cependant, cette méthode possède quelques limites. Premièrement, il est à noter qu'il manque quelques données afin d'avoir une vue globale de la crue. En effet, les images retenues ne commencent qu'à partir de fin août. Il aurait été préférable d'analyser les images à partir de juillet pour avoir des données sur la montée de la crue. Ces images existent, mais elles n'ont pas été retenues ici pour l'extraction automatique de données en raison des problèmes de correction qu'elles posaient. Il serait peut-être possible de trouver une méthode permettant une meilleure correction de la réflectance et permettant alors d'appliquer un seuil unique sur la série entière pour les indices retenus. Par ailleurs, le seuil des indices a été évalué à partir d'images Landsat, constituées comme référence. Il serait intéressant de vérifier à l'aide de mesures de terrain si les seuils appliqués sont exacts. L'indice NDMI en particulier a posé un problème, la différence entre végétation inondée et végétation très humide étant difficile à effectuer à partir d'images satellites à 500 m de résolution. Des relevés de terrain fin octobre ou début novembre à l'entrée du delta, au moment du retrait de l'eau ou encore au nord-ouest du delta amont dans la région de Toguéré-Koumé permettraient d'avoir des données sur le type de végétation et la superficie en eau. En outre, le postulat de départ ne fait pas la différence entre végétation inondée et eau libre, or ceci pourrait être un paramètre à prendre en compte dans l'élaboration d'un modèle hydraulique. De plus, il faut garder en mémoire que les surfaces calculées en km<sup>2</sup> ne sont pas forcément exactes. En raison de la résolution de l'image et de la superficie du pixel, la superficie calculée peut comporter des erreurs. Enfin, le maillage structuré, ayant servi de base pour l'étude, même s'il donne un premier aperçu de la dynamique n'est pas tout à fait en accord avec la réalité du terrain. Par exemple, le Fala de Molodo est tracé comme un chenal, or, la zone inondée est plus large. De même, dans le delta aval, les mailles définissant les zones autour des lacs Fati et Oro pourraient être affinées et les mailles dans la zone des dunes ne sont pas assez fines. Le maillage peut donc être amélioré.

Grâce à cette étude, la dynamique temporelle de chaque zone est mieux connue : arrivée de la crue, stagnation, puis retrait de l'eau. Par ailleurs, des données sur la topographie vont venir compléter l'étude. Il serait ainsi possible, à partir de relevés de terrain topographiques très précis (de l'ordre du centimètre) effectués dans les années 1970, d'aider à la réalisation d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain). Ceci permettrait de déduire un sens de l'écoulement de l'eau. De plus, de nouvelles stations

limnimétriques ont été posées ou le seront avant la crue 2008/2009. Les hauteurs d'eau mesurées, confrontées avec les superficies évaluées par images satellites, permettront de calculer des volumes, mais aussi de calibrer des courbes hauteur-surfaces, à intégrer dans le modèle hydraulique en casiers. Enfin, puisque l'automatisation permet de calculer les superficies en eau par maille sur des images MODIS, il serait intéressant d'effectuer les traitements sur l'année 2003/2004, année où les volumes annuels mesurés aux stations ont été importants ou bien sur des années de plus faible hydraulicité (2002/2003).

# Bibliographie

## Ouvrages et articles :

- BATTI A., 2001. *Etude spatio-temporelle par télédétection du cycle crue-décrue dans le delta central du fleuve du Niger (Mali) : Méthode des ondelettes*. Thèse, Strasbourg, Université Louis Pasteur, 165 p.
- BERCHER N., KOSUTH P., MERCIER F. et FRONTERA V., 2007. "Statistical analysis of the accuracy of Satellite radar altimetry over rivers: Comparison of retracking algorithms". *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 11639, EGU 2007.
- BRL, 2007. *Élaboration du plan d'action de développement durable du bassin du Niger. Bilan, diagnostic, schéma directeur d'aménagement et de gestion*. ABN, Niamey. 418p+332p.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.-P. et 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. + 521 p. + 1674 p.
- GAO B.-C., 1996. "NDWI - A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space". *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, p. 257-266.
- HE H.S., DEZONIA B.E. et MLADENOFF D.J., 2000. "An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes". *Landscape Ecology*, vol. 15, n°7, p. 591-601.
- HOULES M., 2006a. *Indicateurs spatiaux et temporels pour l'identification du domaine cultivé en milieu soudano-sahélien*. Rapport de stage, Université Toulouse le Mirail, 76 p.
- HOULES M., 2006b. *Note sur le téléchargement et l'utilisation d'images basses résolution gratuites : MODIS/Terra et Spot Végétation*. Cahier Annexe A, Université Toulouse le Mirail, 26 p. <http://www.teledetection.fr/>
- LACAUX J.-P., TOURRE Y.M., VIGNOLLES C., NDIONE J.-A., et LAFAYE M., 2006. "Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing : application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal". *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, n° 1, p. 66-74.
- MAHÉ G., BAMBA F., ORANGE D., FOFANA L., KUPER M., MARIEU B., SOUMAGEL A. et CISSÉ N., 2002. « Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali) ». In *Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales*, D. Orange éd., IRD, p. 179-195.
- MARIE J., 2000. *Hommes, milieux, enjeux spatiaux et fonciers dans le delta intérieur du Niger (Mali)*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Département de géographie, Université de Paris X-Nanterre, 291 p.
- MARIKO A., 2003. Caractérisation et suivi de la dynamique de l'inondation et du couvert végétal dans le Delta intérieur du Niger (Mali) par télédétection. Thèse, Montpellier, Université Montpellier II, IRD, 318 p.
- MCFEETERS S.K., 1996. "The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n° 7, p.1425-1432.
- MORLEY J.G., MULLER J.-P. et MADDEN S., 1996. "Wetland monitoring in Mali using SAR interferometry". European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, n° 406, Mars 1997, p. 151-166.

- OLIVRY J.-C., 1999. « Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur ». In J.-C. Olivry and J. Boulègue, Editors, *Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone, Actes du Colloque PEGI, 22-24 novembre 1993*, Insu-CNRS-Orstom, Orstom (1995), p. 267-280.
- PUECH C., 1993. « Plans d'eau sahéliens et imagerie Spot : inventaire et évaluation des capacités d'exploitation ». *Bulletin de liaison du CIEH*, n° 91, 14 p.
- PUECH C., 1995. « Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télédétection satellitaire ». In *9ème conférence régionale afro-asiatique de la CIID*, Alger, 7 p.
- PUECH C., 2000. *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*. Mémoire pour l'habilitation à diriger des recherches, Montpellier, 83 p.
- PUECH C. et GADELLE F., 1993. « Cartographie à l'aide de l'imagerie satellitaire des cultures de décrue au Sahel, exemple du lac Kabara au Mali ». *Bulletin de liaison du CIEH*, n° 93, p. 34-46.
- QUENSIÈRE J., OLIVRY J.-C., PONCET Y. et WUILLOT J., 1994. *La pêche dans le delta central du Niger*, chapitre 1.1 : « Environnement deltaïque ». In *La pêche dans le delta central du Niger*, J. Quensièrre Ed., IER, IRD, KARTHALA, vol. 1. p 29-80.
- REINART A. et REINHOLD M., 2008. "Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data". *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n° 2, p. 603-611.
- SAKAMOTO T., NGUYEN N. V. et KOTERA A., 2007. "Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery". *Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n° 3, p. 295-313.
- SENTLINGER G.I., HOOK S.J. et LAVAL B., 2008. "Sub-pixel water temperature estimation from thermal-infrared imagery using vectorized lake features". *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n° 4, p. 1678-1888.
- SIX, Q. *Expertise du modèle CARIMA du fleuve Niger*. Rapport de stage, 43 p.
- SOGREAH, 1985. *Modèle mathématique du fleuve Niger*. Rapport SOGREAH.
- SONG C., WOODCOCK C.E., SETO K.C., LENNEY M.P. et MACOMBER S.A., 2001. "Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?". *Remote sensing of environment*, vol. 75, n° 2, p. 230-244.
- THOMSON K.P.B., GILBERT P., SAMAKÉ S. et JATON A., 1990. « Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydro-agricole ». In *Télédétection et sécheresse*, A.-U.J.L.E.P. ed., p. 273-281.
- VAN DE GIESEN N., 2001. "Characterization of west African shallow flood plains with L- and C-band radar". In *Remote Sensing and Hydrology 2000*, Santa Fe, New Mexico, IAHS Publication, vol. 267, p. 365-367.
- VERDIN J.-P., 1996. "Remote sensing of ephemeral water bodies in western Niger". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n° 4, p. 733-748.
- XIAO X., BOLES S., LIU J., ZHUANG D., FROLKING S., LI C., SALAS W. et MOORE B., 2005. "Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images". *Remote Sensing of Environment*, vol. 95, n° 4, p. 480-492.
- XU H., 2006. "Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n° 12-14. p. 3025-3033.

## **Sites Internet :**

### **MODIS :**

<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp> : Téléchargement et informations sur les données

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> : Téléchargement des données

<http://MODIS.gsfc.nasa.gov/index.php> : Informations sur les données

### **Landsat :**

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> : Téléchargement des données

<http://glovis.usgs.gov/> : Téléchargement des données

### **Données SIG :**

<http://www.hydrosciences.fr/sierem/index.htm> : Données SIG sur le bassin versant du Niger

<http://biogeo.berkeley.edu/bgm/gdata.php> : Données SIG sur le Mali : aires administratives, routes, voies ferrées, population, climat, cours d'eau et lacs

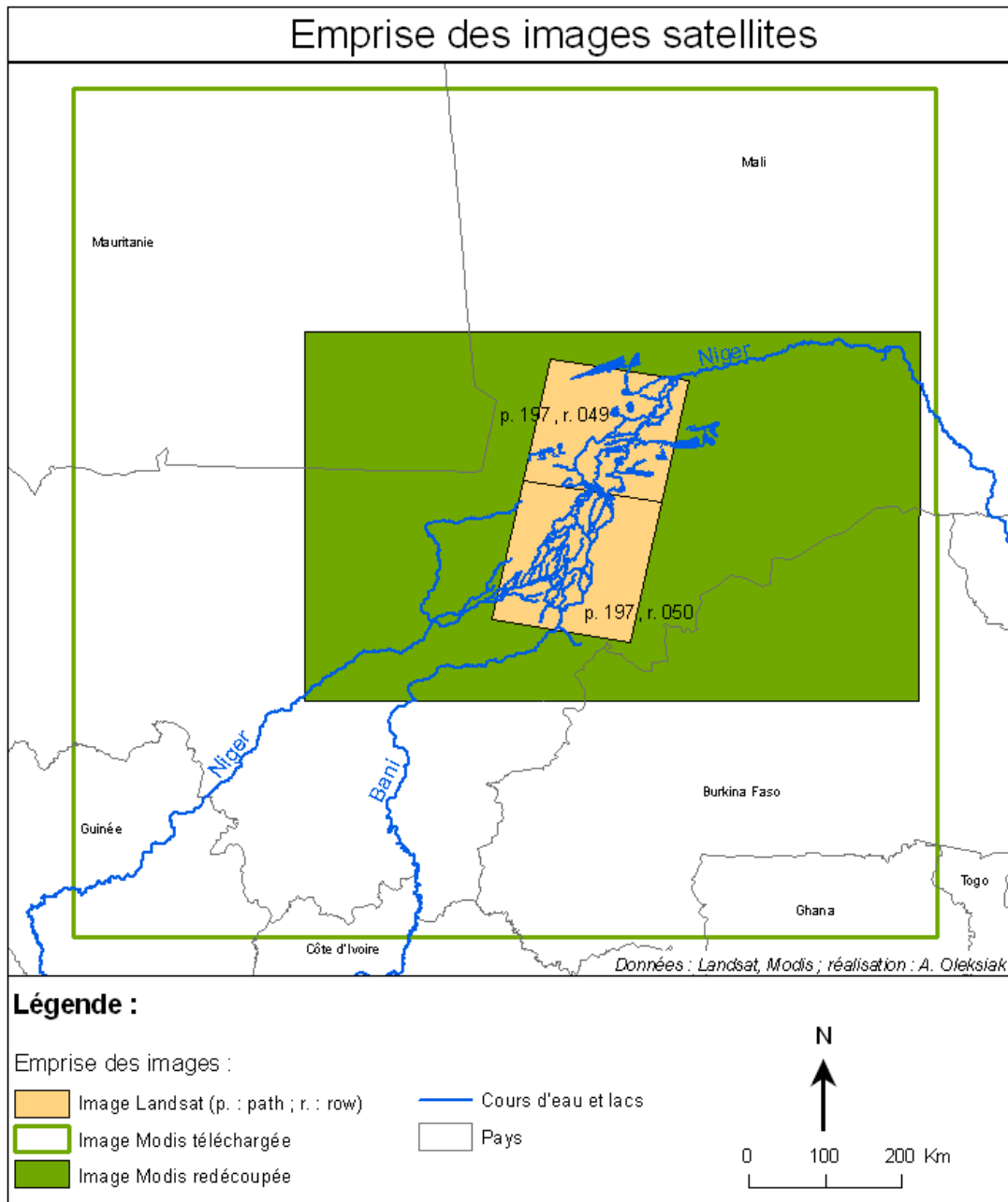
<http://www-gem.jrc.it/glc2000/> : Couverture végétale au Mali



# Annexes

Annexe 1 : Emprise des images satellites.....	i
Annexe 2 : Aide à la compréhension des noms de fichier MODIS.....	ii
Annexe 3: Les bandes des produits de réflectance de surface.....	iii
Annexe 4: MRT (MODIS Reprojection Tool).....	iv
Annexe 5 : Images utilisées dans l'étude .....	vi
Annexe 6: Comparaison des différents indices existant pour discriminer l'eau .....	vii
Annexe 7: Classification par nuées dynamiques .....	ix
Annexe 8: Cartographie du delta intérieur du Niger à partir d'images Landsat.....	xi
Annexe 9: Différents seuils du MNDWI sur deux images MODIS journalières .....	xiv
Annexe 10 : Superficies en eau en pourcentage par maille et par image de synthèse à huit jours (exemples des résultats des mailles traitées dans l'analyse de l'étude).....	xv
Annexe 11 : Carte du maillage structuré .....	xvi

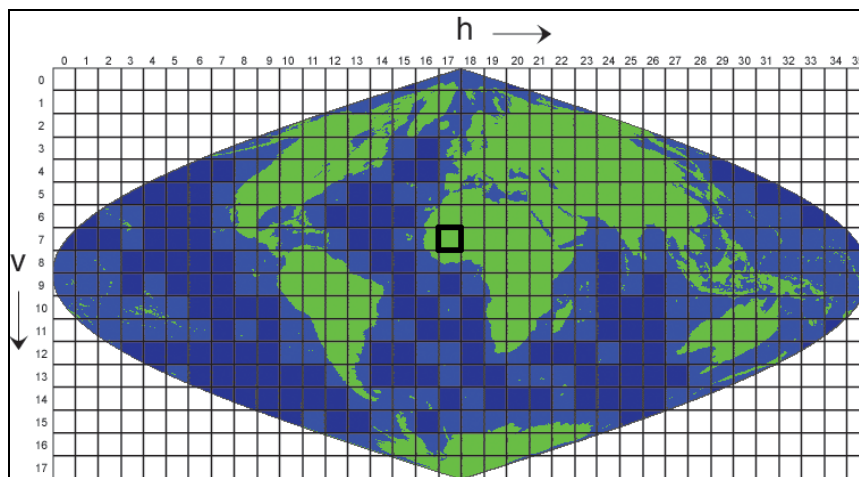
# Annexe 1 : Emprise des images satellites



## Annexe 2 : Aide à la compréhension des noms de fichier MODIS

Il existe près de 90 produits MODIS réalisés par la NASA. Chaque image possède un numéro particulier qui renseigne sur le satellite, la localisation, la date, le type de produit. A partir d'un exemple, on se propose de déchiffrer le nom d'une image : **MOD09GA.A2001285.h17v07.005.2007061090049**

- **MOD09GA** correspond au nom du produit, le nom complet étant MODIS Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 500 m and 1 km. Plus en détail, **MOD** signifie que les images sont issues du satellite Terra (MYD correspondant au satellite Aqua), **MOD09** est une grande catégorie de produits issue des sept premières bandes de MODIS du visible au PIR. Le produit est une estimation de la réflectance de la surface comme si elle était mesurée au sol sans absorption ou diffusion atmosphérique. Il corrige les effets des gaz atmosphériques, des aérosols et des nuages fins de type cirrus. Enfin, les lettres **GA** correspondent au nom du produit. Celui-ci contient 7 bandes à 500m de résolution et 14 autres bandes à 500 m ou 1 km de résolution qui, elles, informent sur des données annexes : qualité des pixels, données de géolocalisation...
- **A2001285** : ce chiffre signifie le 285<sup>ème</sup> jour de l'année 2001, soit le 12 octobre 2001.
- **h17v07** : correspond à la case de la grille de projection utilisée pour les images MODIS, à l'intersection de la 17<sup>ème</sup> colonne et la 7<sup>ème</sup> ligne (voir figure ci-dessous).
- **005** : signifie la collection 5 des produits MODIS. La version 5 est une nouvelle version de produits qui permet un plus grand nombre d'images, mais aussi une meilleure correction, tout en réduisant la taille des fichiers. Les produits de la version antérieure restent téléchargeables.
- **2007061215155** : fichier créé le 61<sup>ème</sup> jour (2 mars) de l'année 2007 à 21h51 et 55s.



Grille de découpage des images MODIS

### Annexe 3: Les bandes des produits de réflectance de surface

Les données MODIS sont livrées sous le format hdf, c'est-à-dire qu'un fichier contient plusieurs bandes ou images, appelées aussi « science data sets ». Les données journalières de réflectance retenues sont issues du produit MOD09GA, qui contient 21 bandes, décrites dans le tableau ci-dessous. Les données de réflectance de synthèse à huit jours sont issues du produit MOD09A1, qui contient 13 bandes, décrites dans le tableau ci-après.

Nom	Résolution spatiale	Largeur spectrale	Unité	Type de données et nombre de bits
Num_observations_500m	500 m		none	Entier signé codé sur 8 bits
Surface Reflectance Band 1	500 m	620-670 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 2	500 m	841-876 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 3	500 m	459-479 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 4	500 m	545-565 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 5	500 m	1230-1250 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 6	500 m	1628-1652 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
Surface Reflectance Band 7	500 m	2105-2155 nm	Réflectance	Entier non signé codé sur 32 bits
500m Reflectance Band Quality (QC_500m)	500 m		Bit	Entier signé codé sur 8 bits
Observation coverage (Obs_cov_500m)	500 m		Pourcentage	Entier non signé codé sur 32 bits
Observation number (iobs_res)	500 m		none	Entier non signé codé sur 8 bits
250m scan value information (q_scan):	500 m		Bit	Entier non signé codé sur 8 bits
Number of Observations (num_observations_1km)	1 km		na	Entier signé codé sur 8 bits
Reflectance Data State QA (State_1km):	1 km		Bit	Entier non signé code sur 16 bits
SensorZenith	1 km		Degré	Entier signé code sur 16 bits
SensorAzimuth	1 km		Degré	Entier signé code sur 16 bits
Range: pixel to sensor	1 km		Mètre	Entier non signé code sur 16 bits
SolarZenith	1 km		Degré	Entier signé codé sur 16 bits
SolarAzimuth	1 km		Degré	Entier signé codé sur 16 bits
Geolocation flags (gflags)	1 km		Bit	Entier non signé codé sur 8 bits
Orbit pointer	1 km		None	Entier signé codé sur 8 bits

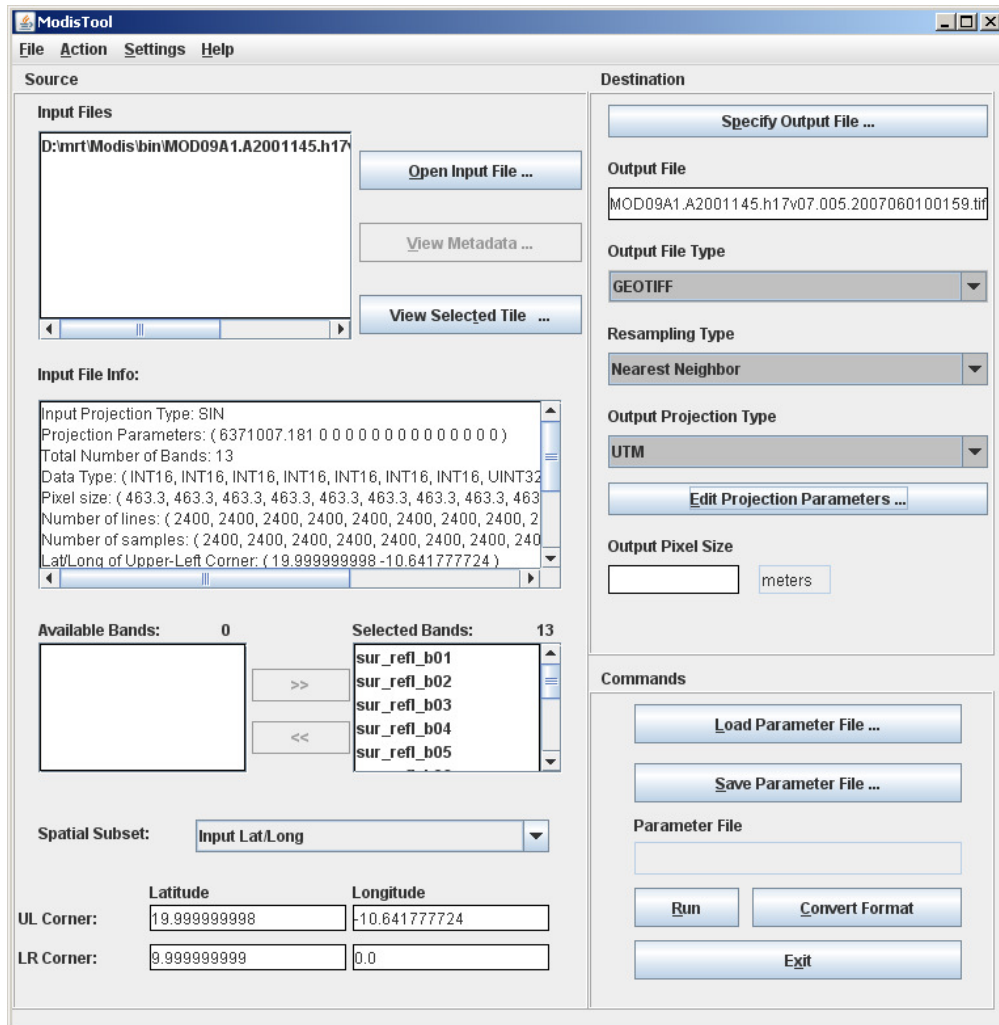
#### Les bandes du produit MO09GA MODIS Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V005

Nom	Largeur spectrale	Unité	Type de données et nombre de bits
500m Surface Reflectance Band 1	620-670 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 2	841-876 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 3	459-479 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 4	545-565 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 5	1230-1250 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 6	1628-1652 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Surface Reflectance Band 7	2105-2155 nm	Réflectance	Entier signé codé sur 16 bits
500m Reflectance Band Quality B		Bit	Entier non signé codé sur 32 bits
Solar Zenith Angle		Degré	Entier signé codé sur 16 bits
View Zenith Angle		Degré	Entier signé codé sur 16 bits
Relative Azimuth Angle		Degré	Entier signé codé sur 16 bits
500m State Flags		Bit	Entier non signé codé sur 16 bits
Day of Year		Jour julien	Entier non signé codé sur 16 bits

#### Les bandes du produit MOD09A1 MODIS SURFACE REFLECTANCE 8-day global 500 m sin grid v005

## Annexe 4: MRT (MODIS Reprojection Tool)

L'installation de cet outil est disponible à partir du site : <http://lpdaac.usgs.gov/landdaac/tools/MODIS/index.asp>  
Une aide à l'installation est disponible dans le document suivant : HOULES M., 2006.



Afin que le logiciel fonctionne correctement, il faut avant tout mettre les fichiers hdf dans le même répertoire que la commande d'exécution du logiciel. Par exemple, si le chemin de l'exécutable est le suivant `D:\mrt\MODIS\bin\MODISTool.jar`, alors les fichiers hdf devront être placés à l'endroit suivant : `D:\mrt\MODIS\bin\MOD09A1.A2001145.h17v07.005.2007060100159.hdf`.

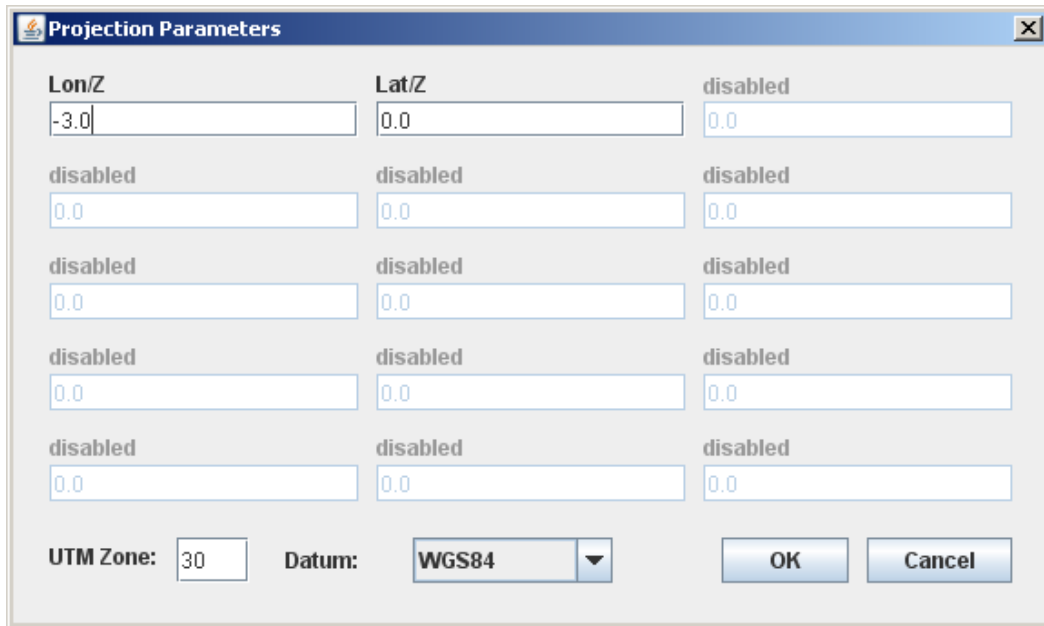
Dans un premier temps, il faut indiquer le fichier hdf à convertir grâce à la commande `Open Input File`, puis il faut sélectionner les bandes à convertir dans `Selected Bands`.

Si la zone étudiée est plus petite que la zone que recouvre l'image, il est alors possible de la redimensionner en changeant les coordonnées des coins de l'image grâce aux commandes « `spatial subset` », « `UL corner` » et « `LR corner` ».

Il faut ensuite définir le répertoire de sortie. Pour éviter les messages d'erreur, il est préférable de choisir le répertoire de sortie identique au répertoire d'entrée. Il faut aussi spécifier dans le nom de sortie le format : (.tif, .hdf, ...). Puis, dans la boîte « `Output File Type` », il faut choisir le format de sortie, identique à l'extension du nom de sortie.

Il faut ensuite définir la méthode de rééchantillonnage par « `resampling type` ».

Puis, il faut définir la projection de sortie par « `Output Projection type` » et entrer les paramètres de projection, qui se présentent sous la forme suivante :



Il faut connaître à l'avance et précisément les paramètres de la projection choisie. L'exemple ci-dessus est celui de la projection UTM zone 30 et du datum WGS 84. Le méridien à l'origine de cette projection a pour coordonnées -3 m, donnée qu'il faut rajouter aux paramètres de la projection.

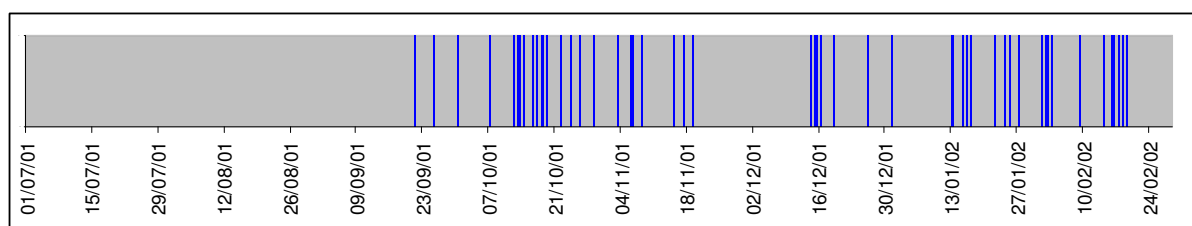
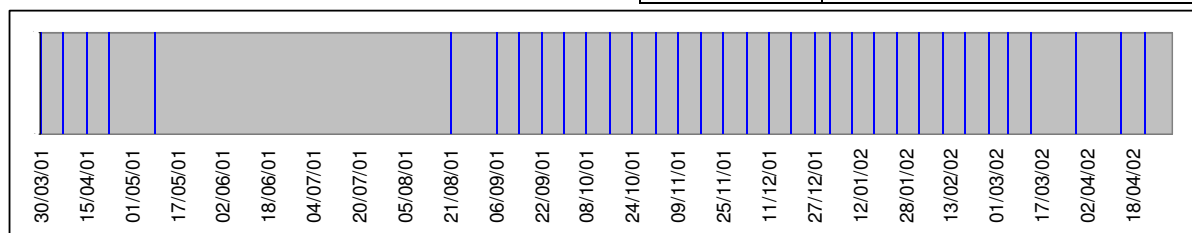
Par défaut, la taille du pixel est la même que l'image d'origine, mais elle peut être modifiée par l'utilisateur, grâce à la commande « Output pixel size ».

Il suffit ensuite de lancer le traitement (reprojection, découpage et conversion de format) par le bouton « Run ».

Cette opération doit être répétée autant de fois qu'il existe d'images. Cependant, pour alléger les manipulations et éviter les tâches routinières, il existe une méthode qui consiste à créer des fichiers contenant les paramètres de reprojection. Grâce à la commande « save parameter file », on enregistre les paramètres saisis, ensuite, on change uniquement le nom du fichier d'entrée et de sortie. Il suffit alors de chercher les fichiers .prm sauvegardés et de les télécharger avec la commande « load parameter file ». Ainsi, plusieurs calculs peuvent être lancés en même temps.

## Annexe 5 : Images utilisées dans l'étude

Image synthèse à 8 jours		Image journalière	
avril	30/03/01	septembre	21/09/01
	07/04/01		25/09/01
	15/04/01		30/09/01
	23/04/01		octobre
mai	12/10/01		
août	13/10/01		
21/08/01	14/10/01		
septembre	06/09/01	16/10/01	
	14/09/01	17/10/01	
	22/09/01	18/10/01	
	30/09/01	novembre	19/10/01
octobre	08/10/01		22/10/01
	08/10/01		24/10/01
	16/10/01		26/10/01
	24/10/01	29/10/01	
novembre	01/11/01	03/11/01	
	09/11/01	06/11/01	
	17/11/01	08/11/01	
	25/11/01	15/11/01	
décembre	03/12/01	17/11/01	
	11/12/01	19/11/01	
	19/12/01	décembre	14/12/01
	27/12/01		15/12/01
janvier	01/01/02		16/12/01
	09/01/02		19/12/01
	17/01/02	26/12/01	
	25/01/02	31/12/01	
février	02/02/02	janvier	13/01/02
	10/02/02		15/01/02
	18/02/02		16/01/02
	26/02/02		17/01/02
mars	05/03/02	22/01/02	
	13/03/02	24/01/02	
	21/03/02	25/01/02	
	29/03/02	février	27/01/02
avril	14/04/02		01/02/02
	22/04/02		02/02/02
	30/04/02		03/02/02
		09/02/02	
		14/02/02	
		16/02/02	
		17/02/02	
		18/02/02	
		19/02/02	





## Annexe 6: Comparaison des différents indices existant pour discriminer l'eau\*

	Saison humide Synthèse du 16 octobre au 24 octobre 2001	Saison sèche Synthèse du 22 avril au 30 avril 2002
<b>Composition colorée standard</b> (R : NIR G : R B : G)		
<b>NDVI</b>  $\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$		
<b>NDWI</b>  $\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$		

\* L'étaléage de l'histogramme des comptes numériques a été effectué en encadrant le pic des valeurs de chaque image



	Saison humide Synthèse du 16 octobre au 24 octobre 2001	Saison sèche Synthèse du 22 avril au 30 avril 2002
<b>MNDWI</b>  $\frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR}$		
<b>NDMI</b>  $\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$		
<b>NDTI</b>  $\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$		

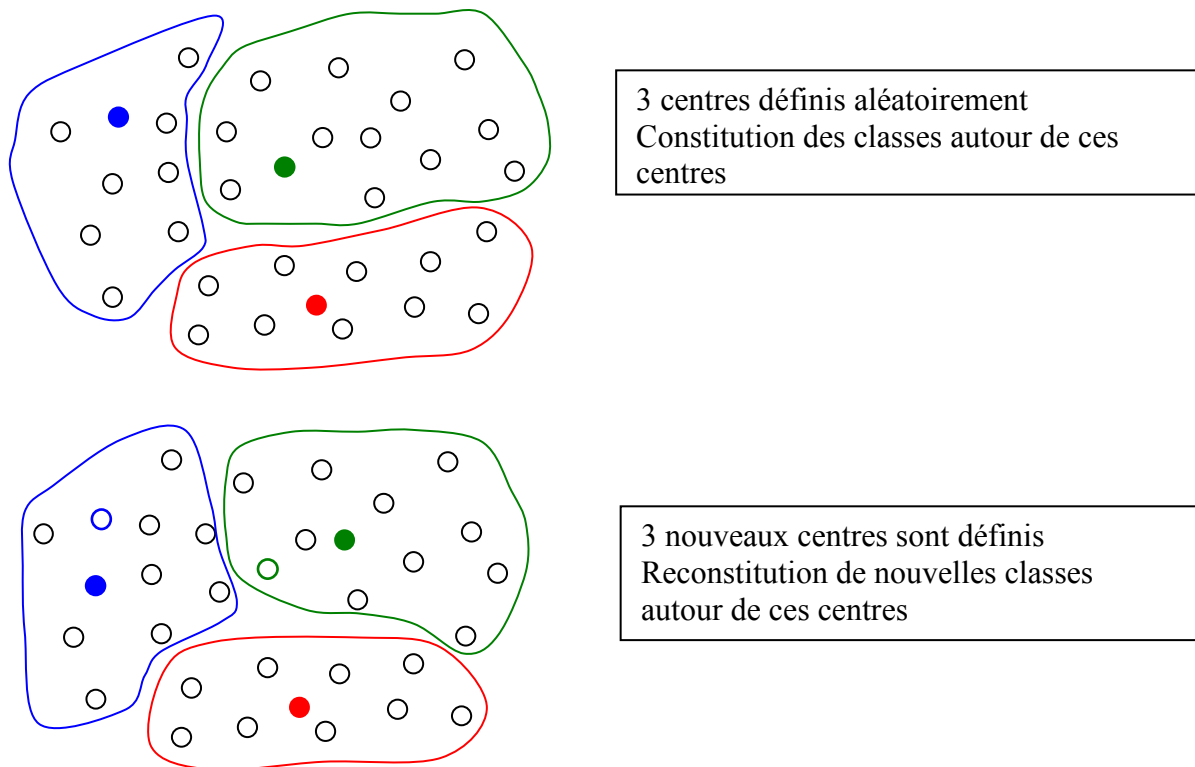
## Annexe 7: Classification par nuées dynamiques

La classification par nuées dynamiques est une méthode qui vise à classer les éléments en  $k$  classes,  $k$  étant connu. Cette classification organise les classes en maximisant les écarts et en minimisant la variance des classes, selon la formule suivante :

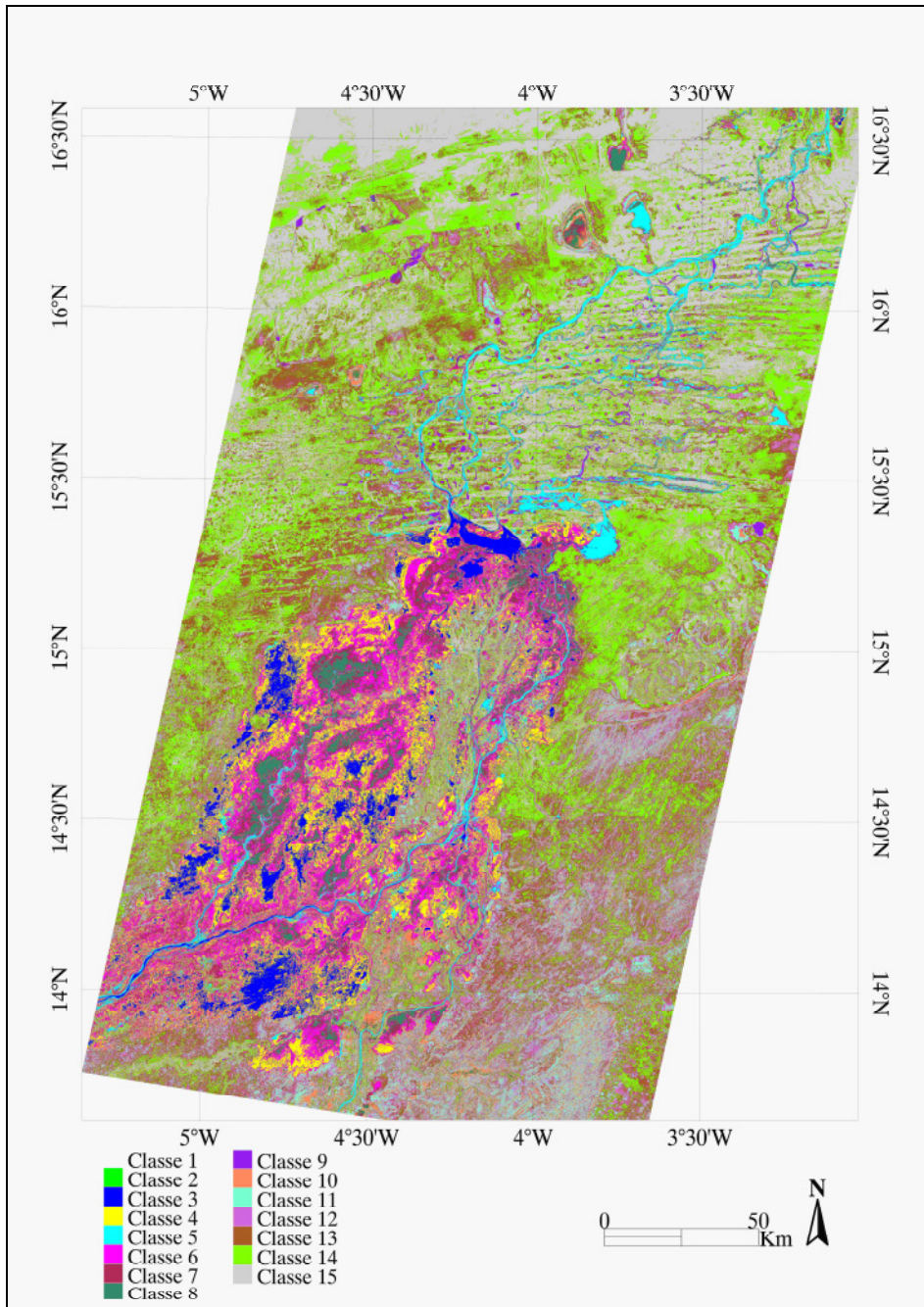
$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2$$

où il existe  $k$  classes  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$   
et où  $\mu_i$  est le barycentre de tous les points  $x_j \in S_i$

Avant de lancer la classification, on choisit  $k$  classes.  $K$  niveaux de gris sont tirés au hasard parmi tous les pixels et constituent alors des barycentres. La distance euclidienne est calculée parmi tous les éléments entourant ces centres. Lorsque la distance est minimale entre un centre particulier et un pixel, alors ce pixel appartient à la même classe que le centre. Ainsi,  $k$  classes sont formées. L'algorithme calcule alors le nouveau barycentre de ces classes ainsi formées. Lorsque les nouveaux centres sont définis, le calcul de la distance minimale entre le barycentre et tous les pixels est à nouveau effectué, des classes sont alors formées et les nouveaux barycentres de ces classes sont calculés. Les itérations s'arrêtent lorsque les centres sont stabilisés.



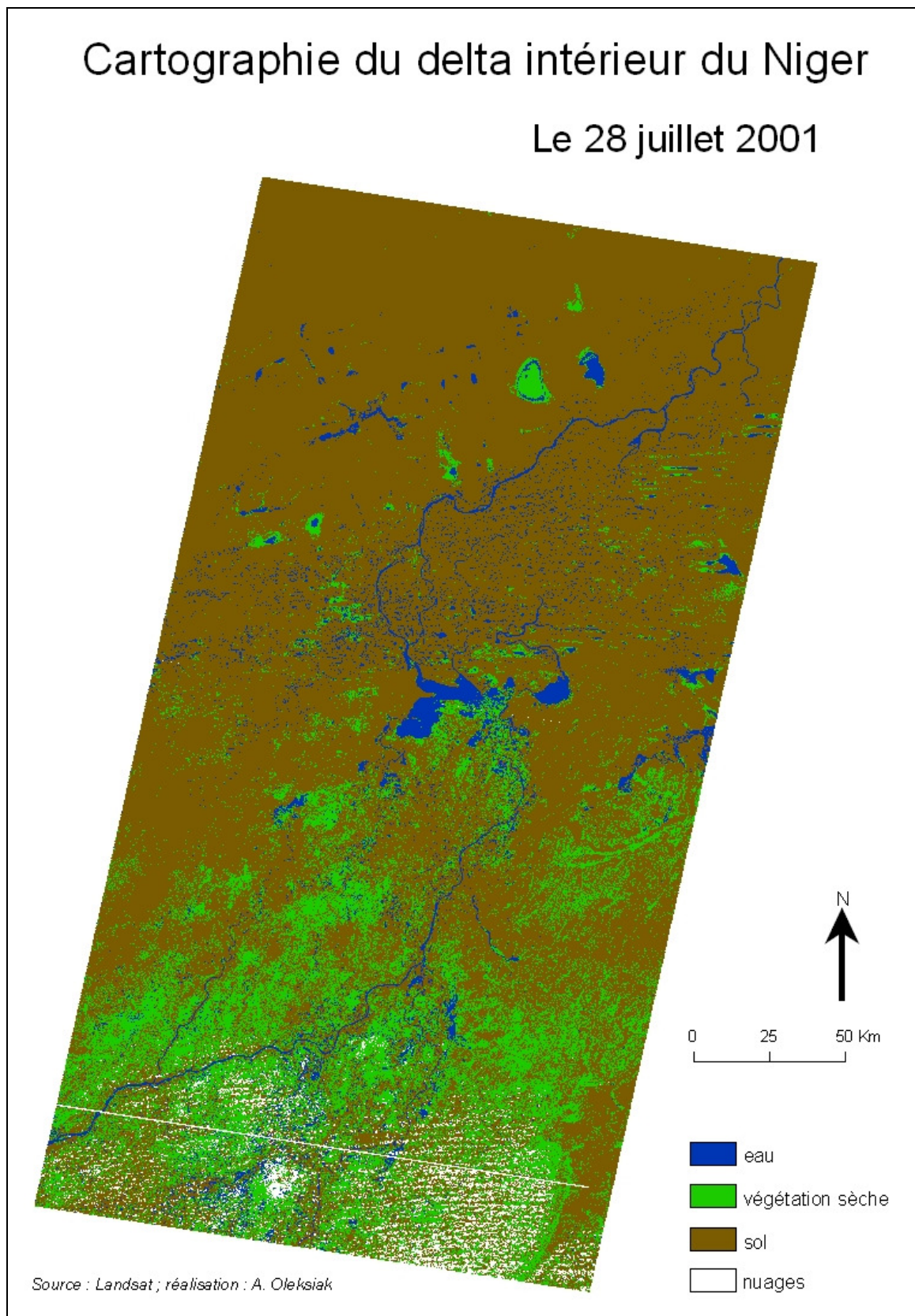
Pour la classification de l'image Landsat du 16 octobre 2001, 15 classes ont été choisies. Le résultat est le suivant :



**Classification k-means sur l'image landsat du 16 octobre 2001**

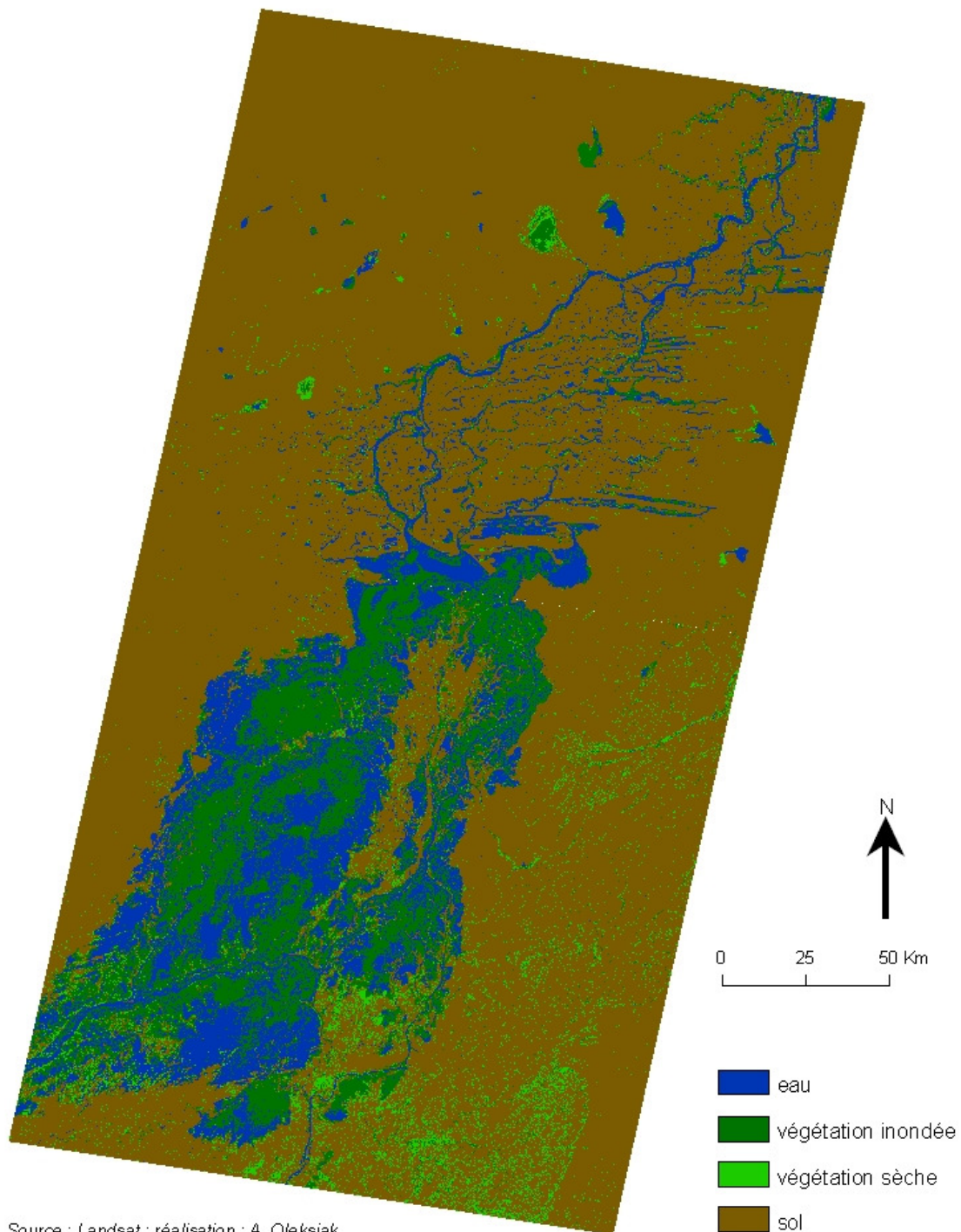


Annexe 8: Cartographie du delta intérieur du Niger à partir d'images Landsat



# Cartographie du delta intérieur du Niger

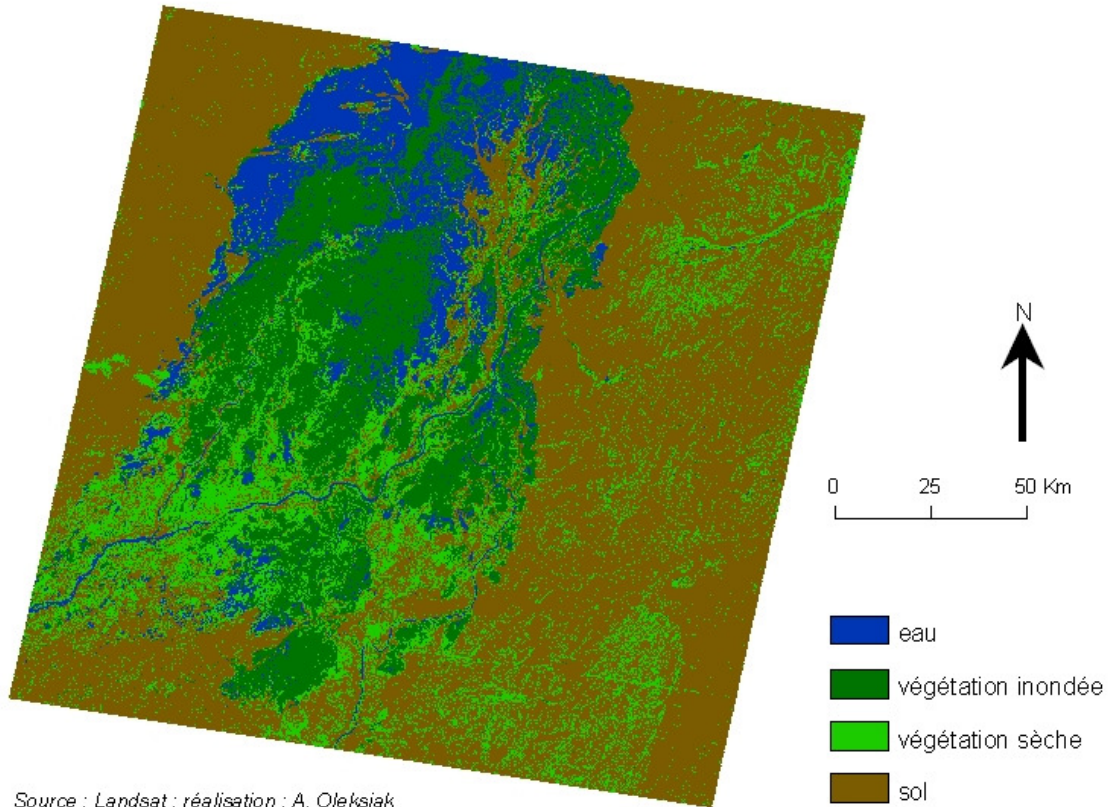
Le 16 octobre 2001



Source : Landsat ; réalisation : A. Oleksiak

# Cartographie du delta intérieur du Niger

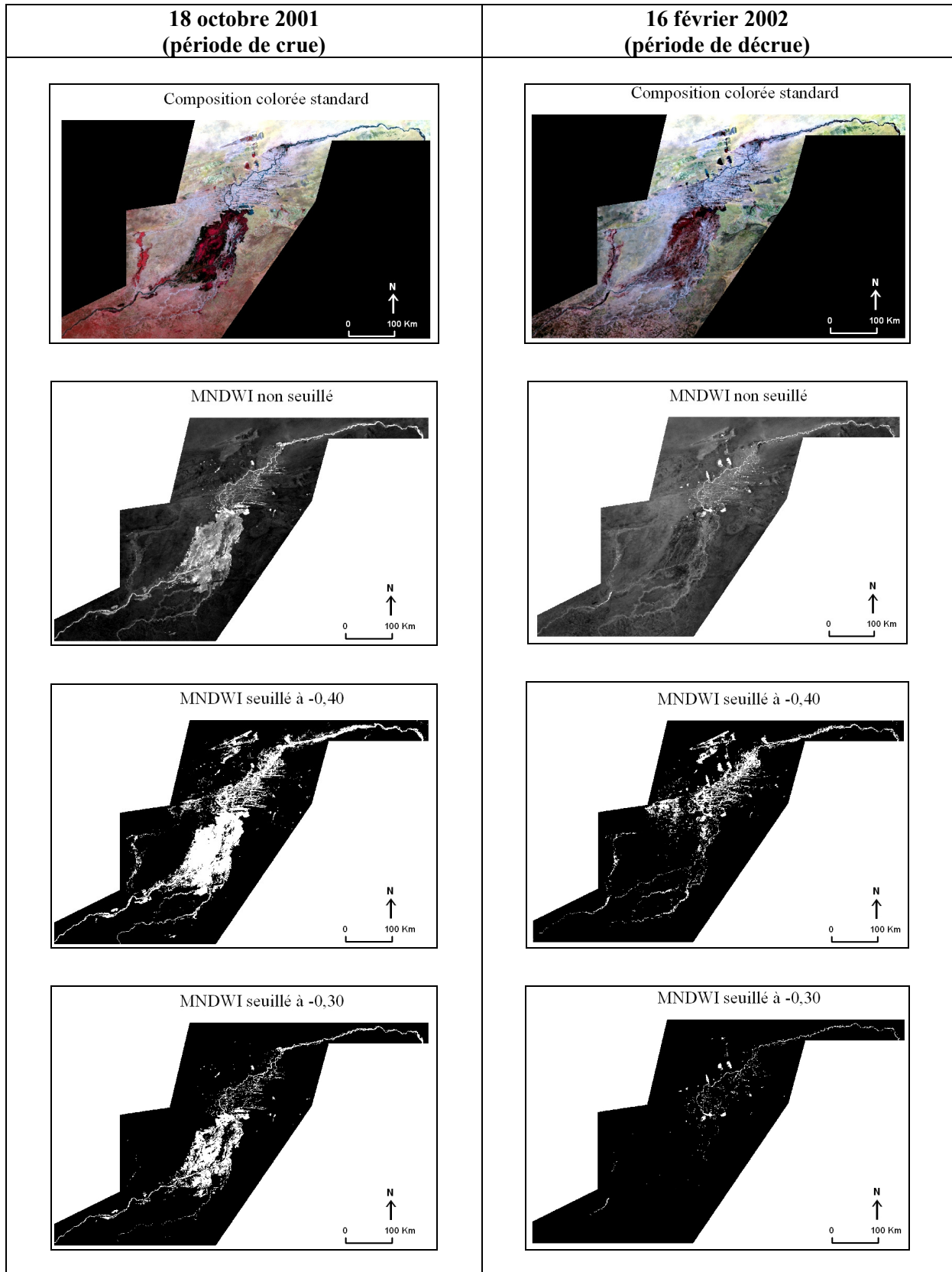
Le 17 novembre 2001



Source : Landsat ; réalisation : A. Oleksiak



# Annexe 9: Différents seuils du MNDWI sur deux images MODIS journalières

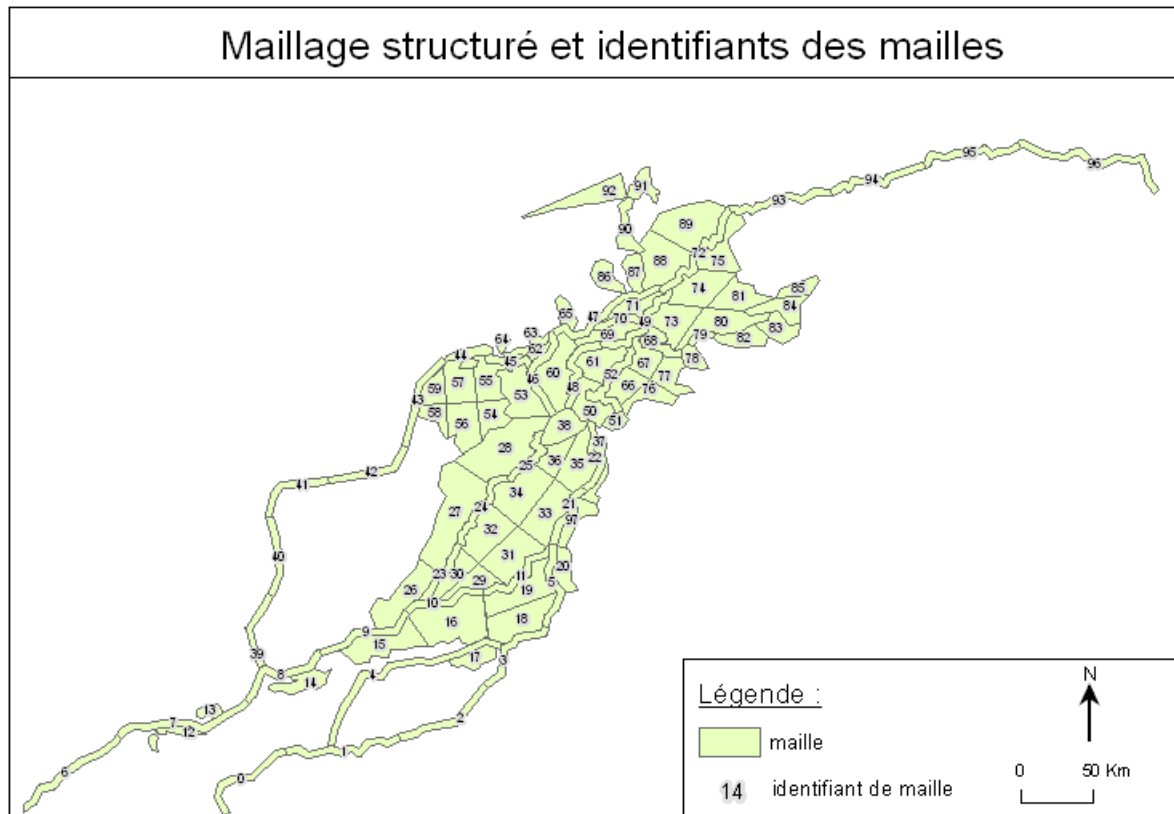




Jour	129	233	249	257	265	273	281	289	297	305	313	321	329	337	345	353	361	1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	89	105	113	superficie (km <sup>2</sup> )	
Date Id	09/05/2001	21/08/2001	06/09/2001	14/09/2001	22/09/2001	30/09/2001	08/10/2001	16/10/2001	24/10/2001	01/11/2001	09/11/2001	17/11/2001	25/11/2001	03/12/2001	11/12/2001	19/12/2001	27/12/2001	01/01/2002	09/01/2002	17/01/2002	25/01/2002	02/02/2002	10/02/2002	18/02/2002	26/02/2002	06/03/2002	14/03/2002	30/03/2002	15/04/2002	23/04/2002		
0	0,40	51,31	49,09	37,02	31,01	13,69	11,82	10,30	10,45	7,47	7,47	6,06	6,92	4,09	1,87	2,22	2,58	2,68	2,88	1,16	0,76	0,91	0,51	0,56	0,05	0,25	0,30	0,20	0,56	2,47	378,3	
1	6,08	44,74	39,27	27,41	27,33	14,70	13,79	12,03	12,80	10,04	9,48	7,67	8,92	6,51	5,13	5,09	6,21	8,02	7,24	3,88	4,09	4,53	5,22	4,40	2,97	3,10	3,79	4,78	4,31	6,25	441,6	
...																																
7	26,49	52,86	66,07	75,53	78,09	59,81	50,08	38,82	36,49	31,15	30,57	26,95	29,62	24,92	20,57	18,32	18,86	18,02	20,95	17,60	15,08	17,29	16,07	17,18	18,36	16,11	15,23	18,21	13,59	21,30	497,8	
29	0,10	9,72	21,61	41,52	53,77	82,73	93,90	87,49	61,63	34,69	28,13	20,27	11,38	7,55	0,98	1,24	0,78	0,57	0,83	0,52	0,10	0,21	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,16	0,16	0,05	0,05	383,7
30	0,00	11,08	24,54	76,21	90,38	99,90	99,90	97,27	78,49	45,24	37,30	29,91	16,45	11,18	1,37	2,58	0,56	0,66	0,71	0,51	0,20	0,30	0,25	0,40	0,05	0,05	0,10	0,00	0,00	0,10	395,0	
31	0,30	25,60	34,21	42,72	50,38	66,40	71,05	79,59	85,42	74,47	71,97	61,49	47,23	33,93	14,02	12,71	5,60	4,07	1,85	1,16	0,93	0,81	0,83	0,62	0,30	0,62	0,65	0,28	0,65	0,76	883,9	
32	0,00	39,97	61,30	70,93	82,82	98,55	99,90	99,95	99,97	93,80	90,65	78,73	61,88	50,55	21,09	18,20	6,61	4,22	0,64	0,33	0,20	0,05	0,03	0,08	0,05	0,03	0,10	0,00	0,20	0,08	808,3	
33	5,01	24,67	53,13	32,96	35,86	41,84	56,34	60,08	75,38	79,62	71,64	64,87	54,83	37,02	23,23	20,48	14,06	14,01	10,92	4,99	5,67	12,02	9,85	6,01	4,94	8,39	5,21	6,49	10,31	12,24	853,2	
34	3,86	46,80	51,84	57,58	61,99	69,42	77,34	84,68	92,79	95,39	94,52	93,96	89,93	84,06	69,68	63,72	44,75	29,92	8,32	3,41	2,67	3,27	4,40	2,07	1,30	2,11	1,81	2,07	2,28	3,99	967,8	
38	19,73	83,94	85,17	85,91	86,24	88,92	90,32	90,77	92,46	93,33	93,78	93,99	94,56	93,70	91,23	90,40	87,40	87,19	84,64	75,21	66,52	62,85	48,23	45,88	32,91	29,20	29,94	35,58	24,96	25,49	499,9	
55	1,69	23,14	14,44	5,44	4,44	2,57	2,03	1,69	1,76	1,49	1,19	1,72	5,63	3,14	1,42	1,49	2,11	1,42	2,91	1,23	0,61	1,11	0,50	0,46	0,77	0,27	1,19	8,20	1,95	9,04	530,7	
58	8,26	3,13	42,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,15	0,45	0,00	1,26	0,00	0,30	0,89	1,04	3,05	0,00	0,15	1,19	1,49	0,60	6,99	1,34	2,16	5,73	1,12	1,79	268,7	
59	45,09	34,34	49,12	2,83	3,96	2,64	2,52	4,15	5,60	5,97	7,17	7,55	3,21	19,06	0,50	7,92	17,92	14,72	33,21	4,65	10,31	32,96	25,28	12,77	34,40	27,36	19,87	33,33	17,61	43,58	320,9	
73	7,19	11,00	37,36	8,19	8,95	8,49	10,40	11,15	13,45	18,02	19,53	24,15	29,72	35,13	25,91	26,03	34,98	32,68	25,67	21,61	20,10	18,26	17,26	15,66	12,73	12,15	11,76	11,12	9,46	13,39	665,9	
74	13,41	35,31	54,86	28,37	26,82	29,17	29,35	27,59	31,60	36,43	37,26	42,33	46,63	52,03	41,24	37,34	47,84	48,21	38,49	30,15	28,77	25,11	22,60	23,02	16,21	15,79	17,31	17,25	15,14	27,38	778,0	
...																																
96	14,23	41,50	42,81	37,16	44,75	41,82	45,93	43,67	45,42	45,30	45,65	48,52	48,36	46,92	44,59	44,72	46,67	52,92	48,13	44,15	46,92	44,53	34,80	37,00	29,44	24,11	24,08	20,22	18,79	24,02	604,4	
97	1,91	31,25	26,87	35,33	41,69	51,08	53,80	54,66	57,20	57,38	51,20	49,35	46,70	42,06	33,97	28,35	7,84	3,21	0,86	0,37	0,86	0,74	0,49	0,12	0,06	0,56	0,06	0,86	0,31	0,31	319,7	

Annexe 10: Superficies en eau en pourcentage par maille et par image de synthèse à huit jours (exemples des résultats des mailles traitées dans l'analyse de l'étude)

## Annexe 11: Carte du maillage structuré



# Table des figures

Figure 1 : Carte de localisation du delta intérieur du Niger .....	3
Figure 2 : Moyenne des débits journaliers pour quelques stations du delta intérieur du Niger (1999-2007).....	6
Figure 3 : Volumes annuels d'eau pour quelques stations du delta intérieur du Niger (1999-2007).....	7
Figure 4 : Exemple de codage de la qualité des images de synthèse à huit jours.....	11
Figure 5 : Signatures spectrales de quelques objets courants (www.wmo.ch).....	14
Figure 6 : Réflectances moyennes de classes (en compte numérique) issues d'une classification en nuées dynamiques sur l'image Landsat du 16 octobre 2001 .....	17
Figure 7 : Surfaces inondées dans le delta intérieur du Niger le 16 octobre 2001 .....	18
Figure 8 : comparaison entre la classification Landsat et différents seuillages du MNDWI sur l'image MODIS.....	19
Figure 9 : Comparaison des surfaces en eau entre les images Landsat de référence et la combinaison des indices MNDWI et NDMI seuillés sur les images MODIS .....	22
Figure 10 : Maillage structuré sur le delta intérieur du Niger retenu pour l'étude.....	23
Figure 11 : Illustration de l'indice d'agrégation pour un raster de type binaire, d'après He et al., 2000. ....	24
Figure 12 : chaîne de traitements automatique sur les images journalières .....	26
Figure 13 : chaîne de traitements automatique sur les images de synthèse à 8 jours .....	27
Figure 14 : Dynamique mensuelle de la crue dans le delta intérieur du Niger (2001-2002).....	28
Figure 15 : Cartographie du delta intérieur du Niger à trois dates différentes à partir d'images Landsat .....	29
Figure 16 : Comparaison des résolutions des images Landsat et MODIS pour l'identification des zones en eau.....	30
Figure 17 : Carte des temps d'inondation du 14 septembre 2001 au 30 avril 2002 .....	31
Figure 18 : Surfaces en eau pour quatre mailles sur les séries d'images temporelles et journalières ...	32
Figure 19 : Relation Hauteur d'eau-Largeur .....	34
Figure 20 : Illustration du débordement de l'eau dans le lit majeur (effet d'hystérésis).....	35
Figure 21 : Courbes hauteur-surface de quatre stations du delta intérieur du Niger .....	35
Figure 22 : Comparaison de l'évolution des hauteurs d'eau mesurées et des surfaces d'eau estimées par images satellites pour quatre mailles.....	36
Figure 23 : Date correspondant à la superficie maximale en eau par maille (maillage structuré).....	37
Figure 24 : Date correspondant à la superficie maximale en eau par maille (maillage carré).....	38
Figure 25 : Evolution de l'indice d'agrégation par maille .....	39
Figure 26 : Évolution de la superficie inondée totale du DIN à l'intérieur du maillage structuré .....	40

# Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur ETM+ présent sur le satellite Landsat...	8
Tableau 2 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MODIS présent sur le satellite Terra ....	9
Tableau 3 : Comparaison des avantages et des inconvénients entre les images journalières et les images de synthèse à 8 jours .....	10
Tableau 4 : Principaux indices permettant la détection de l'eau .....	16
Tableau 5 : Tests des différents indices de détection de l'eau sur les images MODIS .....	17
Tableau 6 : Récapitulatif des différentes matrices de confusion entre la classification Landsat zone inondée-zone non inondée et différents seuils de MNDWI de l'image MODIS aux 16 et 18 octobre 2001.....	20
Tableau 7 : Surfaces en eau estimées à partir des séries d'images journalières et de synthèse entre le 16 et le 23 octobre 2001 .....	33

# Table des matières

Remerciements .....	1
Sommaire .....	2
<b>Introduction</b> .....	3
1. Site de l'étude : .....	3
3. Contexte scientifique .....	4
4. Objectif .....	5
5. Méthodologie générale .....	5
<b>I. Acquisition des données</b> .....	6
I.1. Les données hydrologiques .....	6
I.1.1. Le régime hydrologique du delta intérieur du Niger .....	6
I.1.2. Choix de l'année de référence .....	7
I.2. Les données géographiques et satellitaires .....	8
I.2.1. Les données retenues pour la constitution d'un fond SIG .....	8
I.2.2. Les données satellitaires .....	8
I.2.2.1. Les données Landsat .....	8
I.2.2.2. Les données MODIS .....	9
I.3. Pré-traitements des données satellitaires .....	10
I.3.1. Reprojection, découpage et changement de format des images MODIS .....	10
I.3.2. Évaluation de la qualité des images MODIS .....	11
<b>II. Méthodologie de traitements des images</b> .....	13
II.1. Le comportement radiométrique de l'eau .....	13
II.1.1. Généralités sur les caractéristiques de l'eau et les différentes méthodes d'identification .....	13
II.1.2. Les méthodes de détection de l'eau dans le domaine de l'optique .....	14
II.1.2.1. L'utilisation d'une seule bande .....	14
II.1.2.2. Le calcul d'un ratio de bandes .....	14
II.1.2.3. Tests des différents indices de détection de l'eau sur les images MODIS .....	16
II.2. Validation des indices retenus pour détecter l'eau .....	17
II.2.1. Constitution d'une vérité terrain ou d'une référence de validation à partir d'une image Landsat .....	17
II.2.2. Détermination d'un seuil unique de l'indice MNDWI des images MODIS à partir de l'image Landsat .....	19
II.2.3. Utilisation d'un indice complémentaire : le NDMI .....	21
II.3. Constitution d'un maillage .....	22
II.3.1. Le modèle hydraulique en casiers .....	22
II.3.2. Un indice d'agrégation de l'eau par maille .....	24
II.4. L'automatisation .....	25
II.4.1. La chaîne de traitements générale .....	25
II.4.2. La chaîne de traitements sur les images journalières .....	25
II.4.3. La chaîne de traitements sur les images de synthèse à huit jours .....	26
<b>III. Résultats</b> .....	28
III.1. Dynamique de la crue à l'échelle globale du DIN .....	28
III.1.1. Dynamique mensuelle de la crue par les images MODIS .....	28
III.1.2. Apport des images Landsat sur la dynamique de la crue .....	29
III.2. Analyse de la dynamique temporelle de la crue par maille .....	32
III.2.1. Évolution de la superficie en eau par maille à partir des images journalières et de synthèse à huit jours .....	32
III.2.1.1. Comparaison entre les résultats issus des séries des images journalières et de synthèse .....	33
III.2.1.2. Evolution de la superficie en eau par maille à partir des images de synthèse à huit jours .....	34

III.2.2. Analyses hauteur-surface.....	34
III.3. Analyse de la dynamique spatiale de la crue par maille .....	37
III.4. Évaluation de la forme des surfaces en eau par l'indice d'agrégation.....	39
III.5. Conclusions sur la dynamique de la crue.....	40
<b>Conclusion</b> .....	42
Bibliographie.....	44
Annexes.....	47
Table des figures .....	xvii
Table des tableaux.....	xviii
Table des matières .....	xix

## **Résumé** :

Le delta intérieur du Niger (DIN), situé au Mali, est une vaste plaine d'inondation de 100 km sur 400 km dans laquelle le fleuve Niger déverse ses eaux annuellement. Le fleuve connaîtra des aménagements dans les années à venir (digues, barrages...), de plus, des changements climatiques sont possibles dans cette zone. Ces évolutions futures auront un impact sur l'écoulement de l'eau dans le DIN. Il est donc nécessaire de réaliser une modélisation physique des écoulements qui permettra d'évaluer l'impact des divers changements sur le DIN. En raison de la taille de la zone étudiée, la télédétection permet un suivi de l'inondation annuelle. Les images MODIS de synthèse de réflectance à 8 jours permettent un suivi régulier de la crue. L'année hydrologique étudiée est l'année 2001/2002, choisie en raison des volumes importants écoulés. Ainsi en utilisant deux indices normalisés et seuillés sur l'ensemble de la série temporelle, le MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) et le NDMI (Normalized Difference Moisture Index), il est possible d'analyser la dynamique temporelle de la crue par l'évolution hebdomadaire des surfaces en eau. La constitution d'un maillage pour un modèle hydraulique en casiers permet une analyse plus fine : calcul des surfaces en eau par casier, vitesse de remplissage et de vidange, mais aussi analyse des connexions entre casiers. La mise en place d'une chaîne de traitements automatique permet de relancer les calculs de surface par casier et par image sur une autre année hydrologique ou à partir d'un autre maillage. L'ensemble de ces données permettra alors la constitution d'un jeu de données qui pourront être intégrées dans un modèle hydraulique.

**Mots-clés** : Télédétection, données MODIS, indices MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) et NDMI (Normalized Difference Moisture Index), modèle hydraulique, crue, delta intérieur du Niger (Mali)

## **Abstract** :

*The Inner Niger Delta (DIN), located in Mali, is a vast floodplain 100 km over 400 km in which the Niger River spills its waters annually. The river will receive facilities in the years to come (dykes, dams...); moreover climate changes are possible in this area. These future developments will have an impact on the flow of water in the DIN. It is therefore necessary to conduct a physical model of flows that will assess the impact of various changes on the DIN. Because of the size of the study area, remote sensing can analyse the annual flooding. The MODIS 8-day surface reflectance product permits regular monitoring of the flood. The hydrological year studied is the year 2001/2002, chosen because of large volumes of water. Using two indexes over the time series, MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) and NDMI (Normalized Difference Moisture Index), it is possible to analyse the temporal dynamics of the flood by the changes of water surfaces week after week. The creation of a grid of meshes for a hydraulic model in traps allows a more detailed analysis: calculation of the areas of a water trap, speed filling and emptying, but also analysis of the connections between traps. The establishment of a chain of treatment can revive automatic calculations of surface in a trap and in an image on another year or from another grid of meshes. All these data will then establish a set of data that can be incorporated into a hydraulic model.*

**Keywords** : Remote sensing, MODIS data, MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) and NDMI (Normalized Difference Moisture Index), hydraulic model, rising, Inner Delta Niger (Mali)