

## INONDATION DU DELTA INTÉRIEUR DU NIGER



#### Leo Zwarts Ion Grigoras

### 3.1 Introduction

Pendant la Grande Sécheresse du début des années 1980, l'étendue de l'inondation du Delta Intérieur du Niger a été réduite à moins du tiers de la superficie inondée au cours des décennies antérieures. Les populations de la région ont creusé des canaux et construit des barrages et des écluses en vue de retenir l'eau dans les lacs et les plaines alluviales. Malheureusement, leurs efforts se sont avérés vains, pour l'essentiel, car le niveau d'inondation avait été insuffisant au cours de la majeure partie des dernières années pour couvrir les plaines alluviales en amont et remplir les lacs.

Le débit du fleuve Niger atteint sa pointe en septembre, provoquant l'inondation du Delta Intérieur. Le Chapitre 2 a déjà décrit comment le débit de pointe du fleuve était plutôt minimal au cours des dernières décennies et a quelle mesure cette baisse était due, respectivement, à l'irrigation assurée par l'Office du Niger et à la gestion du réservoir de Sélingué. L'analyse révèle qu'environ 6% du débit de pointe de septembre est capté pour l'irrigation du Delta mort et qu'environ 20% est utilisé pour remplir le réservoir de Sélingué. Quel est l'impact de cette situation sur le Delta Intérieur? Quel sera l'effet supplémentaire du futur réservoir de Fomi, dont le volume est presque le triple de celui de Sélingué? Avant d'esquisser des réponses à ces questions, il convient de décrire la manière dont l'inondation du Delta Intérieur est tributaire de l'ampleur des crues et les relations qui existent entre ces deux facteurs et le débit du fleuve.

Le présent chapitre est structuré comme suit: la Section 3.2 examine de façon détaillée les estimations relatives à la superficie de la zone inondable dans le Delta Intérieur du Niger. A cet effet, diverses méthodes indirectes sont examinées. Ensuite, les méthodes de télédétection sont appliquées en vue d'évaluer directement la superficie inondable (Section 3.3). Les questions spécifiques abordées dans cette section sont les suivantes: la procédure de sélection des images satellite, la distinction entre la terre et l'eau, et la couverture du Delta. Dans la Section 3.4, les cartes hydrographiques du flux et du reflux des eaux sont établies, respectivement. Sur la base de ces cartes, un modèle numérique d'inondation est mis au point pour les différents algorithmes et élévations (Section 3.5). En définitive, les modèles construits sont utilisés pour déterminer l'impact de l'action humaine, par le biais de l'irrigation et de la création de réservoirs, sur la superficie inondable dans le Delta Intérieur, en appliquant tant l'approche du bilan hydrique que l'approche statistique (Section 3.6-3.8). Enfin, la Section 3.9 présente les conclusions de ce chapitre.

# **3.2** Estimations disponibles concernant la superficie de la zone inondable

### Cartes topographiques et photographies aériennes

Les cartes topographiques de l'IGN (échelle 1/200 000) permettent de distinguer clairement la zone inondable et la zone couverte en permanence par l'eau. La Fig. 3.1 présente ces données numérisées. Les superficies totales de la zone inondée et des plans d'eau permanents sont de 31 130 km<sup>2</sup> et 3 800 km<sup>2</sup>, respectivement. Etant donné que les dépressions isolées et les lacs, tel que le Korarou, sont indiqués comme des zones d'inondation, nous supposons que les zones temporairement couvertes par les eaux de pluie sont également indiquées comme zone d'inondation sur les cartes topographiques. La plupart des cartes topographiques du Delta Intérieur du Niger ont été publiées en 1956 et reposaient sur des photographies aériennes prises au cours des années précédentes. Pendant cette période, les zones inondées étaient très vastes.

Ponchet et Troubat (1994) ont comparé les superficies inondées au cours de la période 1955-65 (36 100 km<sup>2</sup>) à celles de la période 1970-90<sup>2</sup>. Tel qu'il ressort de la carte de Ponchet et Troubat, la superficie



Fig. 3.1. Zone inondée (bleu ciel) et plans d'eau permanents (bleu marine), tels qu'indiquées sur 11 cartes topographiques (1/ 50 000) publiées par l'IGN en 1956.

<sup>2</sup> Il convient de noter que nous supposons que leur estimation de 36 100 km2 incluait toutes les zones sèches à l'intérieur de la zone inondable. inondée au cours de la majeure partie des années de cette période était de 12 400 km<sup>2</sup>. En ajoutant les zones inondées de façon irrégulière depuis 1970 à la zone d'inondation, cette superficie passe à 18 500 km<sup>2</sup>. En excluant les lacs situés à l'est du Delta Intérieur, qui ne sont qu'occasionnellement remplis d'eau, la superficie est de 17 600 km<sup>2</sup>. Compte non tenu de l'étendue de l'inondation, les estimations de Ponchet et Troubat équivalent toujours à la moitié de la superficie inondée dans les années 60. Bien que Ponchet et Troubat n'aient pas indiqué de façon explicite sur leur carte la superficie inondée au cours des années extrêmement sèches, ils estiment qu'elle devait être très réduite, de l'ordre de 8 000 à 10 000 km<sup>2</sup>.

#### Modèle hydrologique fondé sur l'évaporation

Les informations relatives au niveau d'évaporation peuvent nous permettre de déterminer la superficie inondable réelle dans le Delta Intérieur du Niger (Quensière et al. 1994, Olivry 1995). Pour déterminer ce rapport, nous avons besoin de données sur les pertes d'eau dans le Delta, ainsi que sur le volume d'eau entrant et sortant du Delta Intérieur du Niger. Le rapport entre le débit du fleuve (m<sup>3</sup>/s) et le niveau d'eau a été déterminé pour plusieurs stations hydrologiques situées tout au long du fleuve Niger et peut ainsi être décrit avec exactitude à l'aide de polynômes de troisième degré. Ces rapports permettent de déterminer le volume d'eau entrant et sortant du Delta Intérieur du Niger.

La perte d'eau entre Ké-Macina et Douna, du côté de l'entrée, et Diré, de l'autre côté, varie d'une année à une autre. Cette variation peut être imputée au volume total d'eau apportée par l'inondation, que l'on appelle «crue». Le volume total de l'écoulement annuel du fleuve vers le Delta Intérieur varie entre 22 et 81 km<sup>3</sup>. Lorsque la crue est faible, 15 km<sup>3</sup> d'eau sortent du Delta Intérieur. Il s'ensuit que 7 km<sup>3</sup> d'eau, soit 32% du débit du fleuve à l'entrée du Delta Intérieur, sont perdus du fait de l'évaporation. Par contre, lorsque la crue est très forte, ce sont 40 km<sup>3</sup> d'eau, soit 50% du débit total du fleuve, qui sont perdus pour la même raison. En d'autres termes, la perte d'eau augmente plus que proportionnellement au volume d'eau entrant dans le Delta. La principale raison de ce rapport disproportionnel entre le volume de la crue et la perte d'eau réside dans le fait que pendant les années de forte crue, la superficie couverte par l'eau est plus importante, ce qui entraîne par la suite une plus grande évaporation. Le niveau

d'évaporation varie entre 160 et 240 mm par mois, en fonction de la température et de l'insolation, la moyenne mensuelle étant de 200 mm.

Le dernier facteur dont il convient de tenir compte, afin de pouvoir déterminer la superficie totale de la zone où a lieu l'évaporation, est la durée de transport des eaux du Niger depuis l'embouchure jusqu'à l'exutoire du Delta Intérieur. Cette durée varie entre 5 et 7 semaines, et dépend de l'importance du volume de la crue.

En combinant les informations précédentes relatives aux pertes d'eau causées par l'évaporation, l'évaporation par unité de surface et la durée de transport des eaux du Niger, il est possible d'estimer la superficie inondée chaque année, à l'aide des données relatives aux pertes d'eau. Selon ce rapport, la superficie maximale de la zone inondée varie entre 9 500 km<sup>2</sup> en 1984 et 44 000 km<sup>2</sup> en 1957.

La superficie de la zone d'inondation maximale peut être décrite avec précision comme une fonction du niveau annuel maximal des eaux à Akka:  $km^2 = 102,84 \text{ cm} - 24\,675$  3.1 où:

 $\mbox{km}^2 = \mbox{superficie}$  totale de la zone inondée dans le Delta Intérieur du Niger

cm = niveau maximal des eaux à Akka (entre 325 et 625 cm).

Ce rapport est plutôt positif, mais présente néanmoins quelques insuffisances. Comme l'a déjà relevé Olivry, ce modèle n'est pas réaliste lorsque le niveau d'eau est élevé, puisque la superficie prévue de la zone inondée dépasse celle de la zone d'inondation maximale de 30 à 35 000 km<sup>2</sup>.

#### Modèle agroécologique

Cissé & Gosseye (1990) ont suivi une toute autre approche en vue de déterminer la zone d'inondation dans le Delta Intérieur du Niger. Ils ont fondé leur analyse sur la carte du PIRT (1983) sur laquelle on distingue six différents types d'habitats. Etant donné que la présence de ces habitats est déterminée par l'inondation (durée de la couverture par l'eau et/ou profondeur maximale de l'eau pendant une crue moyenne), la carte du PIRT peut être directement utilisée pour estimer la superficie moyenne de la zone inondée pour différents niveaux d'eau. Cissé et Gosseye ont utilisé le niveau de l'eau à Mopti comme niveau de référence et supposé qu'un niveau d'eau de 660 cm constituait le niveau maximum. Orange et al. (2002) ont évalué le modèle utilisé par Cissé & Gosseye et sont parvenus à la conclusion que le modèle se comportait relativement bien. Toutefois, ils ont relevé une sous-estimation systématique de la zone inondée. Par conséquent, ils ont utilisé un niveau maximum d'eau de 610 cm à Mopti. Ainsi, le modèle simule des variations de la superficie de la zone inondée de l'ordre de 6 000 km<sup>2</sup> en 1984 à 25 000 km<sup>2</sup> en 1955.

## 3.3

## Méthodes de télédétection

Les images satellite permettent de mesurer directement la superficie de la zone inondée. Mariko et al. (2002) ont analysé quatre images NOAA prises en 1999. Bien que la résolution des images NOAA soit faible (soit 1 x 1 km), la comparaison d'une série d'images pourrait servir à mesurer directement la variation de la superficie inondée. Utilisant un grand nombre d'images Landsat (résolution 30 x 30 m), Zwarts et al. (2002) ont adopté une approche similaire pour le Delta Intérieur du Niger. La présente section repose sur leur travail.

#### Distinction entre la terre et l'eau

La Fig. 3.2 permet de savoir à quoi ressemblait le lac Debo sur une image satellite à deux dates différentes: février 1985 et février 2001. On a procédé à la sélection de trois bandes de spectre (bleu, rouge et vert). Le Composite couleur réelle révèle clairement où le terrain est nu et où il existe de la végétation. L'image de février 1985 permet de distinguer avec une précision absolue l'eau de la terre. Tel n'est pas le cas pour l'image de février 2001, car l'on ne sait toujours pas si la zone verte est couverte ou non par l'eau.

L'on peut distinguer la terre de l'eau en sélectionnant les bandes 5 et 7 de Landsat TM. L'eau implique un algorithme de la bande 5 entre 100 et 135 et de la bande 7 entre 70 et 90. Les autres valeurs représentent la terre. Cette règle semble bien fonctionner. Tel qu'il ressort de la Fig. 3.2, il convient de considérer la majeure partie de la zone verte sur l'image de février 2001 comme représentant l'eau, celle-ci devant sa couleur verte à la végétation flottante.

#### Couverture du Delta

Une scène Landsat couvre une superficie de 180 x 180 km. Pour couvrir la totalité du Delta Intérieur du Niger, il faut une scène de la zone située entre Djenné et le lac Debo (trajectoire 197/rangée 50) et une autre depuis le nord du lac Debo jusqu'à Tombouctou (trajectoire



Fig. 3.2. Composite couleur réelle (à gauche) et carte hydrographique (à droite) du lac Debo et du lac Walado à deux dates différentes. Le bleu représente l'eau, selon un algorithme (avec pour arrière-plan l'image de gauche). Niveau d'eau à Akka: 14 cm et 247 cm, respectivement. Les quatre cartes couvrent exactement la même superficie et mesurent 64,9 x 74,4 km. Coordonnées UTM de l'angle nord-ouest 333,7, 1701,5 et l'angle sud-est 407,1, 1636,6.

197/rangée 49). Pour obtenir les données sur le lac Faguibine, une troisième scène (trajectoire 197/rangée 48) est nécessaire et deux images supplémentaires de la trajectoire 196 et 198 afin de couvrir la partie sudouest, près de Ké-Macina, et la partie nord-est, à l'est de Tombouctou. Fort heureusement, il a été possible, du moins pour les scènes d'avant 1999, d'obtenir un décalage dans la trajectoire. C'est la raison pour laquelle on a fait l'acquisition de l'image 197/49 et 197/50 avec un décalage de 20% vers le nord. Ainsi, il nous est possible de couvrir la partie située à l'extrême nord du Delta Intérieur du Niger, y compris le lac Faguibine, même si l'on doit sacrifier la partie méridionale. La Fig. 3.3 montre la couverture des deux images sans le décalage de 20% vers le nord.

Le satellite Landsat suit une voie SSO-NNE. Il ne produit pas toujours exactement les mêmes images. Il y avait une déviation d'au plus 12 km vers l'ouest ou l'est. Une zone large de 178 km était toujours couverte et toutes les 23 images couvraient ensemble une zone large de 195 km. La rangée 49 + 50, y compris le décalage de 20% vers le nord, donne une couverture d'une longueur de 380 km.



Fig. 3.3. Couverture du Delta Intérieur par deux scènes Landsat d.d. 16 october 2001 sans le décalage de 20% vers le nord.

#### Sélection des images

Etant donné que les aperçus montraient que le Nord révélait moins de variation au sein de la zone exposée aux inondations que le Sud, il n'a pas été nécessaire de recueillir une grande quantité de données sur la partie septentrionale du Delta afin de parvenir à un modèle numérique complet d'inondation. Par conséquent, 24 images de la moitié méridionale du Delta Intérieur du Niger, et 19 de la partie septentrionale ont été obtenues. Les versions numérisées des 24 cartes hydrographiques sont présentées à la Fig. 3.5.

En principe, seules des images sans nuages ont été acquises. Cependant, afin de pouvoir analyser également les images prises en saison pluvieuse, nous avons dû accepter des images comportant quelques nuages épars. Ceci s'est soldé par des problèmes pendant l'établissement des cartes hydrographiques, car il n'a pas été aisé d'établir une distinction entre les plans d'eau et les nuages, avec la règle appliquée. Pour contourner cette difficulté, nous avons fait disparaître les nuages à la main. Là où cela n'a pas été possible, nous avons comparé les images nuageuses avec une autre image ne comportant aucun nuage et ayant un niveau élevé d'eau et avons utilisé l'image ajoutée pour masquer les nuages.

Le but de l'opération était d'avoir une quantité similaire d'images du flux et du reflux des eaux. Par ailleurs,



Fig. 3.4. Rapport entre le niveau d'eau à Akka et le numéro des jours pendant 8 ans. Les 24 symboles qui figurent sur les courbes concernent les jours à partir desquels les scènes Landsat ont été sélectionnées. L'axe horizontal représente l'année hydrologique, c'est-à-dire la période du 1er mai au 30 avril de l'année suivante.



nous avons recherché au moins une image par différence de niveau d'eau de 50 cm. Cela s'est avéré difficile. La Fig. 3.4 établit la corrélation entre le niveau d'eau à Akka pour chaque image et la date de prise de l'image. Les images ont été prises au cours de huit années différentes. Les mesures quotidiennes du niveau d'eau à Akka sont également fournies.



Fig. 3.5. Cartes hydrographiques du Delta Intérieur du Niger pour 24 dates, sur la base de 24 images satellite de la moitié méridionale et 19 images de la partie septentrionale. Le niveau d'eau à Mopti, Akka et Diré est indiqué. Les cartes sont classées par niveau croissant et niveau décroissant des eaux pendant le flux et pendant le reflux des eaux à Akka, respectivement.



Dire: 357 AkRa: 317 em Mõpti: 444 em 2-10-1987



Diré: 367 cm







Diré: 206 cm



Diré: 167 cm



Diré: 104 cm











## **3.4** Cartes hydrographiques

Les 24 cartes hydrographiques ont été classées par niveau d'eau à Akka: croissant pour le flux des eaux (Tableau 3.1) et décroissant pour le reflux des eaux (Tableau 3.2). Au niveau d'eau le plus bas, à savoir -2 cm, à Akka (8 juillet 1985), les grandes étendues d'eau n'étaient constituées que du lac Debo et du lac Korientzé, dans la partie centrale du Delta. Le lac Walado était presque totalement asséché, avec juste un peu d'eau dans ses parties méridionale et septentrionale. Au Nord, le lac Horo contenait encore de l'eau. La situation n'était pas très différente avec un niveau d'eau de 77 cm (10 juin 2001) et 140 cm (6-8-1984): le lac Debo et le lac Korientzé étaient légèrement plus étendus, tandis que le lac Walado et le lac Fati étaient déjà (partiellement) remplis d'eau. Le Delta méridional a commencé à s'inonder à un niveau d'eau de 166 cm (28-7-2001) et davantage à 271 cm (13-9-1986) et 294 cm (26-8-2000). Cependant, même à un niveau d'eau de 381 cm (27-9-2000) des parties entières du Delta méridional n'étaient pas encore couverts, tandis que même à 429 cm (16-10-2001) le Delta septentrional était encore sec.

Avec un niveau d'eau de 511 cm à Akka (28-11-1999), la guasi-totalité des parties méridionale et centrale du Delta Intérieur du Niger était couverte d'eau, ainsi que quelques parties de la région septentrionale. A l'intérieur de la moitié méridionale, les terres les plus hautes, les hautes berges situées le long du Niger même, du Diaka et des nombreux Mayo étaient secs. Lorsque le niveau d'eau est tombé à 369 cm (16-11-1986), il y avait encore de l'eau autour de Pora, entre le Niger et le Bani, et tout au long du Niger au Nord de Mopti. Les zones les plus vastes encore couvertes d'eau se trouvaient dans la partie centrale du Delta Intérieur Niger: à l'Ouest du Diaka (plaine de Séri), à l'Est du Diaka (le long du Mayel Kotia, du Mayo Togoro et du Diarenndé) et plus au Nord - toute la zone située autour des lacs Debo, Walado et Korientzé. Avec un niveau d'eau encore plus bas de 202 cm sur l'échelle de Akka (3-1-1987), la plupart des plaines alluviales étaient sèches, à l'exception de la plaine de Séri et du complexe Walado-Debo-Korientzé adjacent. Lorsque le

Tableau 3.1. Images satellite prises lors du flux des eaux. Le niveau d'eau à Mopti, Akka et Diré est indiqué, ainsi que les précipitations à Mopti (données IER): le nombre de jours précédents sans pluie, la hauteur des pluies (mm) au cours de la quinzaine précédente et la hauteur totale des pluies précédentes (mm) en saison des pluies.

Date		niveau d'eau (c	m)	pluies période précédente (mm)			
	Mopti	Akka	Diré	jours secs	pluie, 2 semaine	pluie total	
8-juil-1985	137	-2	20	1	63,2	137,3	
10-juin-2001	132	40	86	2	4,5	14,6	
6-août-1984	269	140	170	0	50,7	168,4	
28-juil-2001	339	166	191	1	85,2	182,4	
13-sept-1986	473	271	300	2	49,6	269,8	
26-août-2000	478	294	320	0	84,2	252,2	
2-oct-1987	444	317	357	32	0,0	231,5	
25-oct-1984	435	331	367	24	0,0	330,7	
18-oct-1987	481	343	378	48	0,0	231,5	
27-sep-2000	578	381	413	3	58,6	316,7	
16-oct-2001	620	432	458	6	0,7	301,7	

niveau d'eau a chuté davantage, la plaine de Séri a séché à un niveau d'eau de 122 cm (19-11-1987) ou à 90 cm (13-1-1985), les lacs Debo-Walado et Korientzé étant seuls à rester couverts d'eau à ces niveaux-là. A un niveau d'eau de 23 cm (20-2-1987) ou 14 cm (14-2-1985), la superficie des lacs Walado et Korientzé est demeurée quasiment la même, tandis que le lac Debo s'est nettement rétréci. 1984, le lac Faguibine n'a jamais été entièrement rempli d'eau. Il n'y a que trois images sur lesquelles la partie sud-est était couverte d'eau (16-1-1986, 3-1-1987, 19-3-2000). Le lac Faguibine était complètement asséché le 2-2-2001. Ceci est remarquable, dans la mesure où le niveau d'eau maximal à Diré était plus élevé pendant les mois précédents que pendant la crue de 1985 et 1986 (Tableau 3.2), lorsque la partie sud-est était couverte

Tableau 3.2. Images satellite prises lors du reflux des eaux. Le niveau d'eau à Mopti, Akka et Diré est indiqué, ainsi que la date et le niveau d'eau auxquels l'inondation a atteint son niveau maximal.

date	niveau d'eau (cm)			niveau d'eau maximum (date)			niveau d'eau maximum (cm)		
	Mopti	Akka	Diré	Mopti	Akka	Diré	Mopti	Akka	Diré
28-nov-1999	583	511	498	26-oct	23-nov	27-dec	662	511	515
16-nov-1986	358	369	417	8-oct	29-oct	2-nov	534	388	424
10-nov-1984	326	327	375	19-oct	30-oct	9-nov	440	336	375
26-nov-1984	236	287	346	19-oct	30-oct	9-nov	440	336	375
2-fév-2001	176	245	328	23-oct	22-nov	27-nov	608	465	486
3-jan-1987	178	202	281	8-oct	29-oct	2-nov	534	388	424
16-jan-1986	138	160	244	13-oct	3-nov	12-nov	571	433	460
19-jan-1987	133	122	206	8-oct	29-oct	2-nov	534	388	424
13-jan-1985	146	90	167	19-oct	30-oct	9-nov	440	336	375
19-mars-00	128	86	170	26-oct	23-nov	27-dec	662	511	515
8-fév-2003	126	86	166	8-oct	1-nov	15-nov	445	411	445
14-fév-1985	99	23	104	8-oct	29-oct	2-nov	534	388	424
20-fév-1987	78	14	89	19-oct	30-oct	9-nov	440	336	375

La comparaison des 24 images révèle que la superficie inondée tant pendant la crue que pendant la décrue est intimement liée au niveau d'eau. Seuls les lacs situés au Nord, où des barrages ont été construits entre 1987 et 1994 en vue de maîtriser l'eau (voir Chapitre 2.3 et la Fig. 3.1 pour la localisation de ces lacs), constituent une exception à cet égard. Au nombre de ces lacs alimentés par les barrages figurent le lac Tanda (1987), le lac Kabara (1987), le lac Faguibine (1989), le lac Fati (1991), le lac Takadji (1991) et le lac Horo (1994).

La comparaison des images des lacs septentrionaux montre que le lac Horo a été et demeure un lac permanent, même pendant les années très sèches. Le lac Fati a été (presque) toujours plein. Le lac Télé n'était sec que sur trois images prises en juin et juillet. Depuis d'eau. Apparemment, pour que le lac Faguibine soit rempli, il est nécessaire que le niveau d'eau soit plus élevé que par le passé.

Les lacs du côté ouest (lac Tagadji, mare de Soumpi, lac Kabara, lac Tanda et Gatié Loumo) sont visibles sur toutes les images prises de 1999 à 2003. Ces lacs contenaient de l'eau, même aux mois de juin et juillet. Aussi, peut-on considérer les lacs du côté ouest comme des lacs de petite taille, mais permanents. Cependant, ils étaient complètement asséchés pendant les années 1984 et 1987, années d'extrême sécheresse.

Quatre lacs du côté est (lac Haribongo, lac Garou, lac Do, lac Niangaye) ne sont pas concernés par l'image sélectionnée. Mais deux (lac Aougoundou et lac Korarou) étaient entièrement visibles sur l'image de la partie septentrionale. Lorsqu'il pleut normalement, le lac Korarou est un lac temporaire entre juillet et octobre. Cependant, après une année extrêmement pluvieuse (1999) on y a trouvé encore de l'eau en mars. Le lac Aougoundou est un lac permanent, mais il s'est asséché lors de la crue de 1984 et 1987.

Peut-on établir une carte unique indiquant la superficie inondée avec différents niveaux d'eau? Le Tableau 3.3 confirme que, quel que soit le cas, deux cartes sont nécessaires: l'une pour le flux et l'autre pour le reflux des eaux. Les deux cas de figure donnent chacun des résultats différents. Le Tableau 3.3 montre la différence de niveau d'eau à Mopti, Akka et Diré. Afin de procéder à cette comparaison, toutes les mesures ont été converties en niveau d'eau par rapport au niveau de la mer. La différence absolue entre les niveaux d'eau à Mopti et à Diré semble être d'environ cinq mètres lors du flux des eaux et de seulement plus de trois pendant le reflux des eaux.

L'importance de l'établissement d'une distinction entre le flux et le reflux des eaux est illustrée par la comparaison de la superficie inondée au 16-10-01 (429 cm à Akka) avec celle du 28-11-99 (511 cm à Akka). Les deux cartes sont présentées à la Fig. 3.5. A 511 cm, la crue avait atteint son niveau de pointe à Akka. Cependant, le niveau d'eau à Mopti avait déjà baissé pendant quatre semaines, passant de 662 cm le 26-10-99 à 583 cm le 28-11-99. Par contre, le niveau d'eau à Mopti avait atteint son point culminant en 2001, s'établissant à 621 cm, tandis que celui d'Akka augmentait encore, atteignant 429 cm le 16-10-01. Ainsi, tandis que le niveau d'eau enregistré à Akka le 28-11-99 avait augmenté de 82 cm par rapport à celui du 16-10-01, la situation était exactement le contraire où le niveau d'eau avait diminué de 38 cm le 28-11-99 par rapport au niveau du 16-10-01. Il s'ensuit que la décrue avait déjà commencé dans la partie méridionale du Delta le 28-11-99, exposant ainsi les parties asséchées des zones inondées, tandis que la crue se poursuivait dans la partie septentrionale.

Tableau 3.3. Différence absolue de niveau entre Mopti et Akka, entre Akka et Diré, et entre Mopti et Diré, pendant le flux (à gauche) et le reflux (à droite) des eaux. Cette différence a été calculée en utilisant relevés d'eau (Tableau 3.1 et Tableau 3.2) et en tenant compte du fait que le niveau d'eau de 0 cm à Mopti, Akka et Diré correspond à 260,62; 258,38 et 256,85 m IGN.

crue	differénce entre niveau d'eau (cm)			décrue	differénce entre niveau d'eau (cm)			
Date	Mopti-Akka	Akka-Diré	Mopti-Diré	date	Mopti-Akka	Akka-Diré	Mopti-Diré	
08/07/1985	363	131	494	28/11/1999	296	166	462	
10/06/2001	316	107	423	16/11/1986	213	105	318	
06/08/1984	353	123	476	10/11/1984	223	105	328	
28/07/2001	397	128	525	26/11/1984	173	94	267	
13/09/1986	426	124	550	02/02/2001	155	70	225	
26/08/2000	408	125	533	03/01/1987	200	74	274	
02/10/1987	351	113	464	16/01/1986	202	69	271	
25/10/1984	328	117	445	19/01/1987	235	69	304	
18/10/1987	362	118	480	13/01/1985	280	76	356	
27/09/2000	421	121	542	19/03/2000	266	72	338	
16/10/2001	412	127	539	08/02/2003	264	73	337	
				14/02/1985	300	72	372	
				20/02/1987	288	78	366	

### Combinaison des cartes hydrographiques du flux des eaux

L'établissement d'une carte commune du flux des eaux avec des niveaux d'eau différents est simple dans la mesure où la terre est couverte en eau pendant les grandes crues, tandis que le processus inverse, en vertu duquel l'eau se substitue à la terre, ne se produit pas simultanément.

Suite à la comparaison détaillée des cartes hydrographiques disponibles, Zwarts *et al.* (2003) ont conclu que les lacs isolés sont (partiellement) remplis par les eaux de pluie pendant la crue et que cela rend difficile la combinaison des images satellite pendant la saison des pluies, puisque les précipitations varient selon les années. C'est la raison pour laquelle le Tableau 3.1 fournit également des informations sur les précipitations précédant les dates de prise des images satellite.

L'effet des précipitations peut être visible même à l'échelle réduite à laquelle les cartes hydrographiques ont été établies à la Fig. 3.5. A titre d'illustration, en raison des précipitations, un nombre considérablement accru de dépressions étaient encore remplies d'eau le 8-7-1985 (Akka: -2 cm) par rapport au 10-6-2001 (Akka: 40 cm), en dépit du débit plus élevé en 2001. L'importance des eaux de pluie est également illustrée par la comparaison des cartes avec le niveau d'eau de 294 cm (26-8-2000) et de 317 cm (2-10-1987). Il n'y avait pas eu de pluies pendant les semaines précédant le 2-10-87. Cependant, des pluies abondantes étaient tombées au cours des deux semaines précédant le 26-8-2000. Ces pluies ont eu pour conséquence la couverture par les eaux de pluie de vastes zones situées à la périphérie du Delta Intérieur du Niger. Aucune pluie n'était tombée avant le 2-10-1987 (Akka: 317 cm), le 25-10-1984 (331 cm) et le 18-10-1987 (343 cm). Par contre, il y en a eu beaucoup avant la date du 27-9-2000 (381 cm), d'où la présence de nombreux points bleus sur les cartes, indiquant les zones recouvertes d'eau.

### Combinaison des cartes hydrographiques du reflux des eaux

En raison de l'absence de pluies lors du reflux des eaux, la modélisation de l'inondation pendant la décrue était plus simple. Cependant, un autre problème est survenu en ce qui concerne la modélisation de la décrue: le niveau d'eau maximal. Les eaux du fleuve remplissent les lacs isolés lorsque la crue dépasse un certain niveau. C'est la raison pour laquelle l'on doit s'attendre à ce



que plus le niveau d'eau maximal est élevé, plus les lacs et dépressions se remplissent. Ceci signifie que la superficie inondée pendant la décrue est tributaire non seulement du niveau d'eau en tant que tel, mais également du niveau d'eau maximal atteint au cours des mois précédents. Afin de faciliter la comparaison des images pendant la décrue, les niveaux d'eau les plus élevés enregistrés au cours des différentes années sont présentés au Tableau 3.2.

Le problème lié au niveau d'eau maximal auquel l'on s'attendait en matière de comparaison des images à un niveau d'eau élevé (511 cm contre 369 cm contre 327 cm contre 287 cm) n'en était pas un, dans la mesure où le niveau maximal de la crue était quasiment similaire pour ces quatre images. Cependant, à la comparaison des images à 287 et 247 cm, puis à 247 et 202 cm, il semblait y avoir un écart entre l'image à 247 cm, d'une part, et celles à 287 et 202 cm d'autre part. L'image à 247 cm de niveau d'eau date du 2-2-2001, date avant laquelle le niveau d'eau maximal était relativement élevé, à savoir 465 cm. Ceci explique, par conséquent, pourquoi de nombreuses zones - tant au Nord qu'au Sud – étaient couvertes d'eau à 247 cm et non à 287 cm. Dans le dernier cas, le niveau maximal de la crue avait été de 149 cm inférieur à celui de l'image à 247 cm



(niveau maximal de la crue: 336 cm contre 465 cm).

511 cm, 28-11-1999

L'autre complication concernant la modélisation de la décrue a trait aux lacs peu profonds et aux dépressions qui ne sont plus liés au système d'inondation. En d'autres termes, le modèle doit rendre compte de la période comprise entre le moment où le lac est déconnecté du système hydrologique et celui de sa disparition totale du fait de l'évaporation. La quantité d'eau éva-



Fig. 3.6. Surfaces recouvertes d'eau au niveau des lacs Debo et Walado et de la zone méridionale à trois dates différentes, à un moment où le niveau d'eau à Akka était le même, mais le niveau d'eau maximal au cours des mois précédents s'élevait à 336 cm, 411 cm et 511 cm aux jours 75, 99 et 117, respectivement. La surface présentée mesure 39 x 30,5 km. Coordonnées UTM: angles NO: 360,5, 1702 et SE 399,5, 1671,5. La Fig. 3.6 montre que plus l'inondation est forte, plus des lacs isolés voient le jour. Ceci peut s'observer, par exemple, dans la zone au sud des lacs Debo et Walado. Tel qu'indiqué à la Fig. 3.5, cette zone n'est inondée que lorsque les niveaux d'eau sont élevés. Cependant, la zone inondée dans la Plaine de Séri, à l'ouest du Diaka et au sud-ouest du lac Walado était déjà presque asséchée sur l'image de 2000 (suite à une forte crue) tandis qu'elle était encore recouverte d'eau sur l'image de 1984 (après un niveau d'eau maximal très bas). L'explication de ce phénomène tient au fait que la Plaine de Séri se trouve en contrebas de la zone d'inondation et est également recouverte d'eau pendant les années sèches. Cependant, le temps écoulé depuis que le niveau d'eau avait atteint son niveau maximal était de 75 jours en 1984 contre 117 jours en 2000. Par conséquent, étant donné que les lacs situés en basse altitude ont été isolés, la quantité d'eau évaporée a été plus grande en mars 2000 qu'en janvier 1985.

Compte tenu de tout ce qui précède, il est possible de procéder à une description plus précise de l'inondation pendant la décrue à l'aide des 13 images disponibles. Cependant, lorsque le niveau d'eau au moment du reflux des eaux est inférieur à 300 cm, il devient plus difficile de comparer les images datant de différentes années. Dans ces conditions, le niveau d'eau maximal, ainsi que le temps écoulé depuis que l'eau a atteint son niveau le plus élevé déterminent les lieux où l'on peut trouver les lacs isolés et temporaires qui sont encore remplis d'eau.

## 3.5

### Modèle digital d'inondation

#### Modèle inclusif et modèle exclusif

Afin d'établir une carte hydrographique composite sur la base des cartes hydrographiques présentées à la Fig. 3.5, il convient de résoudre les difficultés évoquées dans les sections précédentes. Les problèmes de la pluviométrie pendant la crue, du niveau d'eau maximal et du temps d'évaporation pendant la décrue se posent en définitive dans les mêmes termes: comment traiter des zones recouvertes d'eau qui s'assèchent lorsque le niveau d'eau baisse? En d'autres termes, comment traiter des zones qui s'assèchent lorsque le niveau d'eau baisse, tandis qu'elles étaient recouvertes d'eau auparavant? Dans la présente étude, deux algorithmes différents (à savoir l'inclusif et l'exclusif) sont utilisés pour traiter du problème des lacs isolés et d'autres problèmes liés au niveau d'eau maximal et à l'évaporation.

Dans «l'algorithme inclusif», une zone est considérée comme de l'eau si elle est recouverte d'eau à ce niveau ET également à un niveau inférieur. «L'algorithme exclusif» est moins rigoureux: une zone est considérée comme de l'eau si elle est recouverte d'eau à ce niveau OU à un niveau d'eau inférieur. L'effet de la règle appliquée sur la carte composite est présenté à la Fig. 3.7 s'agissant du flux et du reflux des eaux dans la partie centrale du Delta Intérieur du Niger. D'une manière générale, l'algorithme exclusif sous-estime visiblement la superficie inondée, tandis que de toute évidence, l'algorithme inclusif surestime l'ampleur de l'inondation. La même situation est illustrée à la Fig. 3.8 où une corrélation est établie entre les zones inondées et le niveau d'eau à Akka selon les deux modèles, et les surfaces inondables mesurées sont représentées par des triangles jaunes (voir Fig. 3.5).

La surface inondée des localités où il n'existait aucune image de la zone septentrionale sont indiquées sous forme de triangles ouverts: de toute évidence, leur superficie est toujours sous-estimée. Le modèle composite prévoit également la superficie inondée totale,

porée par jour est de l'ordre de 7 mm.

L'effet conjugué du niveau d'eau maximal et du temps d'évaporation peut être judicieusement illustré par trois images pendant le reflux des eaux, avec quasiment le même niveau d'eau à Akka (c'est-à-dire deux à 86 cm et une à 90 cm). La Fig. 3.6 fournit les mêmes informations que la Fig. 3.5, mais à une échelle plus grande, sur le lac Debo et ses environs.





Fig. 3.7. Cartes hydrographiques composites des lacs Debo et Walado et de la zone méridionale (même zone présentée à la Fig. 3.6), sur la base des cartes hydrographiques (Fig. 3.5), présentées séparément pour le flux (en haut) et le reflux (en bas) des eaux et selon le modèle exclusif (à gauche) et le modèle inclusif (à droite).



Fig. 3.8. La superficie de la zone inondée (km<sup>2</sup>) en fonction du niveau d'eau pendant le flux (en haut) et le reflux (en bas) des eaux. La zone inondée, telle qu'elle ressort des images satellite (Fig. 3.5), est indiquée par des triangles jaunes (couverture totale) et des triangles ouverts (uniquement la partie méridionale du Delta). Les superficies selon le modèle inclusif et le modèle exclusif sont indiquées. L'écart entre les deux modèles est modeste pendant le flux des eaux, mais considérable pendant le reflux des eaux. La ligne de régression est déterminée en faisant la moyenne des deux modèles. Le modèle exclusif relatif au flux des eaux décrit la situation avec une pluviométrie locale peu abondante. Avec des pluies abondantes dans le Delta Intérieur, le modèle inclusif serait plus approprié. Le modèle exclusif relatif au reflux des eaux renvoie aux années pendant lesquelles le niveau de pointe de l'inondation était très bas, ce qui n'avait pas permis aux lacs isolés de se remplir d'eau. Quant au modèle inclusif, il renvoie à une année de forte inondation, mais toujours avec une surestimation de la superficie inondée. Les équations de régression des deux modèles sont présentées.

lorsque aucune image de la zone septentrionale n'est disponible. Pour ce faire, on utilise un algorithme distinct, dans lequel les images où le niveau d'eau est similaire sont utilisées pour calculer la superficie couverte par l'eau dans la zone septentrionale du Delta.

La Fig. 3.8 montre que la superficie inondée est presque similaire tant pendant le flux que lors du reflux des eaux, du moins selon le modèle exclusif. Ce modèle présente la zone inondée reliée au fleuve et considère la quasi-totalité des zones non reliées à celui-ci comme étant sèches.

La différence entre les modèles inclusif et exclusif est faible pour ce qui est de la crue. Ce qui laisse penser que, d'une manière générale, l'effet des précipitations est limité. Une équation commune fondée sur les valeurs moyennes des deux modèles se présente comme suit: Flux des eaux <511 cm

3.2

$$\label{eq:main} \begin{split} km^2 &= 0,0005 \ cm^3 - 0,215 \ cm^2 + 28,807 \ cm + 194,36 \\ (R^2 &= 0,995) \end{split}$$

où:

 $km^2$  = superficie totale inondée dans le Delta Intérieur du Niger cm = niveau d'eau à Akka

Par contre, la différence entre le modèle inclusif et le modèle exclusif est grande pour ce qui est de la décrue. Ceci indique qu'un nombre accru de zones seraient restées couvertes d'eau si le niveau des eaux avait été élevé au cours des mois précédents. Zwarts et al. (2001) ont calculé la superficie des zones reliées et non reliées au système fluvial pour chacune des images satellite. Tel qu'il ressort de leur analyse, que pendant la décrue, environ 50% de la zone inondée est déconnectée du fleuve, une fois que les eaux baissent à un niveau compris entre 100 et 300 cm à Akka. En année sèche, avec un niveau d'eau maximum faible comme ce fut le cas 1984, la plupart de ces zones restent sèches pendant toute l'année. La Fig. 3.9 montre que superficies réelles mesurées en 1984 correspondent aux superficies d'après le modèle exclusif l. Cependant, pour toutes les images récentes, les superficies réelles sont comprises entre les estimations selon le modèle inclusif et le modèle exclusif. En d'autres termes, la superficie est toujours surestimée au titre du modèle inclusif, même lorsque le niveau d'eau a été très élevé. Par conséquent, afin d'assurer une meilleure prévision de la superficie moyenne inondée au moment du reflux des eaux, il convient d'utiliser la moyenne des deux modèles.

#### Reflux des eaux < 511 cm: $km^2 = 0,0002 \text{ cm}^3 - 0,0687 \text{ cm}^2 + 25,121 \text{ cm} + 656,14$ ( $R^2 = 0,997$ )

3.3

3.4

Le niveau d'eau maximal à Akka pour notre sélection d'images satellite est de 511 cm, mais le niveau s'est élevé jusqu'à 625 cm. Par conséquent, nous supposons qu'à un tel niveau élevé d'eau, la zone inondable doit être aussi vaste qu'indiquée sur les cartes topographiques: 31 000 km<sup>2</sup> (Fig. 3.1). Toujours est-il que la superficie inondée à un certain moment devrait être plus réduite, car une partie de la zone inondée au sudouest aurait déjà été asséchée, tandis que l'inondation serait encore en train de couvrir les zones situées au nord-est. Il est probable que la superficie inondée n'ait jamais dépassé 25 000 km<sup>2</sup> avec un niveau d'eau de 625 cm à Akka.

En extrapolant l'équation (3.3) relative au flux des eaux à un niveau d'eau de 625 cm à Akka, l'étendue de l'eau prévue est de 56 300 km<sup>2</sup>, soit 2,25 fois plus que les 25 000 km<sup>2</sup> escomptés. L'exposant est moins élevé en ce qui concerne le reflux des eaux (équation 3.4). Mais, même dans ce cas de figure, la superficie extrapolée, à un niveau d'eau de 625 cm, serait de 38 300 km<sup>2</sup>, soit 1,53 fois plus que prévu. Lorsqu'une superficie inondée de 25 000 km<sup>2</sup>, avec un niveau d'eau de 625 cm, est ajoutée aux données relatives au flux des eaux, il est clair que la relation doit être décrite par une courbe en S. Lorsqu'on en fait autant pour le reflux des eaux, l'équation (3.3) subit une légère modification:

#### Reflux des eaux < 625 cm:

$$\label{eq:km2} \begin{split} km^2 &= 0,00007 \ cm^3 - 0,0032 \ cm^2 + 13,408 \ cm + 1044,2 \\ (R^2 &= 0,997) \end{split}$$

L'équation (3.4) a été utilisée pour calculer la superficie de la zone inondable pour le niveau d'eau le plus élevé à Akka, depuis le début des mesures en 1956. La Fig. 3.9 montre la variation du niveau d'eau maximal et la superficie de la zone inondable correspondante. Etant donné la non-linéarité de la relation entre l'ampleur de l'inondation et la superficie inondée, la variation de la superficie est plus marquée par rapport au niveau d'eau. Le niveau d'eau maximal depuis 1956 a été enregistré en 1957 (625 cm), tandis que le niveau le plus bas, qui représentait environ la moitié du niveau maximal (336 cm), a été enregistré en 1984. La superficie inondée en 1957 s'élevait à 25 000 km<sup>2</sup>, soit plus du triple de la superficie inondée en 1984 (7 800 km<sup>2</sup>).



Fig. 3.9. Variation annuelle du niveau maximal de l'inondation (Akka, cm; échelle de droite) et de la superficie inondée maximale (km<sup>2</sup>, échelle de gauche).

#### Le modèle digital d'élévation par dizaine de centimètres

L'inconvénient des cartes hydrographiques composites disponibles, telles que présentées à la Fig. 3.7, réside dans le fait que les intervalles entre les différents niveaux d'eau sont inégales. Pour dresser une carte hydrographique à intervalles égales, la ligne des hautes eaux est interpolée avec le niveau d'eau à chaque dizaine de centimètres supplémentaire (c'est-à-dire 10, 20, 30 cm, etc.), en utilisant une technique d'interpolation pycnophylactique (Tobler 1992). Le document peut être téléchargé à partir du site web de ESRI (http:// arcscripts.esri.com). Une belle image de la manière dont fonctionne l'algorithme est disponible sur le site http: //www.ncgia.ucsb.edu/pubs/gdp/pop/pycno.html. D'autres applications sont disponibles sur le site http:// mywebpages.comcast.net/ldecola/baltwash/autocarto/ . Nous avons effectué l'interpolation avec 60 itérations, ce qui nous a permis d'obtenir des cartes hydrographiques composites par 10 cm. La Fig. 3.10 montre la carte hydrographique par 50 cm du flux des eaux. Les Fig. 3.11 et Fig. 3.12 présentent le même type de carte hydrographique du reflux des eaux d'après respectivement les modèles inclusif et exclusif.



Fig. 3.10. Zone inondée dans le Delta Intérieur pendant le flux des eaux, en fonction du niveau d'eau à Akka, sur la base des cartes hydrographiques présentées à la Fig. 3.5, en utilisant le modèle inclusif pour combiner les cartes et par la suite une technique d'interpolation pour construire la superficie inondée par 10 cm. La carte montre la modification de la superficie inondée par 50 cm.



Fig. 3.11. Même type de carte qu'à la Fig. 3.10, mais pour le reflux des eaux, utilisant une fois de plus le modèle exclusif pour combiner les cartes hydrographiques. Telle est la situation lorsque le niveau d'eau maximal a été très bas.

Fig. 3.12. Même type de carte qu'aux Fig. 3.10 et Fig. 3.11 pour le reflux des eaux, mais en utilisant le modèle inclusif pour combiner les cartes hydrographiques. Telle est la situation lorsque le niveau d'eau maximal a été très élevé.

## **3.6** Impact de l'irrigation et des réservoirs

De même qu'au Chapitre 2, l'étude a suivi deux approches en vue de déterminer l'impact des activités humaines susmentionnées sur le débit du fleuve. La première méthode est fondée sur l'approche du bilan hydrique du modèle RIBASIM. La seconde approche consiste en une analyse statistique des interactions entre les barrages, les réservoirs et le débit du fleuve dans le Delta Intérieur du Niger. Les deux modèles peuvent être utilisés de manière complémentaire.

#### Approche du bilan hydrique

Tel qu'expliqué au Chapitre 2, l'irrigation et les réservoirs de stockage ont des impacts sur le débit du fleuve dans le Delta Intérieur du Niger. L'irrigation effectuée par l'Office du Niger réduit le débit du fleuve. L'incidence du réservoir de Sélingué varie selon les saisons et n'est pas assez directe. Le débit du fleuve diminue pendant la crue, mais augmente pendant la saison sèche (voir Figures 2.17 à 2.19). La Fig. 2.22 indique que le futur barrage de Fomi devrait avoir un impact plus considérable sur le débit du fleuve que celui de Sélingué.

Les conséquences de la réduction du débit du fleuve dans le Delta Intérieur Niger peuvent être analysées de deux manières. Etant donné que le niveau d'eau et le débit du fleuve sont mesurés dans différentes stations hydrologiques, il est possible d'effectuer une analyse statistique en vue de prévoir le niveau d'eau et le débit en aval, à partir des données recueillies en amont. Cette analyse sera effectuée à la Section 3.7. La seconde approche consiste à utiliser le modèle du bilan hydrique du RIBASIM. Cette approche est décrite dans la présente section.

La partie SO du Delta Intérieur est inondée 1 à 2 mois avant la partie NE. Cette situation complique sérieusement l'étude du bilan hydrique pour l'ensemble de la zone. C'est la raison pour laquelle Passchier et al. (2004) ont divisé le Delta Intérieur en huit zones (Fig. 3.13). A cette étape, les zones situées à l'ouest et au nord du bassin appelé «Sud de Diré» ont été ignorées. Passchier et al. (2004) utilisent les cartes hydrographiques établies à l'aide des images satellite présentées à la Fig. 3.5 pour calculer le rapport entre le niveau d'eau et la superficie de la zone couverte par l'eau pendant le flux et le reflux des eaux pour chacune des huit zones (Annexe 4). Par la suite, cette information est utilisée pour déduire le



Fig. 3.13. Plaines submersibles du Delta Intérieur du Niger, répartie en huit zones. Les différentes nuances bleues indiquent la zone inondée pendant le flux des eaux à 23, 140, 317, 429, 511 cm (voir Fig. 3.5).

rapport entre le niveau d'eau et le volume d'eau.

La partie la plus ardue de l'étude du bilan hydrique est l'estimation du débit réel entre les huit zones. Le temps d'écoulement de l'onde haute à travers le Delta varie en fonction de l'ampleur de l'inondation. Lorsque l'inondation est de faible ampleur, le temps d'écoulement est de 1 à 2 mois. Mais, ce temps peut être plus long si l'ampleur de l'inondation est plus grande. (Quensière et al 1994, Orange et al. 2002, Picouet et al. 2002, Zwarts & Diallo 2002). Au titre de ce modèle, l'on calcule le débit en multipliant une section transversale fixe par différents débits moyens. En définitive, un débit moyen de 0,08 m/s donne un temps d'écoulement d'environ 1,5 mois.

La prochaine étape consiste à déterminer la répartition de l'écoulement de l'eau à travers les différentes zones. Les ratios de bifurcation finale étaient de 25% à travers le Diaka, 30% à travers le Maya Kotia et le reste à travers le Niger. En outre, on suppose que 20% du débit du Bani bifurquait dans la zone d'inondation située entre le Bani et le Niger, près de Kouakourou.

Sur la base des estimations ci-dessus (voir également l'Annexe 4), le processus d'inondation peut être simulé. La simulation permet, notamment, de faire des approximations de l'effet de la réduction de l'écoulement des eaux dans le Niger. Les réservoirs situés en amont du Delta Intérieur doivent également entrer en ligne de compte dans le modèle RIBASIM.

Comme expliqué au Chapitre 2.5, deux cas de figure du modèle RIBASIM ont été inclus dans la présente étude. Le premier a trait à une situation dans laquelle il n'y aurait aucune gestion du niveau d'eau au niveau du réservoir, ce qui est irréaliste. Par conséquent, le présent chapitre n'évalue que le deuxième cas, où l'on décrit l'impact des barrages dans une situation de production industrielle d'électricité, ce qui suppose la gestion complète du réservoir.

La Fig. 3.14 montre l'impact de l'Office du Niger et l'impact conjugué de l'Office du Niger et du réservoir de Sélingué sur le niveau d'inondation. Le niveau d'inondation est réduit de 5 à 25 cm, en raison de l'irrigation assurée par l'Office du Niger. L'impact de celui-ci est durement ressenti entre janvier et février. En raison des eaux libérées par Sélingué, le niveau de l'eau dépasse les 50 cm entre janvier et avril. Par conséquent, l'effet combiné de l'irrigation et du réservoir de Sélingué est que le niveau d'eau augmente de plus de 30 cm pendant ces mois. Le réservoir de Sélingué fait baisser le niveau d'inondation pendant la période d'août à octobre de 10 à 20 cm supplémentaires. Tel qu'indiqué plus explicitement à la Fig. 3.15, l'impact des deux structures varie tout au long de l'année. En l'absence du Sélingué et de l'Office du Niger, le niveau d'inondation augmente de 20 cm en août et septembre et baisse de 30 cm au cours de la période de janvier à mars.



Fig. 3.14. Réduction du niveau d'inondation à Mopti (cm) en raison de l'irrigation assurée par l'Office du Niger et impact conjugué de cette irrigation et du réservoir de Sélingué. Il convient de noter qu'une baisse du niveau d'eau est positive, tandis qu'une hausse de ce niveau est négative. Source: WLIDelft Hydraulics.



Fig. 3.15. Variation saisonnière de l'impact de l'Office du Niger et de celui de l'Office du Niger + Sélingué sur le niveau d'inondation à Mopti; mêmes données que dans la Fig. 3.14.

#### Approche statistique

Le niveau d'inondation dans le Delta Intérieur peut être estimé avec précision à partir du débit du Niger et du Bani au niveau du Delta Intérieur à l'aide de l'analyse statistique. Ces prévisions sont fondées sur la comparaison de différentes séries périodiques du débit du fleuve et du niveau des eaux. Ces données seront utilisées pour vérifier la pertinence de modèle du bilan hydrique décrit plus haut.

#### Débit du fleuve et niveau d'inondation

Afin de mettre en exergue l'impact de l'irrigation et des réservoirs sur le Delta Intérieur, il est essentiel d'appréhender la relation entre le débit et le niveau d'eau dans le Delta Intérieur lui-même. Etant donné que Akka est situé dans la partie centrale du Delta, cette station hydrologique a été choisie aux fins de la



description de la fluctuation du niveau d'eau. Il faut approximativement un mois pour que les eaux qui affluent dans le Delta Intérieur parviennent à Akka. Par conséquent, nous comparons le niveau d'eau mensuel moyen à Akka avec le débit mensuel moyen des eaux du fleuve affluant dans le Delta Intérieur. Le débit est déterminé par la somme des débits à Ké-Macina, au bord du Niger à l'entrée du Delta Intérieur, et à Douna, au bord du Bani.

Lorsque le niveau d'eau mensuel à Akka est mis en rapport avec le débit du Niger+Bani au cours du mois précédent, une constellation de points apparaît, qui ne révèle l'existence d'aucune corrélation. Cependant, en ventilant les données par mois, le rapport entre le niveau d'eau et le débit du fleuve semble apparaître plus distinctement. Néanmoins, le rapport diffère selon les mois. Cela est illustré à la Fig. 3.16. La fonction de puissance pour les mois d'août, septembre et octobre étant exactement la même, ces trois mois sont réunies. La régression montre une cohérence très nette. Par conséquent, le niveau d'eau pendant la crue peut être



Fig. 3.16. Niveau d'eau à Akka en fonction du débit du fleuve à Ké-Macina et Douna au cours du mois précédent. Toutes les données découlent des mesures quotidiennes, mais ont été pondérées par mois. La figure montre séparément les corrélations pour quatre périodes: aoûtoctobre (bleu), novembre (rouge), décembre (jaune) et janvier+février (vert). Les équations de régression des fonctions de puissance sont également posées, ainsi que la variance expliquée (R<sup>2</sup>). calculé avec précision à l'aide du débit du fleuve.

La Fig. 3.16 montre également les corrélations entre l'écoulement du fleuve et le niveau d'eau pour les autres mois. Ces corrélations peuvent également être décrites à l'aide de fonction de puissance, mais la cohérence n'est pas aussi nette que pour la période d'août à octobre. Le graphique semble indiquer que tard dans l'année, le même débit du fleuve correspond à un niveau d'eau plus élevé que plus tôt dans la saison. Cela s'explique par le fait que le débit pendant les mois précédents a déjà provoqué l'inondation du Delta Intérieur et que le débit du fleuve dans le mois suivant ne fait qu'augmenter de l'eau déjà présente dans l'étendue d'eau existante. En d'autres termes, le niveau d'eau à Akka est tributaire du débit entrant dans le Delta Intérieur un, deux, trois, quatre mois ou plus auparavant. Une régression multiple a révélé que le niveau d'eau en octobre pouvait parfaitement être prévu sur la base du débit en septembre. Le débit en juillet et août n'a aucune incidence sur le niveau d'eau en octobre. Par contre, le niveau d'eau en novembre dépend du débit du fleuve au cours des trois mois précédents (c'est-à-dire août, septembre et octobre). Il en va de même pour le niveau d'eau en décembre, qui est tributaire du débit en septembre, octobre et novembre. Les équations qui représentent le rapport entre le niveau d'eau à Akka en novembre ou décembre (cm) et le débit du Bani+Niger (m3/s) au cours des trois mois précédents sont posées ci-dessous. Il convient de noter que la variance très élevée R<sup>2</sup> indique que la cohérence est très nette.

Novembre	cm = exp(2, I)	$75 + 0,164^{10}(0) + 0,173^{10}(S) +$
0,066*ln(/	4))	$(R^2 = 0,969)$

Décembre $cm = exp(0,7)$	93 + 0,216*ln(N) + 0,122*ln(O) +	
0,306*ln(S))	$(R^2 = 0,970)$	3.6
où:		
cm = le niveau d'eau à A	kka en novembre ou décembre	
A, S, O ou N = le débit d	u Bani+Niger (m³/s) en août, septembre,	

3.5

### L'impact de l'irrigation et des réservoirs sur le niveau d'inondation

octobre ou novembre.

La fonction de puissance d'août à octobre, telle qu'indiquée à la Fig. 3.16, et les deux fonctions séparées de novembre et décembre présentées dans les équations (3.5) et (3.6) peuvent à présent être utilisées pour calculer le niveau d'eau résultant du débit du fleuve au cours du mois précédent. Les calculs sont effectués pour les données du débit mensuel réel, ainsi que les débits du fleuve reconstitués représentant les différents scénarios évoqués au Chapitre 2. Ces scénarios intègrent les débits du fleuve en l'absence de toute irrigation, en l'absence du barrage de Sélingué et avec le barrage de Fomi. Par la suite, des comparaisons sont établies entre les trois séries reconstituées des niveaux d'eau mensuels et les niveaux d'eau mensuels réels. Les résultats sont indiqués dans les premières colonnes du Tableau 3.4. La cohérence de l'analyse de régression est extrêmement nette.

Les équations de régression peuvent, à présent, être utilisées pour illustrer l'impact de l'irrigation et du réservoir de Sélingué, ainsi que du futur réservoir de Fomi, sur le niveau d'eau à Akka. L'impact de ces trois structures, qui a été décrit dans les colonnes de droite du Tableau 3.4, est tributaire du niveau d'eau, mais varie également selon les mois.

• Office du Niger: L'Office du Niger réduit le niveau d'eau à Akka d'environ 10 cm, lorsque le niveau de l'eau est de 250 cm et le fait tomber graduellement à

5 cm lorsque le niveau d'eau atteint 550 cm. L'étude du bilan hydrique présentée à la section précédente a révélé que l'Office du Niger causait une baisse du niveau de d'eau de l'ordre de 5 à 10 cm, ce qui concorde parfaitement avec les prévisions statistiques.

- Sélingué: Le réservoir de Sélingué réduit de 15 à 20 cm supplémentaires le niveau d'inondation de septembre à décembre, ce qui corrobore exactement, une fois de plus, les conclusions de l'étude du bilan hydrique (Fig. 3.15). Les mois ne diffèrent pas pour les niveaux d'inondation moyen et élevé. Toutefois, lorsque le niveau d'eau est bas, l'impact du réservoir de Sélingué en septembre est deux fois plus important qu'en décembre. Cette différence est prévisible, dans la mesure où le volume d'eau retenu dans le réservoir est important au début de la vague d'inondation et baisse graduellement au cours des mois suivants (Fig. 2.18).
- Fomi: L'impact du réservoir de Fomi a été simulé en supposant que la réduction de l'inondation serait étroitement liée à la gestion du réservoir de Sélingué,

Tableau 3.4. Niveau d'eau à Akka (cm) sans l'irrigation assurée par l'Office du Niger ni le réservoir de Sélingué («sans ON & Sél»), sans l'irrigation assurée par l'Office du Niger mais avec l'existence du réservoir de Sélingué («sans ON & et avec Sél»), et avec l'irrigation assurée par l'ON, et deux barrages – les barrages de Sélingué et de Fomi («actuelle + Fomi») en fonction du niveau d'eau actuel Akka (cm). La fonction linéaire est donnée pour quatre mois (a = constante, b = pente); R<sup>2</sup> = la variance expliquée. L'écart entre le niveau d'eau prévu et le niveau d'eau actuel d'après l'équation de régression est indiqué dans les colonnes de droite; les valeurs ne sont pas indiquées lorsqu'il est impossible de mesurer effectivement le niveau d'eau.

Scénario	Mois	а	b	R <sup>2</sup>	Niveau d'eau Akka (cm) situation actuelle			
					250	350	450	550
Sans ON & Sél	Sept	43,5	+0,939	0,938	28,3	22,2		
	Oct	43,2	+0,937	0,981	27,5	21,2	14,9	
	Nov	43,5	+0,942	0,999	29,0	23,2	17,4	11,6
	Déc	32,1	+0,974	0,998	25,6	23,0	20,4	17,8
Avec ON & sans Sél	Sept	13,4	+0,974	0,999	6,9	4,3		
	Oct	14,7	+0,975	0,999	8,4	5,9	3,4	
	Nov	16,9	+0,975	0,999	10,7	8,1	5,6	3,1
	Déc	19,8	+0,975	0,999	13,6	11,1	8,6	6,0
Situation actuelle + Fomi	Sept	-155,6	+1,231	0,938	-97,9	-74,8		
	Oct	-119,2	+1,178	0,839	-74,7	-56,9	-39,1	
	Nov	-106,4	+1,130	0,974	-73,9	-60,9	-47,9	-34,9
	Déc	-48,4	+1,020	0,974	-43,4	-41,4	-39,4	-37,4



mais multiplié par 2,9. Il convient de noter que 2,9 correspond au ratio des volumes d'eau à Fomi et Sélingué. L'impact du futur réservoir de Fomi sur l'inondation du Delta Intérieur sera considérable. Même avec un niveau d'inondation de 450 cm et plus, le niveau d'eau serait réduit de 35 à 40 cm. Cette réduction s'accentuerait et serait de 50 à 100 cm avec un niveau d'inondation plus bas au début de la saison.

## **3.7** Statistiques annuelles relatives à l'inondation

Le processus d'inondation du Delta Intérieur connaît une variation annuelle considérable. Les prochains chapitres analyseront la mesure dans laquelle les valeurs écologiques et économiques du Delta Intérieur sont tributaires de l'ampleur de l'inondation. En déterminant cette relation, nous pouvons estimer les impacts en aval, de la baisse du débit du fleuve provoquée par l'irrigation et la gestion du réservoir en amont, sur l'économie et l'écologie du Delta.

Afin de déterminer le lien entre l'inondation et les impacts en aval, il convient d'abord de définir la méthode de mesure du niveau de l'inondation à adopter. Il existe au moins cinq manières de décrire la fluctuation annuelle de l'inondation: 1) niveau maximum d'inondation, 2) superficie inondée maximum, 3) durée de l'inondation, 4) débit annuel ou 5) débit maximal des eaux du fleuve débordant dans les plaines submersibles. Néanmoins, chacune de ces mesures peut être décrite de plusieurs manières. A titre d'illustration, le niveau d'inondation du Delta Intérieur a été mesuré dans plusieurs stations hydrologiques. Il existe une forte corrélation entre toutes ces variables, dans la mesure où le débit du fleuve détermine le niveau d'inondation maximal, ainsi que la superficie de la zone inondée.

Ensuite, nous devons déterminer laquelle des mesures d'inondation révèle le lien le plus étroit entre la production halieutique, pastorale ou rizicole annuelle. Cette mesure est susceptible de faire apparaître des différences entre secteurs. Par exemple, la production halieutique s'expliquerait probablement mieux par la superficie de la zone inondée et la durée de l'inondation. Par contre, la production rizicole devrait surtout dépendre du niveau maximal d'inondation et du moment de l'année où les rizières sont inondées. Enfin, la production pastorale pourrait dépendre essentiellement de la production d'une espèce d'herbe flottante (i.e. «bourgou»), qui dépend à son tour du niveau maximal d'inondation et de la durée de l'inondation. Cette section donne un aperçu des corrélations qui existent entre les différentes statistiques relatives à l'inondation. La section suivante aborde la question de l'impact du réservoir de Sélingué, de l'Office du Niger et du futur barrage de Fomi sur les différentes séries de données. Une synthèse de toutes les mesures et des valeurs qui en ont été déduites est présentée à l'Annexe 5.

#### Débit du fleuve et inondation

La Fig. 3.16 indiquait déjà comment le niveau d'inondation en septembre et octobre était déterminé par le volume des flux d'eau vers le Delta un mois auparavant. Plus tard dans la saison, le niveau d'inondation est fortement tributaire de l'écoulement du fleuve au cours des trois précédents mois (Tableau 3.4). Le niveau d'inondation maximal est également étroitement lié à l'écoulement des eaux au cours des précédents mois. Lorsque le niveau d'inondation maximal à Akka est mis en rapport avec le débit combiné du Niger et du Bani, la cohérence est la plus nette en prenant le niveau d'inondation comme une fonction de l'écoulement du fleuve en septembre (voir Equation 3.7 ci-dessous). cm = 17.762 débit<sup>0.3872</sup> (R<sup>2</sup> = 0.8902) 3.7

#### cm = 17,762 débit<sup>0,3872</sup> (R<sup>2</sup> = 0,8902) où:

cm = niveau d'eau maximal à Akka

#### débit = débit du fleuve (m³/s) pour Ké-Macima+Douna en septembre.

La cohérence s'améliore davantage lorsque le niveau d'inondation est mis en rapport avec l'écoulement moyen du fleuve en août, septembre et octobre.  $cm = 16,801 \text{ débit}^{0,4038}$  (R<sup>2</sup> = 0,9313) 3.8 où:

cm = niveau d'eau maximal à Akka

débit = débit moyen du fleuve (m³/s) pour Ké-Macima+Douna d'août à octobre.

La superficie de la zone inondée est étroitement liée au niveau d'inondation (Section 3.4). Lorsque la superficie inondée maximale pour les différentes années est mise en rapport avec le débit du fleuve, la fonction devient:  $km^2 = 24,497 débit^{0,7651}$  ( $R^2 = 0,9245$ ) **3.9** où:

km<sup>2</sup> = superficie inondée de la zone indiquée à la Fig. 3.9-3.11 débit = débit moyen du fleuve (m<sup>3</sup>/s) pour Ké-Macima+Douna d'août à octobre. Il existe une forte corrélation entre le débit, le niveau d'inondation et la superficie inondée annuelles de pointe. En statistique, ceci revient à dire que ces trois variables décrivent le même processus.

#### Niveau et durée d'inondation

Le niveau d'inondation est étroitement lié à la durée de l'inondation. Pendant une année où le niveau d'inondation maximal est élevé dans le Delta Intérieur. l'inondation dure quatre mois, ce qui est plus long qu'en année de faible inondation. Tel qu'indiqué à la Fig. 3.17, l'onde arrive un mois auparavant et demeure pendant trois mois supplémentaires. Afin de constituer cette figure, toutes les mesures effectuées depuis 1944 ont été subdivisées en six catégories, en fonction du niveau d'eau le plus élevé dans cette année précise. A Mopti, un niveau maximal d'inondation compris entre 450 et 500 cm a été enregistré pendant trois années (1984-85, 1987-88, 1993-94). Pour ces trois années, on a calculé le niveau moyen des eaux par date. On a procédé de la même façon pour les autres catégories: 500 à 550 cm (n = 6), 550 à 600 cm (n = 9), 600 à 650 cm (n = 7), 600 à 650 cm (n = 20) et 650 à 700 cm (n = 12). Outre le fait que l'onde d'inondation dure

plus longtemps lorsque l'inondation a une plus grande ampleur, la Fig. 3.17 montre que le niveau de pointe est atteint plus d'un mois après, si l'inondation est d'une grande ampleur. Il convient de relever que l'Annexe 5 présente le niveau d'eau maximal par an pour deux stations (i.e. Akka et Mopti), ainsi que la date spécifique de ce niveau de pointe. Les détails relatifs à la variation annuelle des dates d'inondation sont fournis par Zwarts & Diallo (2002).

La partie centrale du Delta Intérieur à un niveau de 300 cm, selon l'échelle d'Akka, est recouverte d'eau pendant 41% de l'année. Cependant, en raison des variations du niveau d'inondation, la couverture par l'eau varie entre 15% et 65% de l'année (Zwarts & Diallo 2002). La Fig. 3.18 présente le rapport entre la durée de l'inondation et le niveau d'eau maximal pour différentes zones à des niveaux de 100, 200 et 300 cm, respectivement. Les données sont calculées pour Akka, situé dans la partie centrale du Delta, à l'aide des mesures quotidiennes du niveau d'eau. Chaque point correspond à la moyenne d'une année. La pente positive des trois courbes indique une relation étroite entre le niveau d'eau maximal et la durée de l'inondation. Pour les années où l'on enregistre une inondation de très grande

ampleur, une partie du Delta Intérieur reste inondée au début de l'année hydrologique suivante qui commence le 1er mai. Par conséquent, le niveau d'eau de l'année précédente explique partiellement la variation observée le long des lignes de régression indiquées à la Fig. 3.18. Cependant, cette variation est faible. Par conséquent, on peut toujours valablement conclure que le niveau d'inondation maximal et la durée de l'inondation sont des données statistiques échangeables.



Fig. 3.17. Niveau quotidien moyen des eaux à Mopti pendant l'année hydrologique (1er mai-30 avril) pour six différents niveaux d'inondation.



Fig. 3.18. Relation entre le niveau d'eau maximal et la durée de l'inondation des plaines submersibles à trois niveaux différents: 100, 200 et 300 cm, d'après le l'échelle d'Akka (% de l'année hydrologique 1er mai-30 avril de l'année suivante). Les données découlent de toutes les mesures quotidiennes effectuées depuis 1956 à 2004; chaque point correspond à une année.

## **3.8** Analyse de scénario relative à la zone inondable

Les Sections 3.5 et 3.6 ont décrit l'impact de l'irrigation et des réservoirs sur le niveau d'inondation. Les résultats des calculs de bilan hydrique concordent avec les analyses statistiques relatives à l'impact de l'irrigation et du réservoir de Sélingué sur le niveau d'inondation dans le Delta Intérieur. En raison de la similitude des deux approches, une seule méthode sera appliquée dans les chapitres à suivre. Il s'agit de l'analyse statistique.

Outre les données initiales sur le niveau d'inondation, le débit du fleuve et l'utilisation de l'eau. l'Annexe 5 présente également un aperçu des équations utilisées pour prévoir les niveaux d'eau mensuels et le niveau d'eau maximal. Lorsqu'on ajoute le volume d'eau utilisé par l'Office du Niger et le réservoir Sélingué par mois au débit actuel du fleuve, le débit reconstitué peut être pris en compte dans l'équation relative au niveau d'inondation par rapport au débit du fleuve en vue de déduire le niveau d'inondation. En procédant ainsi, on calcule le niveau d'eau moyen en octobre et novembre pour les quatre scénarios. Bien que ces détails ne soient pas fournis à l'Annexe 5, les niveaux d'inondation peuvent être calculés à l'aide des équations qui y sont énoncées. La même Annexe décrit également comment le niveau d'eau maximal dans les quatre scénarios est déduit des niveaux d'eau prévus en novembre.

La relation entre le niveau d'eau à Akka et la superficie inondée dans le Delta Intérieur du Niger a été calculée à la Section 3.5 (voir équation 3.5). Cette équation est, à présent, utilisée pour calculer la superficie inondée dans les quatre scénarios. La Fig. 3.19 présente l'impact de l'irrigation et des réservoirs sur le niveau d'eau maximal à Akka et la superficie inondée maximale. En l'absence de l'Office du Niger, la superficie inondée augmenterait de 300 km<sup>2</sup>, tandis qu'elle augmenterait de 600 km<sup>2</sup> sans Sélingué. La réduction absolue de la superficie est quasiment la même en septembre, octobre et décembre. L'impact du barrage de Fomi serait plus élevé. La superficie inondée passerait de 2 000 à 2 300 km<sup>2</sup>, ce qui







Fig. 3.19. Variation annuelle du niveau d'eau maximal à Akka et de la superficie inondée maximale dans le Delta Intérieur en novembre. L'impact de l'irrigation assurée par l'Office du Niger et des réservoirs actuel de Sélingué et futur de Fomi est présenté.

signifierait une réduction de la zone inondable de 48% en septembre et de 25% dans les mois suivants.