

Vers une nouvelle extension de l'outil OPIDIN

A&W-rapport 1528

Adresse de visite
Suderwei 2
9269 TZ Feanwâlden

Adresse postale
Boite postale 32
9269 ZR Feanwâlden
Téléphone +31 (0)511 47 47 64
Fax +31 (0)511 47 27 40
info@altwym.nl

www.altwym.nl

commandé par



WETLANDS
INTERNATIONAL

Vers une nouvelle extension de l'outil OPIDIN

A&W rapport 1528

Zwarts, L.

Photo couverture

Diafarabé, Delta intérieur, novembre 2009

Zwarts, L. 2010

Vers une nouvelle extension de l'outil OPIDIN , A&W rapport 1528

Altenburg & Wymenga ecological consultants, Feanwâlden

L'étude a été financée par Wetlands International

L'étude a été réalisée dans le cadre de zones humides et des moyens d'existence du projet: GIRE (*Gestion Intégrée des ressources naturelles de*) Dans Le bassin du Niger en amont de Taoussa

Commandé par

Wetlands International

Horapark 9

6717 LZ EDE

The Netherlands

Réalisé par

Altenburg & Wymenga ecological consultants

Boite Postale 32

9269 ZR Feanwâlden

Tél (0511) 47 47 64

Fax (0511) 47 27 40

info@altwym.nl

www.altwym.nl

Numéro de project

1573

Chef de project

L. Zwarts

Statut

Rapport final

Autorisation

Approuvé

Signé

E. Wymenga

Date

29 Juillet 2010



TABLE DES MATIERES

1	Introduction	1
2	Le modèle actuel	3
3	Possibles extensions supplémentaires d'OPIDIN	5
3.1	Séries à plus long terme	5
3.2	Indiquer l'intervalle de fiabilité	5
3.3	Enquêter sur l'impact de la consommation d'eau en amont	5
3.4	Des stations hydrologiques supplémentaires	6
3.5	Prédictions de décrues	6
3.6	Prédictions des inondations	6
4	Des possibilités supplémentaires d'améliorer OPIDIN ?	9
4.1	Utiliser les données des stations hydrologiques plus en amont	9
4.2	Utiliser les précipitations dans le Niger Supérieur	9
5	Mise en pratique de OPIDIN	11
5.1	Un système d'alerte précoce	11
5.2	Un outil de planification spatiale	12

Annexe 1 : Une classification du niveau de la pointe de crue dans le Delta intérieur du Niger

Annexe 2 : Exemple : Prédiction de la chronologie de la décrue

Annexe 3 : Exemple : Prédiction de l'accès aux pâturages à Diafarabé pendant la décrue

1 Introduction

OPIDIN1 est un modèle prédictif visant à établir des prévisions sur les crues du Delta intérieur du Fleuve Niger lorsque le niveau de l'eau commence à monter. Une première version de OPIDIN2 a été développée en 2009 dans le cadre d'une étude réalisée par Royal Haskoning en collaboration avec Altenburg & Wymenga Ecological Consultants et Wetlands International. Cette étude a été financée par "Partners for Water", une initiative conjointe de six départements du gouvernement des Pays-Bas.

Wetlands International (Séveré) a pris l'initiative d'explorer les possibilités d'étendre le modèle et a demandé à A & W d'étudier la manière dont OPIDIN pouvait être étendu et amélioré.

Le travail a été effectué dans le cadre du projet sur les zones humides et moyens de subsistance : GIRE (Gestion Intégrée des ressources naturelles), dans le bassin du Niger en amont de Taoussa. Compte tenu des modifications à prévoir dans le Delta intérieur du Niger en raison du changement climatique en cours, les prévisions des inondations prendront davantage d'importance à l'avenir. En outre, OPIDIN peut fonctionner comme un système d'alerte précoce et constituer par conséquent un outil essentiel pour la population, qu'il s'agisse des pêcheurs ou agriculteurs, afin de les aider à atteindre la sécurité alimentaire.

¹ Acronym for Outil de Prediction des Inondations dans le Delta Intérieur du Niger

² Zwarts, L. (2009). - Predicting the annual peak flood level in the Inner Niger Delta. A&W-rapport 1254. Altenburg & Wymenga, ecological consultants, Feanwâlden. 18 pp.

2 Le modèle actuel

Une année présentant un niveau élevé de pointe de crue dans le Delta intérieur, les crues durent quatre mois de plus que durant une année connaissant de faibles crues. Comme le montre la Figure 1, la vague vient, lors d'une année humide, un mois plus tôt et se poursuit pendant trois mois supplémentaires. Pour concevoir cette figure, toutes les mesures quotidiennes conduites à Mopti (Sud du delta) depuis 1944 ont été subdivisées en six catégories sur la base du plus haut niveau de l'eau cette année-là. Trois années, présentent un niveau d'eau maximal compris entre 450 et 500 cm (1984 / 5, 1987 / 8, 1993 / 4). Pour ces trois années, le niveau d'eau moyen par jour a été calculé. Il en est de même pour les autres catégories : 500 - 550 cm (n = 6), 550 à 600 cm (n = 9), 600 - 650 cm (n = 7), 600 - 650 cm (n = 20) et 650 - 700 cm (n = 12). Outre le fait que l'onde de crue dure plus longtemps avec une plus grande crue, la Fig. 1 montre que le niveau maximum de pointe est atteint plus d'un mois plus tard, si la crue est élevée.

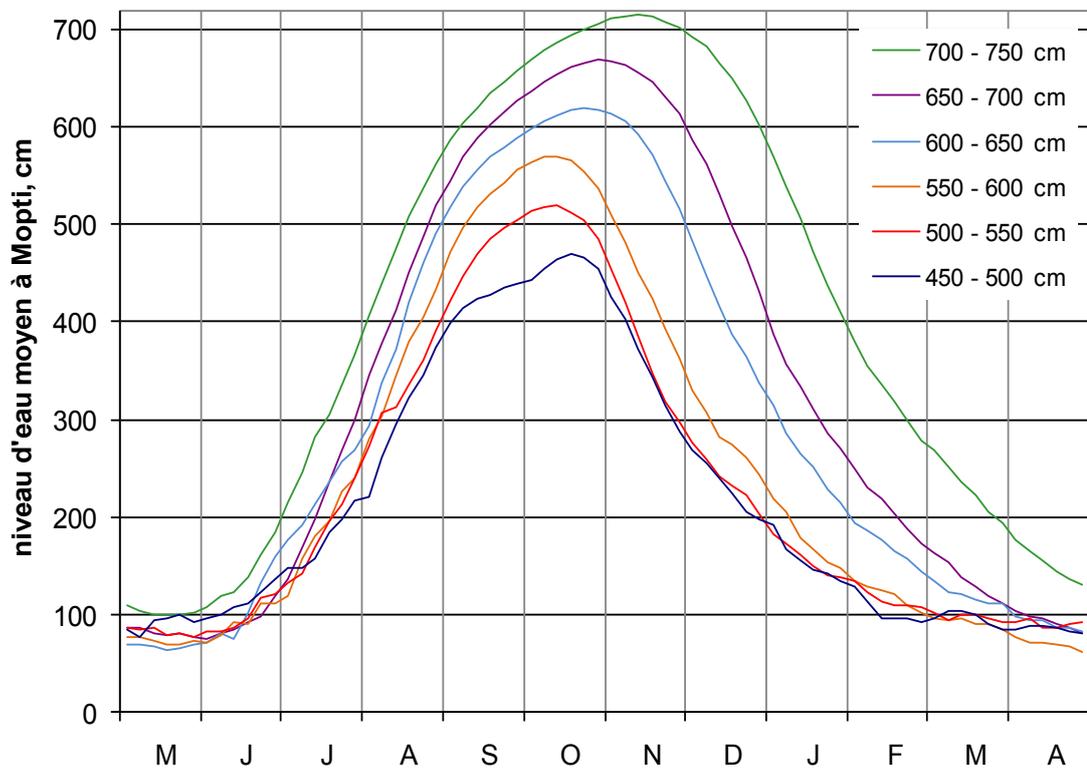


Figure 1. Moyenne quotidienne du niveau d'eau à Mopti au cours de l'année hydrologique (1er mai - 31 avril) pour six différents niveaux de crue. Le niveau d'eau par jour à Mopti a été mesuré depuis 1922 et mis à notre disposition par la DNH. Les données mesurées depuis 1944 ont été subdivisées en six catégories : années durant lesquelles le niveau d'eau maximal varie entre 450 et 500 cm, 500 et 550 cm, etc. Source : Zwarts, L. et Grigoras, I. 2005. *Flooding of the Inner Niger Delta*. – Dans : Zwarts, L., Beukering van, P., Kone, B. et Wymenga, E. (éds.), *The Niger, a lifeline*. RIZA / Wetlands International / IVM / A & W, pp. 43-77.

La Fig. 1 montre six courbes de crues, basées sur une lecture de l'échelle à Mopti. Le niveau d'eau à Mopti est en moyenne, en mai-juin, de 100 cm à l'échelle locale. Durant les années sèches, le niveau de crues s'élève à 380 cm au-dessus de ce niveau, tandis qu'il s'élève à plus de 600 cm durant les années humides. La Fig. 1 montre, là encore en moyenne, que le niveau d'eau en juin, et même en juillet, ne peut être utilisé pour prédire le niveau de pointe de crue. Toutefois, lorsque le niveau d'eau est encore faible en août, l'on peut être relativement sûr que le niveau maximal des crues sera également faible, alors qu'à l'inverse une importante crue peut être prévue si le niveau d'eau est élevé en août.

Le modèle actuel est basé sur les mesures quotidiennes du niveau d'eau à Mopti et à Akka (partie centrale du Delta intérieur du Niger) depuis 1956. Les données ont été mises à disposition par la DNH à Bamako et à Sévaré. Pour chaque année, le niveau d'eau maximal et les données auxquelles ce niveau a été atteint, ont été mis en relation avec le niveau d'eau tel que mesuré dans la même année les 10 Juillet, 20 Juillet, 30 Juillet, 10 août, 20 août, 30 août, 10 Septembre, 20 Septembre et 30 Septembre. Les fonctions peuvent être décrites à l'aide de régressions linéaires.

Ces analyses ont été effectuées pour les trois ensembles de données :

- Le niveau d'eau mesuré de juillet à septembre à Mopti afin de prédire le calendrier et le niveau de pointe de crue également à Mopti ;
- Le niveau d'eau mesuré de juillet à septembre à Akka afin de prédire le calendrier et le niveau de pointe de crue également à Akka ;
- Le niveau d'eau mesuré de juillet à septembre à Mopti afin de prédire le calendrier et le niveau de pointe de crue à Akka

Les analyses ont clairement montré qu'il n'existe pas de relation entre la pointe de crue et le niveau d'eau tel que mesuré en juillet. Le premier rapport OPIDIN fournit des tableaux contenant les pointes de crue prévues (date et niveau) – qui interviennent habituellement en novembre – en fonction du niveau d'eau mesuré en août et septembre. Les prédictions ne semblaient pas précises en août, alors qu'elles devenaient plus précises en septembre.

3 Possibles extensions supplémentaires d'OPIDIN

3.1 Séries à plus long terme

Le modèle existant est basé sur la série chronologique 1956-2007 ; les dernières années peuvent être ajoutées afin d'accroître la fiabilité des prédictions. En conséquence, toutes les équations de régression existantes vont changer et être intégrées de nouveau dans le modèle. Tous les tableaux devront changer également.

3.2 Indiquer l'intervalle de fiabilité

Le modèle existant indique les prévisions de crues et se réfère aux diagrammes de dispersion lorsque les pointes de crues ont régressé par rapport au niveau de l'eau en Juillet-Septembre (fourni également dans le premier rapport OPIDIN), élément considéré comme une indication sur la fiabilité des prédictions. Cela constituerait une amélioration importante pour, non seulement prédire la crue, mais également la limite inférieure et supérieure de l'estimation, l'intervalle de confiance.

3.3 Enquêter sur l'impact de la consommation d'eau en amont

Les équations de régression utilisées dans OPIDIN sont basées sur les données hydrologiques de 1956 à nos jours. L'hypothèse implicite du modèle est que la courbe de la crue et de décrue varie en fonction du débit du fleuve uniquement (Fig. 1). Cela pourrait toutefois ne pas être exact dans la mesure où nous savons que le réservoir de Sélingué est rempli en août et septembre (Fig. 2). En conséquence, la courbe de inondation dans le Delta intérieur du Niger pourrait avoir été modifiée depuis l'existence de Sélingué.

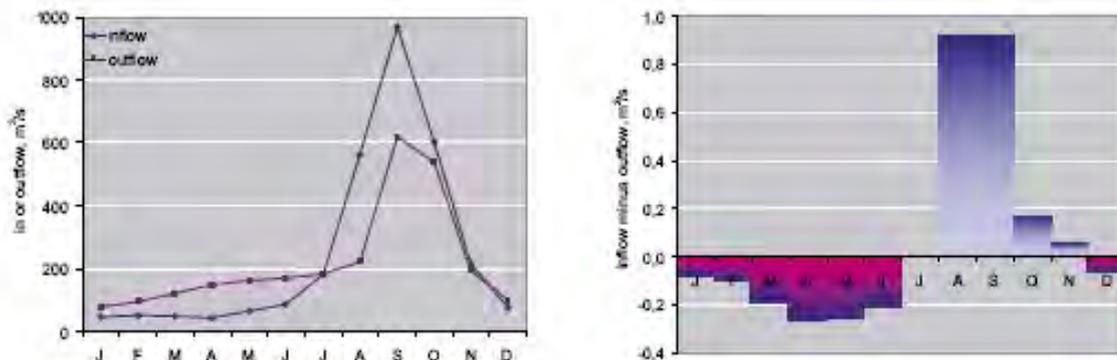


Figure 2. A GAUCHE : Moyenne des entrées et sorties mensuelles du réservoir de Sélingué (m³/s), sur la période 1982-2003 ; Source : EDM. A DROITE : En utilisant les mêmes données, la différence en m³/s par mois entre entrées et sorties dans le réservoir de Sélingué. Source : Zwarts, L., Cissé, N. & Diallo, M (2007) Hydrology of the Upper Niger - Dans : Zwarts, L., Beukering van, P., Kone, B. et Wymenga, E. (dir.), *The Niger, a lifeline*. RIZA/Wetlands International/IVM/A&W, pp. 15-42

Le modèle OPIDIN pourrait être recalculé uniquement pour 1982 et les années suivantes. Toutefois, en procédant de la sorte, toutes les années connaissant une importante crue seront exclues du modèle (voir annexe 1). Cela réduit la puissance statistique des équations de régression sur lesquelles le modèle est

construit. Néanmoins, il est utile d'analyser en détail dans quelle mesure les prédictions pourraient être améliorées lorsque la différence entre les courbes de crues, observées avant et après 1982, est prise en compte.

3.4 Des stations hydrologiques supplémentaires

Les prédictions concernant le Niger, entre le barrage de Markala et Mopti, peuvent être fondées sur les niveaux d'eau mesurés à Kirango juste en aval du barrage de Markala. En aval d'Akka, des mesures régulières du niveau d'eau sont disponibles pour Niafunké, Diré et Korioumé. Les pointes de crue dans ces stations peuvent être liées aux mesures du niveau d'eau dans les mois précédents, tels que prélevées dans ces stations elles-mêmes, mais aussi par rapport aux stations situées dans le sud du Delta intérieur du Niger.

3.5 Prédiction de décrues

Le modèle actuel compare les mesures du niveau d'eau en juillet-août à la pointe de crue (le calendrier ainsi que le niveau). De la même manière, les données qui indiquent la baisse du niveau d'eau jusqu'à un certain point au cours de la décrue, peuvent être régressées par rapport au niveau d'eau mesuré en Juillet-Août. Cette analyse peut être faite pour toutes les stations hydrologiques qui disposent de données suffisantes. L'annexe 2 donne déjà un exemple : la prédiction de la journée au cours de laquelle le niveau d'eau avait décliné à 200 cm lors de la décrue par rapport à l'échelle d'Akka en fonction du niveau d'eau mesuré.

3.6 Prédiction des inondations

Zwarts & Grigoras (2005) ont transposé les images par satellite du Delta Intérieur du Niger disponibles pour 24 dates différentes sur des cartes montrant la couverture réelle par la crue à un moment donné. Les niveaux d'eau à Mopti, Akka et Diré ont été mesurés pour ces dates de sorte que la relation entre la crue réelle et le niveau d'eau mesuré puisse être constatée. Ces cartes des eaux peuvent être combinées pour construire une carte composite des eaux, pouvant s'apparenter à un modèle numérique des crues. Cela a été fait séparément pour les montées et baisses des eaux. S'agissant des eaux descendantes, il a même été nécessaire d'élaborer un modèle pour les crues distinct pour les années ayant un niveau de pointe élevé et faible, compte tenu du fait que l'on observait davantage de plans d'eau temporaires et isolés suite à un niveau élevé de la pointe de crue.

L'inconvénient de ces cartes composites des eaux est que les intervalles entre les différents niveaux d'eau ont été inégaux. Pour créer une carte des eaux avec des intervalles égaux, la ligne d'eau a été interpolée à un niveau d'eau pour chaque tranche supplémentaire de 10 cm (soit 10, 20, 30 cm, etc.), en utilisant une technique d'interpolation pycnophylactique (pour plus de détails voir Zwarts & Grigoras 2005).

OPIDIN prédit le niveau d'eau dans le cadre du même cycle de crues. Ces prédictions peuvent être converties en cartes des eaux, en utilisant le modèle numérique des crues, décrit ci-dessus. Le modèle numérique des crues s'est basé sur les images satellite Landsat avec une résolution de 30 x 30 m. Cela

est apparu suffisamment précis pour décrire, même à un niveau très local, le processus de crue et de décrue.

Le modèle numérique des crues a été largement utilisé durant les travaux menés sur le terrain entre 2003 et 2010. Les cartes des eaux se sont avérées étonnamment précises, compte tenu du fait que les images satellite sélectionnées (utilisées pour élaborer les cartes des eaux) se réfèrent à la période 1984 - 2003. Apparemment, des changements spatiaux importants sont apparus dans le processus de crue au cours des 20-30 dernières années.

4 Des possibilités supplémentaires d'améliorer OPIDIN ?

4.1 Utiliser les données des stations hydrologiques plus en amont

La variation annuelle des crues du Delta intérieur du Niger peut être attribuée à la variation annuelle du débit des fleuves Niger et Bani. La station hydrologique de Mopti a mesuré le débit combiné de ces deux fleuves. Lorsque des stations hydrologiques plus en amont sont utilisées pour prédire le niveau des crues dans le delta intérieur du Niger, elles doivent être combinées pour les deux fleuves afin de décrire les crues en aval de Mopti. Kirango peut cependant être utilisé pour les plaines inondables le long du Niger en amont de Mopti, alors que les données de Douna ou Sofara peuvent être utilisées pour prédire les crues des plaines inondables le long du Bani inférieur.

La station hydrologique en amont de Kirango ne peut être utilisée dans le cadre d'OPIDIN si la consommation d'eau par l'Office du Niger au barrage de Markala est prise en compte. Toutefois, cela rend l'analyse si complexe que cela n'a aucun sens de le faire. Cela est également valable pour Douna dans la mesure où le barrage de Talo a un impact sur le débit du fleuve Bani.

En conclusion, Mopti, Akka et Diré peuvent ainsi être utilisés dans OPIDIN respectivement pour le Sud, le Centre et le Nord du Delta. L'utilisation d'autres stations hydrologiques ne présente aucune utilité, ou alors très localisée.

4.2 Utiliser les précipitations dans le Niger Supérieur

En théorie, il serait possible de prévoir la crue du Delta intérieur du Niger à un stade précoce en utilisant les données météorologiques du Niger supérieur, dans la mesure où les précipitations précèdent le débordement du fleuve. Toutefois, cela n'aurait de sens que s'il était possible d'obtenir pour chaque année les données pluviométriques des mêmes 20 à 30 stations pluviométriques dans le Bani supérieur et le Niger Supérieur. En pratique, cela pourrait entraîner un ralentissement important.

Il y existe cependant une alternative puisque la technologie par satellite permet une méthode différente de suivi des pluies. Les estimations quotidiennes ont été combinées par la NASA par période de dix jours à partir de juillet 1995 et peuvent être consultées instantanément sur Internet. Cependant, à partir des recherches antérieures, nous savons déjà que la crue du Delta intérieur du Niger n'est que partiellement due aux précipitations survenues dans le Niger supérieur et le Bani supérieur pendant les mois qui précèdent. Le débit du fleuve ne dépend pas seulement de la pluviométrie au cours des mois précédents, mais aussi des précipitations au cours des années précédentes. Ce système est en outre compliqué par les systèmes d'irrigation et les réservoirs d'eau qui, en extrayant et en détournant l'eau des fleuves, interfèrent ainsi avec le rythme naturel de l'écoulement.

En conclusion, nous ne gagnons rien à inclure dans le modèle OPIDIN les précipitations dans le Niger et le Bani Supérieurs.

5 Mise en pratique de OPIDIN

5.1 Un système d'alerte précoce

La vie de populations (rurales) dans le Delta intérieur du Niger est régie par les crues. Cela pourrait les aider de différentes manières si elles connaissaient quelques mois avant le niveau de pointe de crue, la date à laquelle ce niveau maximal sera atteint, le moment où le niveau des crues aura diminué jusqu'à un certain niveau, etc.

Le principal problème est de trouver un moyen de convertir les informations techniques, telles que «la pointe de crue sera de 511 cm (seuil de confiance : + / -23 cm) à l'échelle d'Akka» de sorte que les populations en saisissent véritablement tout le sens.

La première option consiste à classer les crues sur une échelle de cinq points (très élevé, élevé, normal, faible et très faible, voir annexe 1) et utiliser systématiquement ces cinq catégories dans le transfert d'informations. Heureusement, les populations ont une «mémoire collective» en ce qui concerne le niveau des crues par le passé et savent par exemple très bien qu'il n'y a pas eu de crue en 1994 et 1999 et que celle 1984 était très faible. Cela facilitera assurément le transfert des informations. L'on pourrait dire par exemple, "Le niveau des crues de cette année sera faible, - à peu près aussi élevé qu'en 2002, 2004 et 2005" (voir Fig. A3).

Lorsque les populations savent au mois d'août à quel type de crue elles doivent s'attendre, elles peuvent prendre leurs propres décisions :

- Les populations ayant construit une maison sur la partie inférieure du fleuve sauront par elles-mêmes que leur maison pourrait être inondée si la prévision de la crue est forte, aussi élevée qu'en 1994 ou 1999.
- Les populations procédant à des migrations temporaires (en laissant le Delta intérieur du Niger au cours des années à faible crue afin d'aller travailler ailleurs au Mali ou même à l'étranger), peuvent envisager de quitter leur village lorsqu'elles savent, dès le mois d'août, que les crues seront faibles.
- Les pêcheurs achètent plus de filets neufs, et plus souvent une nouvelle pirogue, lorsqu'ils savent que la crue sera élevée et qu'ils pêcheront par conséquent plus de poissons. Les captures sont fortement tributaires de la crue et à l'heure actuelle, ils n'entament leurs nouveaux investissements que lorsque la crue est déjà à un niveau très élevé. OPIDIN peut aider les pêcheurs à planifier leurs investissements en amont.
- L'accès aux plaines inondables inférieures au cours de la décrue pour le pâturage (voir l'annexe 3, pour un exemple).

Ces quatre exemples montrent que OPIDIN doit être utilisé avec prudence et que tout doit être fait pour éviter que le modèle ne donne une prédiction erronée. L'une des stratégies possibles consisterait à diffuser (par des appels téléphoniques à des personnes clés et par des messages dans les stations de radio locales) les nouvelles sur les crues à venir à plusieurs moments :

- Le 20 juillet : une prédiction très générale, basée sur l'intervalle de confiance calculé pour déclarer que la crue sera "très probablement faible ou normale, mais probablement pas forte» ou «probablement pas supérieure à la normale observée au cours des 5 dernières années"
- Le 1er août : une prédiction plus spécifique, si elle peut être déduite des mesures prises à l'échelle de Mopti pour cette date.
- Le 10 août, idem.
- Le 20 août, idem.

En dehors de cette information générale sur la pointe de crue, OPIDIN peut être utilisé pour donner des prédictions spécifiques, comme par exemple :

- A quel moment de la décrue, un lac ou une dépression, sera-t-il (elle) isolé (e) du système de crue ?
- A quel moment, au cours de la décrue, une plaine inondable deviendra accessible au pâturage du bétail, ou à la culture de décrue ?
- A quel moment le Niger, alors que l'eau baisse, sera trop peu profond pour permettre le transport par grandes pinasses ?

OPIDIN peut être en mesure de prédire, quelques mois auparavant, la date pour les trois exemples donnés, mais nécessiterait de savoir quand cet événement a eu lieu durant les années précédentes. La base de données des niveaux d'eau par jour doit être vérifiée afin de déterminer dans quelle mesure le niveau de la crue dans une station hydrologique voisine a diminué. Si les niveaux d'eau pour cet événement ne diffèrent pas trop pour les différentes années, le niveau moyen de l'eau peut alors être intégré dans OPIDIN pour calculer les équations prédictives, comme indiqué dans l'annexe 2 (Fig. A4). OPIDIN, cependant, ne sera pas en mesure de prédire la date de cet événement si le niveau de l'eau dans la station hydrologique voisine diffère d'année en année. Ceci est à prévoir si la masse d'eau dans la zone concernée est déjà déconnectée du système fluvial à un stade plus précoce. Ce n'est dans ce cas donc pas la décrue réelle, mais l'évaporation de l'eau, qui détermine le niveau local. L'annexe 3 traite longuement de ce problème.

5.2 Un outil de planification spatiale

Lorsque OPIDIN est combiné avec le modèle numérique des crues ou la carte numérique de la végétation (citée dans le livre *The Niger, a lifeline*), un modèle d'aménagement du territoire peut être élaboré. Trois exemples permettent d'illustrer ce à quoi un tel modèle pourrait ressembler.

Les oiseaux d'eau sont comptés chaque année durant l'hiver de l'hémisphère Nord sur des milliers de zones humides du monde entier. Le Delta intérieur du Niger est trop vaste pour pouvoir permettre d'y compter tous les oiseaux dans toute la région, de sorte que les lacs centraux de Korientzé, Debo et Walado ont été sélectionnés. Une analyse des chiffres (commencée en 1992) a montré que ce comptage doit être effectué avant le 1er Mars (lorsque les migrants du Nord commencent à retourner sur leurs lieux de reproduction), mais également lorsque le niveau d'eau à Akka est inférieur à 200 cm et que les plaines inondables ailleurs dans le Delta intérieur du Niger sont à sec. OPIDIN est maintenant utilisé pour déterminer le moment où le comptage annuel des oiseaux d'eau doit être réalisé (Fig. A4 à l'annexe A2).

Différentes espèces de hérons (grands échassiers piscivores) se reproduisant dans les forêts inondées de Akkagoun et Dentaka, se nourrissent à une distance de 10, 15 ou 20 km à partir de ces colonies de reproduction. La plupart des oiseaux d'alimentation se trouvent dans les champs de bourgou inondés par 10, 20 ou 30 cm d'eau. Un SIG a été utilisé pour tracer les zones d'alimentation potentielles pour différents niveaux de crue. En combinaison avec OPIDIN, le changement de la zone d'alimentation potentielle durant la saison de reproduction peut être indiqué. Cela peut nous aider à comprendre les facteurs qui limitent la taille des colonies de reproduction dans les différentes forêts pour des années qui connaissent des crues différentes.

L'annexe 3 montre comment OPIDIN pourrait être combiné avec des cartes des eaux dans l'analyse de la date à laquelle les bovins sont autorisés à entrer dans les champs de bourgou près de Diafarabé.

Annexe 1 : Une classification du niveau de la pointe de crue dans le Delta intérieur du Niger

Le niveau d'eau à l'échelle d'Akka est mesuré depuis le 1er janvier 1956, soit depuis 54 ans. Le niveau maximal annuel de crue a varié durant ces années entre 336 cm en 1984 et 625 cm en 1957 (Fig. A1).

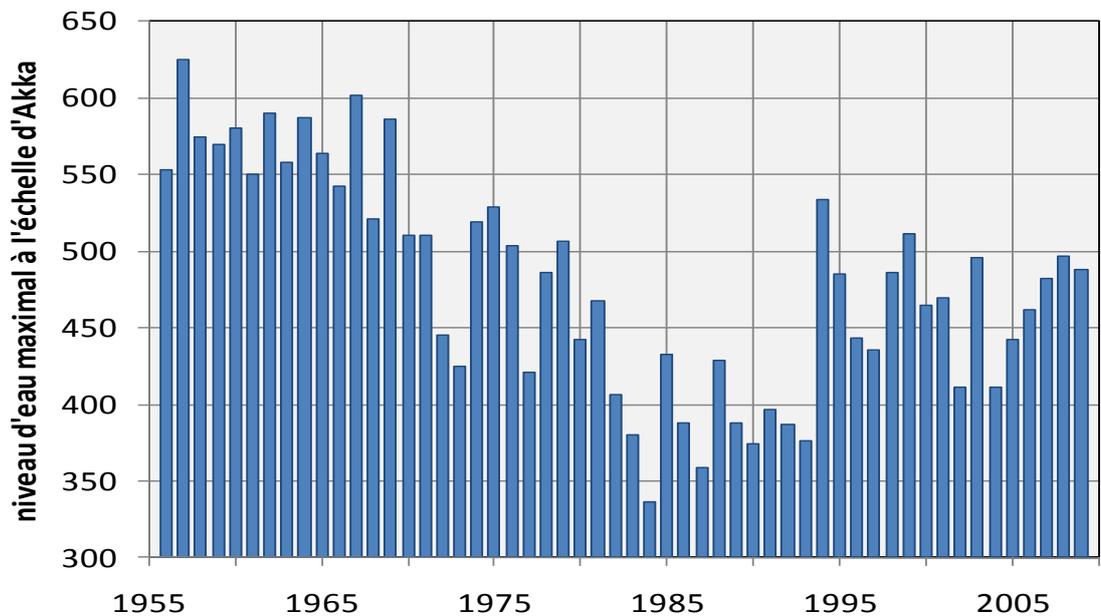


Figure A1. Le niveau d'eau maximal à l'échelle d'Akka entre 1956 et 2009.

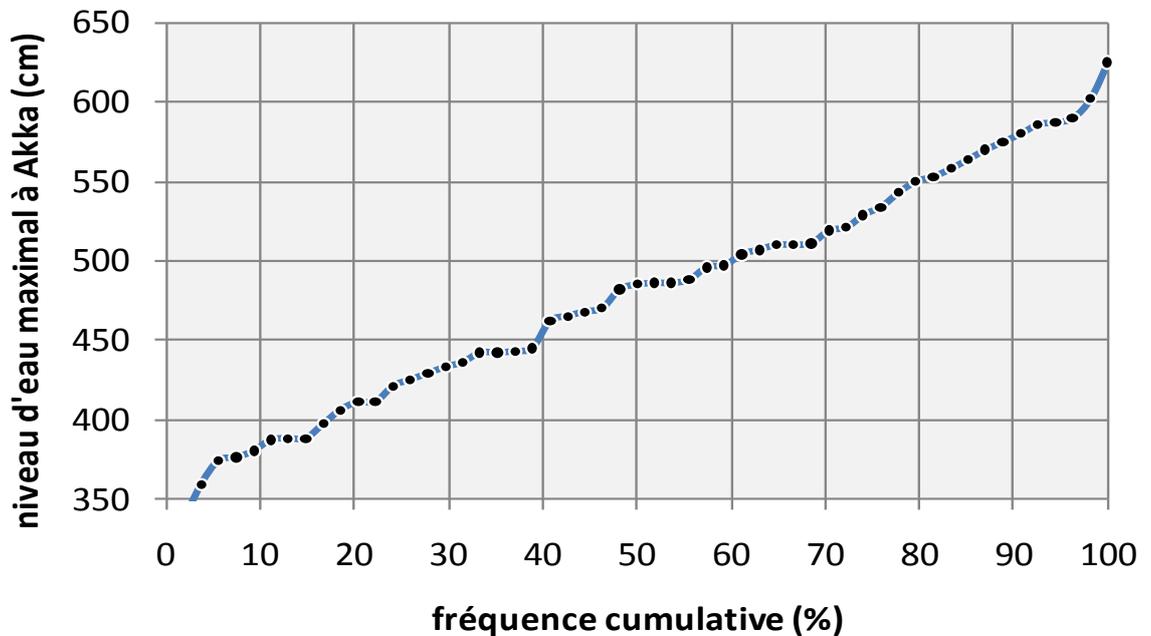


Figure A2. La répartition de la fréquence cumulative du niveau d'eau maximal sur Akka, calculée sur une période de 54 ans (1956-2009); mêmes données dans la Figure A1.

Les données ont été classées en fonction du niveau maximal pour aboutir à une répartition de la fréquence cumulative (Fig. A2). Par la suite, les années ont été divisées en cinq tranches de 20%. Les limites entre ces classes sont indiquées dans le Tableau A2.

Akka, cm	crue	fréquence
330-410	très faible	10x
411-450	faible	11x
451-500	normal	11x
501-550	fort	11x
551-625	très fort	11x

Tableau A1. Classification des niveaux de pointe de crue en cinq différentes catégories, en fonction des données fournies dans la Fig. A2.

En se servant de la classification fournie dans le Tableau A1, les données issues de la Fig. A1 peuvent être réorganisées de manière à montrer les cinq différentes catégories. Il est évident que toutes les années classées dans la catégorie 'très fort' sont toutes antérieures à 1970. Toutes les années couvertes par la mention 'très faible' se situent entre 1982 et 1993, tandis que les années les plus récentes ont été 'normales'.

Il faudrait noter que la classification dépend de la longueur de la période durant laquelle la répartition de la fréquence a été calculée. Les niveaux de crue atteints en 1994 et 1999 ont désormais été classifiés comme 'forts'. Si la classification était basée sur les 40 (au lieu des 54) dernières années, ces deux années auraient évidemment été classées dans la catégorie 'très fort'.

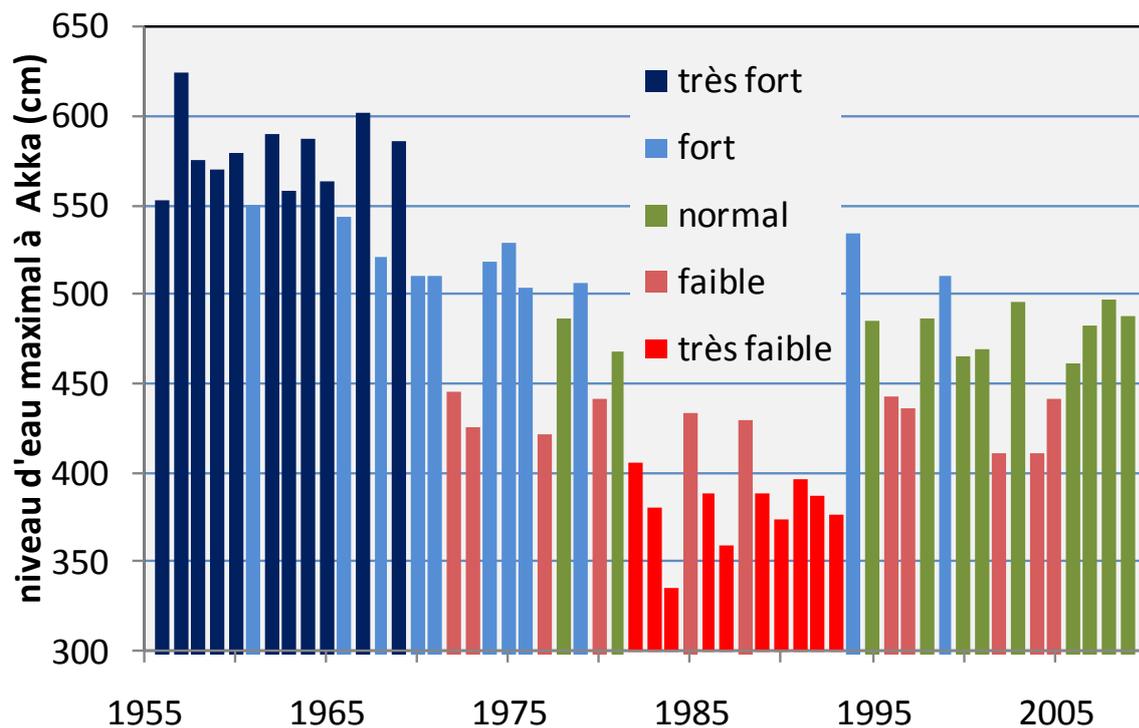
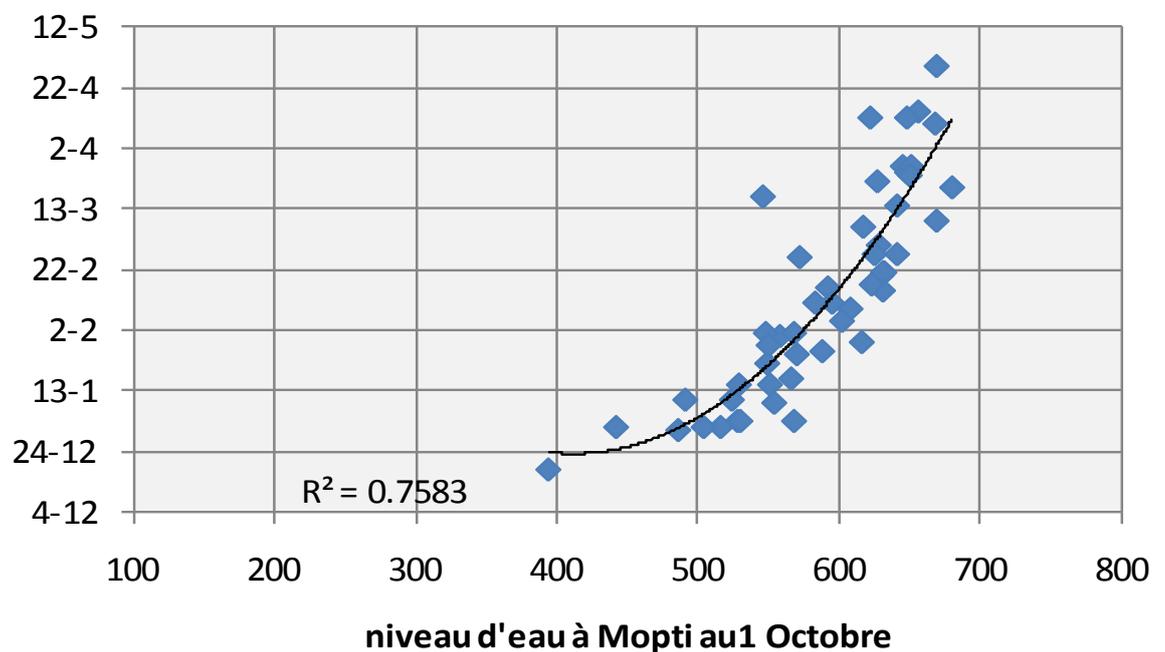


Figure A3. Les niveaux maximaux annuels à l'échelle d'Akka depuis 1956; Mêmes données que dans la Fig. A1, en utilisant toutefois cette fois-ci des couleurs différentes en rapport avec les cinq catégories distinguées (voir Tableau A1).

Annexe 2 : Exemple : prédiction de la chronologie de la décrue

Le niveau de pointe de crue peut être prédit quelques mois en avance. A l'aide de la même méthodologie, il est également possible de prédire la courbe de la décrue. En conséquence, il est possible de prédire la date d'accessibilité des plaines inondables pour le pâturage des troupeaux pendant le retrait de l'eau, etc. Comme le montre clairement la Fig. 1, la courbe des crues ne diffère pas beaucoup avant d'atteindre son niveau maximal ; cependant, la différence est bien plus grande pendant la décrue. Ainsi, le niveau des eaux peut être prédit durant la décrue, avec une exactitude remarquable alors même que l'eau continue à monter. La Fig. A4 montre le rapport entre le niveau d'eau à Mopti et la date à laquelle le niveau d'eau à Akka est descendu à un niveau de 200 cm.



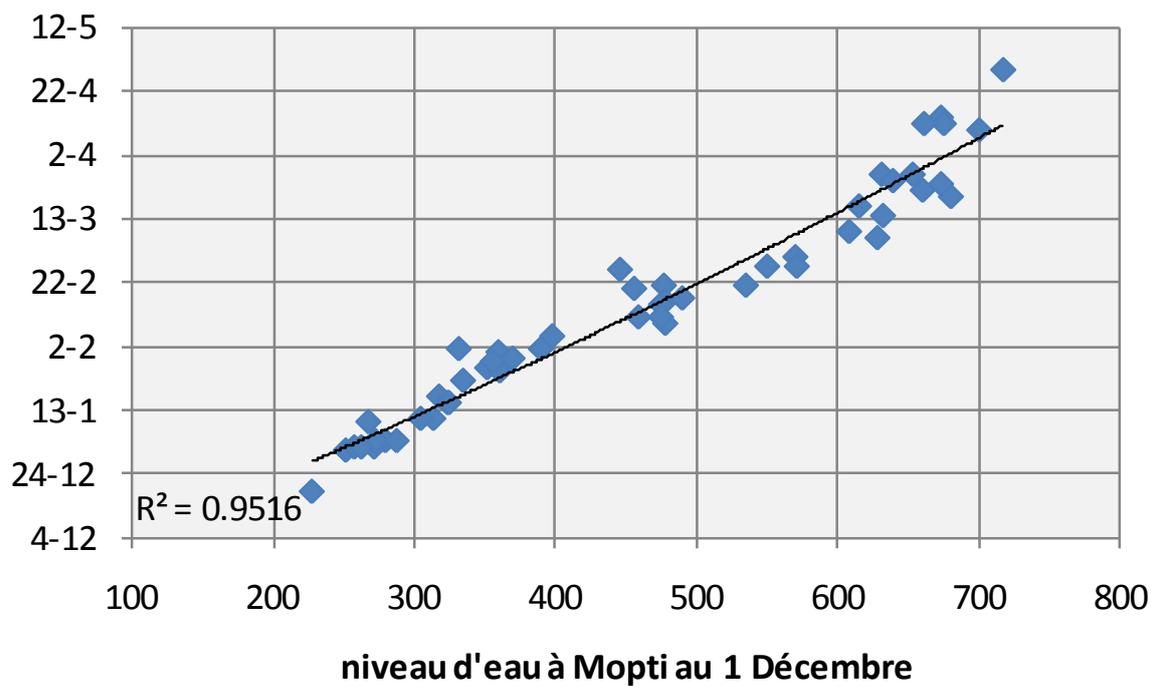
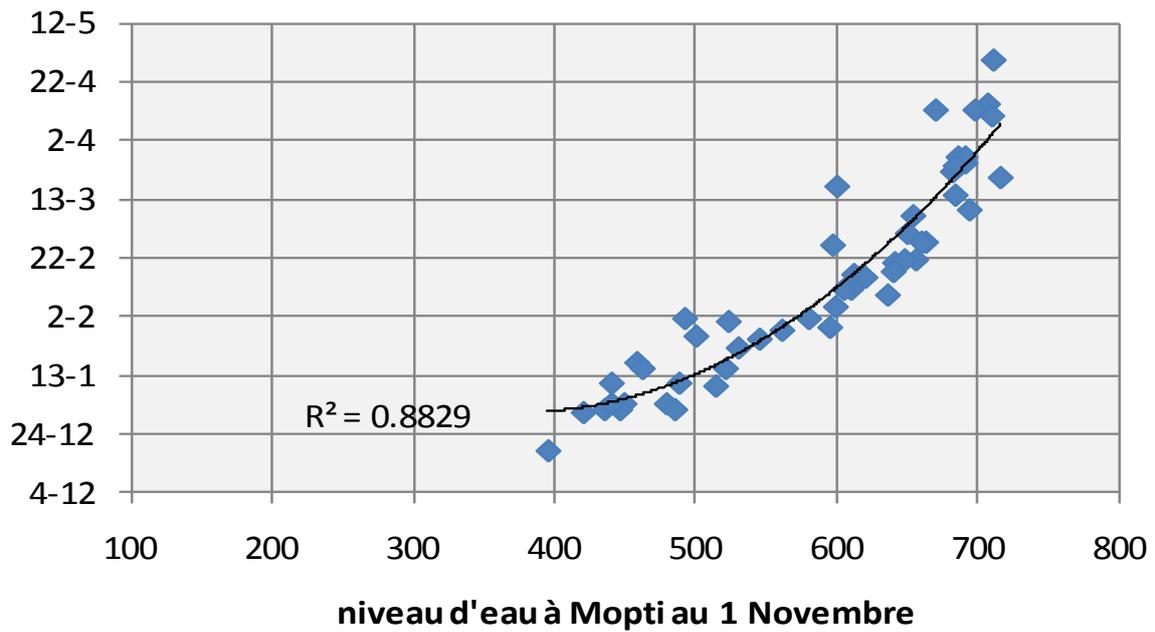


Figure A4. La relation entre le niveau d'eau à Mopti le 1er octobre, le 1er novembre et le 1er décembre et les données/dates auxquelles l'eau dans le même cycle de crue a suffisamment baissé pour atteindre un niveau de 200 cm à l'échelle d'Akka.

La fig. A4 montre la relation entre la date à laquelle le niveau de l'eau est descendu à 200 cm à l'échelle d'Akka et les plaines inondables exposées. Ce moment important dans le cycle de crue peut être prédit avec exactitude, à une quinzaine de jours près, au 1er octobre - fin décembre dans une année sèche et

début mai dans le cas d'une année très humide. La comparaison des trois graphiques dans la Fig. A4 révèle que la prédiction devient plus précise à une période avancée de la saison.

Il faut noter que les rapports basés sur les niveaux d'eau en octobre et novembre ne sont pas linéaires, mais curvilignes, puisque les données de la décrue ne peuvent pas être prédites de manière juste si le niveau de l'eau début octobre ou début novembre est faible.

En conclusion : les données telles qu'indiquées dans la Fig. A4 peuvent être utilisées pour produire des tableaux montrant les dates auxquelles la baisse de l'eau jusqu'à un certain niveau est prévue en fonction du niveau d'eau observé plusieurs mois auparavant.

Annexe 3 : Exemple: prédiction de l'accès aux pâturages à Diafarabé pendant la décrue

La présente section explorera les possibilités de prédire la date de traversée, la date d'accès, à Diafarabé en utilisant les mesures du niveau d'eau journalier à Kirango, à 135 km en amont de Diafarabé. L'analyse est fondée sur une base de données encore incomplète (et non corrigée), mais suffisamment importante pour donner une première impression sur la possibilité de mise en œuvre dans le cadre d'OPIDIN.

Prédiction de la date d'accès

La Fig. A5 montre la variation journalière du niveau d'eau à Kirango sur 25 ans. En dépit de nombreuses insuffisances dans la série, il a été possible de déterminer le niveau maximal de la pointe de crue pour toutes ces années (Tableau A2). Le niveau le plus bas de pointe de crue a été mesuré en 1984 (348 cm à l'échelle locale) et le summum en 1979 (604 cm).

Les crues atteignent leur niveau maximal essentiellement dans la seconde moitié de septembre. Le niveau de pointe de crue le plus bas jamais mesuré avait déjà été atteint à la date du 20 août. En moyenne, une crue importante atteint son niveau maximal 3 semaines plus tard que dans le cas d'une faible crue. Cependant, la variation est très importante (voir colonne 2 & 3 dans le Tableau A2).

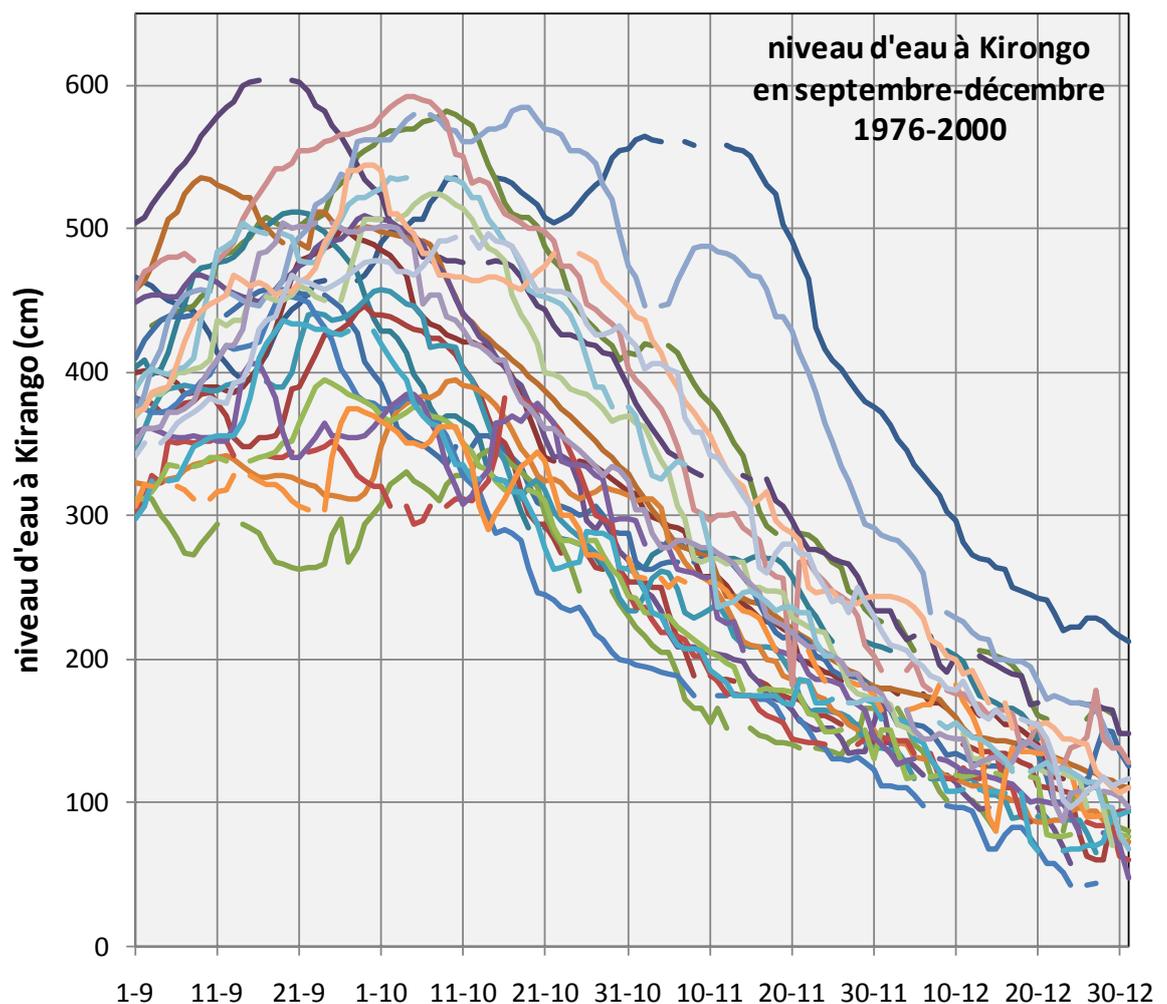


Figure A5. Le niveau d'eau à Kirango, juste en aval du barrage de Markala, tel que mesuré entre le 1-1-1976 et le 31-12-2000. Le graphique montre les mesures journalières pour la période du 1er septembre au 31 décembre. Données de DNH.

an	niveau d'eau max.		niveau d'eau baissé jusqu'à			accès à Diafarabe		
	cm	date	3.0 m	2.5 m	2.0 m	date	cm	jours
1976	564	2-11	9-12	17-12	3-1			
1977	500	26-9	2-11	12-11	20-11			
1978	582	9-10	16-11	26-11	15-12			
1979	604	16-9	19-11	28-11	13-12			
1980	512	20-9	18-10	20-11	10-12	22-11	236	63
1981	536	9-9	3-11	11-11	25-11	21-11	217	73
1982	458	17-9	28-10	15-11	23-11	13-11	265	57
1983	446	29-9	19-10	3-11	7-11	5-11	232	37
1984	348	20-8	21-10	24-10	5-11	11-10	328	52
1985	509	29-9	25-10	2-11	12-11	30-11	155	62
1986	457	1-10	22-10	5-11	18-11	22-11	163	52
1987	395	10-10	4-11	10-11	16-11	14-11	212	35
1988	453	19-9	14-10	19-10	29-10	26-11	130	68
1989	382	11-9	26-10	30-10	9-11	25-11	140	75
1990	394	24-9	20-10	30-10	11-11	24-11	149	61
1991	406	15-9	28-10	10-11	21-10	23-11	186	69
1992	436	19-9	19-10	1-11	9-11	14-11	174	56
1993	374	13-9	22-10	11-11	22-11	14-11	234	62
1994	584	9-9	28-11	6-12	14-12	17-12	198	99
1995	592	4-10	11-11	23-11	30-11	9-12	176	66
1996	524	21-9	6-11	15-11	25-11	30-11	172	70
1997	504	23-9	2-11	15-11	25-11	17-11	230	55
1998	536	4-10	9-11	15-11	25-11	25-11	202	52
1999	544	29-9	17-11	22-11	9-12	4-12	240	66
2000	496	14-10	15-11	24-11	4-12	25-11	240	42
moyen	485	24-9	2-11	13-11	23-11	21-11	204	59

Tableau A2. Le niveau maximal d'eau et la date à laquelle ce niveau est atteint à Kirango entre 1976 et 2000, sur la base des courbes montrées dans la Fig. A5. La date annuelle à laquelle le niveau d'eau est descendu à 3,0, 2,5 et 2,0 m pendant la décrue est tirée du même graphique. La date d'accès renvoie à la date à laquelle le bétail est autorisé à traverser le Fleuve Niger. Les deux dernières colonnes indiquent respectivement le niveau d'eau correspondant à cette date et l'espace de temps écoulé depuis la pointe de crue à Kirango (indiqué dans la colonne 3).

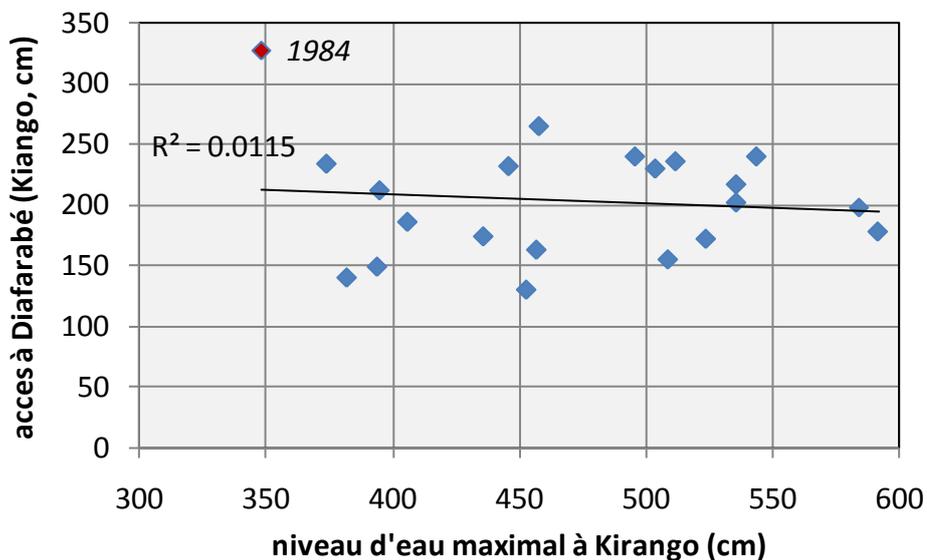
Pour prédire l'accessibilité des pâturages, il est tout d'abord nécessaire de mener une enquête pour déterminer si la date d'accès sélectionnée est liée à un niveau d'eau fixe. Cela semble être le cas, mais seulement dans une certaine mesure (partie supérieure de la courbe dans la Fig. A6). Le niveau d'eau était d'environ 200 cm à la date d'accès, et n'avait apparemment pas de rapport avec le niveau de crue. La seule exception a été l'année catastrophique de 1984 lorsque le niveau d'eau à la date d'accès s'est élevé à 328 cm.

La date d'accès se situait habituellement dans la seconde moitié de novembre, mais elle est intervenue plus tôt en 1984, année extrêmement sèche, et plus tard dans les années 1994 et 1995 qui ont été, quant à elles, des années humides (partie inférieure de la courbe dans la Fig. A6). La date d'accès se situait, en

moyenne, 2 mois après l'atteinte du niveau de pointe de crue (voir la dernière colonne dans le Tableau A2).

En poursuivant l'analyse, le niveau d'eau de 200 cm à Kirango est utilisé comme référence pour la période d'accessibilité aux champs de bourgou pour la pâture. Le rapport entre le niveau d'eau le 1er septembre et la date à laquelle le niveau d'eau est descendu à 200 cm est plutôt faible. La prédiction était à peine meilleure lorsque le niveau d'eau au 10 septembre a été mesuré. Le meilleur résultat a été obtenu lorsque le niveau de crue a été ramené à la date à laquelle le niveau d'eau lors de la décrue était de 200 cm (Fig. A7). Les lignes rouges sont tracées à 10 cm à partir de la ligne de régression calculée. Sur 4 des 16 années, la variation entre les données observées et celles prédites est de plus de 10 jours.

En conclusion, en se servant des données OPIDIN disponibles, l'on peut prévoir la date d'accès à Diafarabé lorsque le niveau de la pointe de crue est connu à Kirango, environ 2 mois plus tôt. Cependant, il est apparu que la prédiction de la date n'était pas tout à fait exacte. Pour améliorer la prédiction, il serait nécessaire d'intégrer dans la base de données, le niveau d'eau journalier mesuré depuis 2000. Par ailleurs, les niveaux d'eau journaliers mesurés à Kirango devraient être comparés avec prudence aux séries journalières de Mopti (245 km en aval de Kirango), afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'erreur.



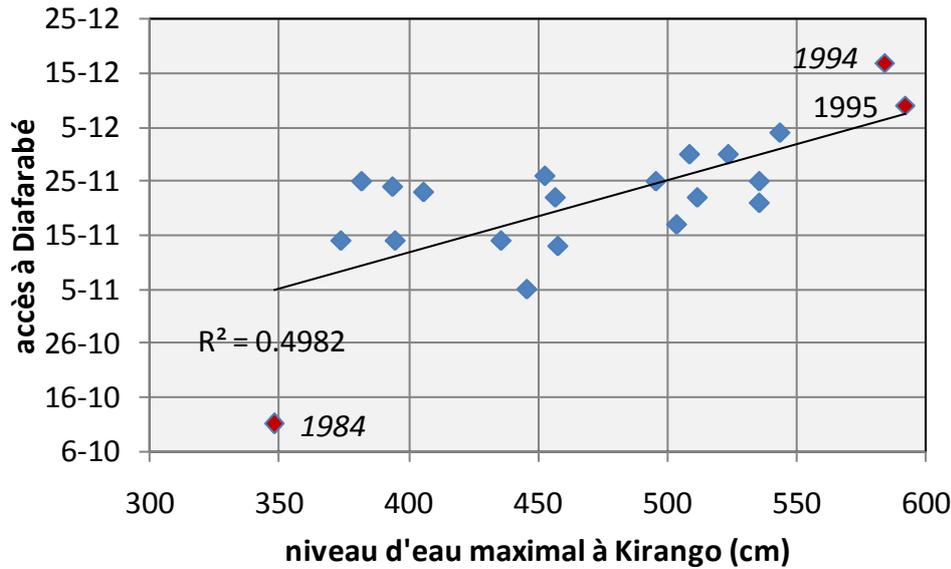


Figure A6. Le niveau d'eau à la date d'accès à Diafarabé utilisé comme une fonction du niveau maximal d'inondation à Kirango (courbe supérieure). La courbe inférieure donne la date d'accès comme fonction du niveau maximal d'inondation. Toutes les données sont tirées du Tableau A2 (colonne 2 et 8 pour la partie supérieure de la courbe et colonne 7 pour la partie inférieure).

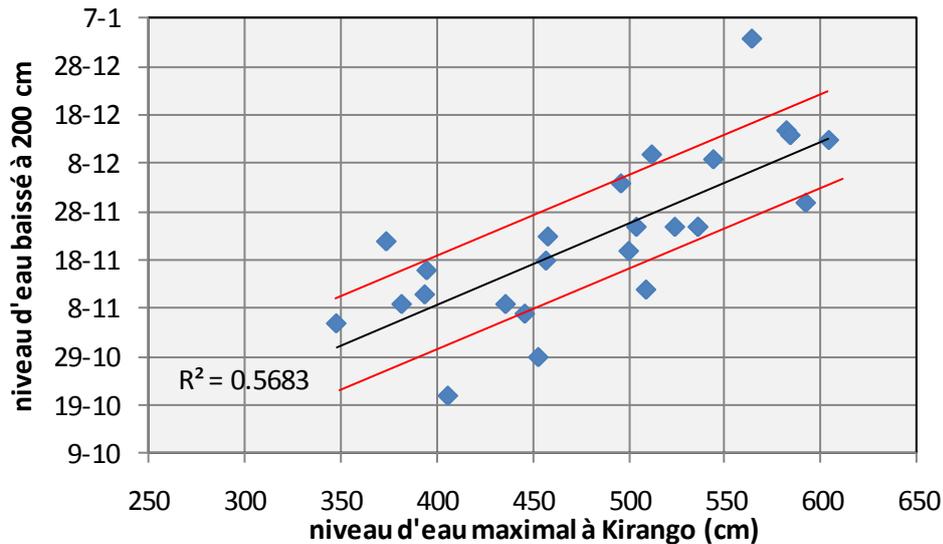


Figure A7. La date à laquelle le niveau d'eau déclinant à Kirango est de 200 cm en fonction du niveau d'eau maximal lors du même cycle de crue. Les lignes rouges se situent 10 jours au-dessus et au-dessous de la ligne de régression calculée. Cette disposition montre que la plupart des années, la date à laquelle le niveau d'eau devait atteindre 200 cm peut habituellement dévier jusqu'à 10 jours de la date réelle à laquelle l'eau est effectivement descendue à ce niveau. Toutefois, pour certaines années, l'erreur peut même être encore plus importante.

Une alternative pourrait consister à analyser la date d'accès à Diafarabé en fonction des niveaux de crue à Mopti (110 km en aval de Diafarabé). Bien que cette approche ne soit pas logique d'un point de vue hydrologique, Mopti pourrait cependant être sélectionnée si elle semblait donner un meilleur profil que Kirango concernant la date d'accès à Diafarabé.

Date d'accès et inondation

La modèle numérique des inondations décrit par Zwarts & Grigoras (2005) dans 'The Niger : a lifeline' peut servir à montrer le niveau réel d'inondation à la date moyenne d'accès à Diafarabé. Cependant, ce modèle renvoie à l'ensemble du Delta intérieur du Niger. C'est la raison pour laquelle le niveau d'eau mesuré (à l'échelle d'Akka) dans le Delta central est utilisé comme point de référence. Ainsi, le modèle s'applique moins dans le cas de l'inondation réelle dans la partie sud-ouest du Delta intérieur du Niger, puisque la date d'accès prédite à Diafarabé renvoie au niveau d'eau mesuré à Kirango, situé à quelques 370 km en amont à Akka. C'est pourquoi l'inondation réelle dans les périphéries de Diafarabé a été comparée au niveau d'eau mesuré le même jour à Kirango.

Le modèle numérique des inondations se fonde sur 24 cartes des eaux. Le niveau d'eau à Kirango est actuellement connu pour 19 dates dont sept renvoient à octobre-novembre, une à 1999 (Fig. A8), une autre à 1986 (Fig. A9), deux à 1987 (Fig. A10) et trois à 1984 (dont deux sont indiquées dans la Fig. A11).

Les cartes montrent une région s'étendant sur 60 km d'Ouest en est (entre Diafarabé et Ouro-Modi) et 50 km du nord au sud. La Fig. 8 renvoie à une année où la pointe de crue a été relativement forte. L'image a été prise 61 jours après la pointe de crue, et même si le niveau d'eau à Kirango avait déjà baissé de plus de 3 mètres, une grande quantité d'eau était restée dans les plaines inondables.

Le niveau d'eau sur la Fig. A9 (209 cm) n'était que légèrement plus faible que celui représenté sur la carte de la Fig. A8 (238 cm). La différence dans l'étendue de l'inondation est cependant très grande. Cette situation est liée à la pointe de crue : la Fig. A9 concerne 1986, une année relativement sèche (pointe de crue à 457 cm, soit 87 cm de moins qu'en 1999).

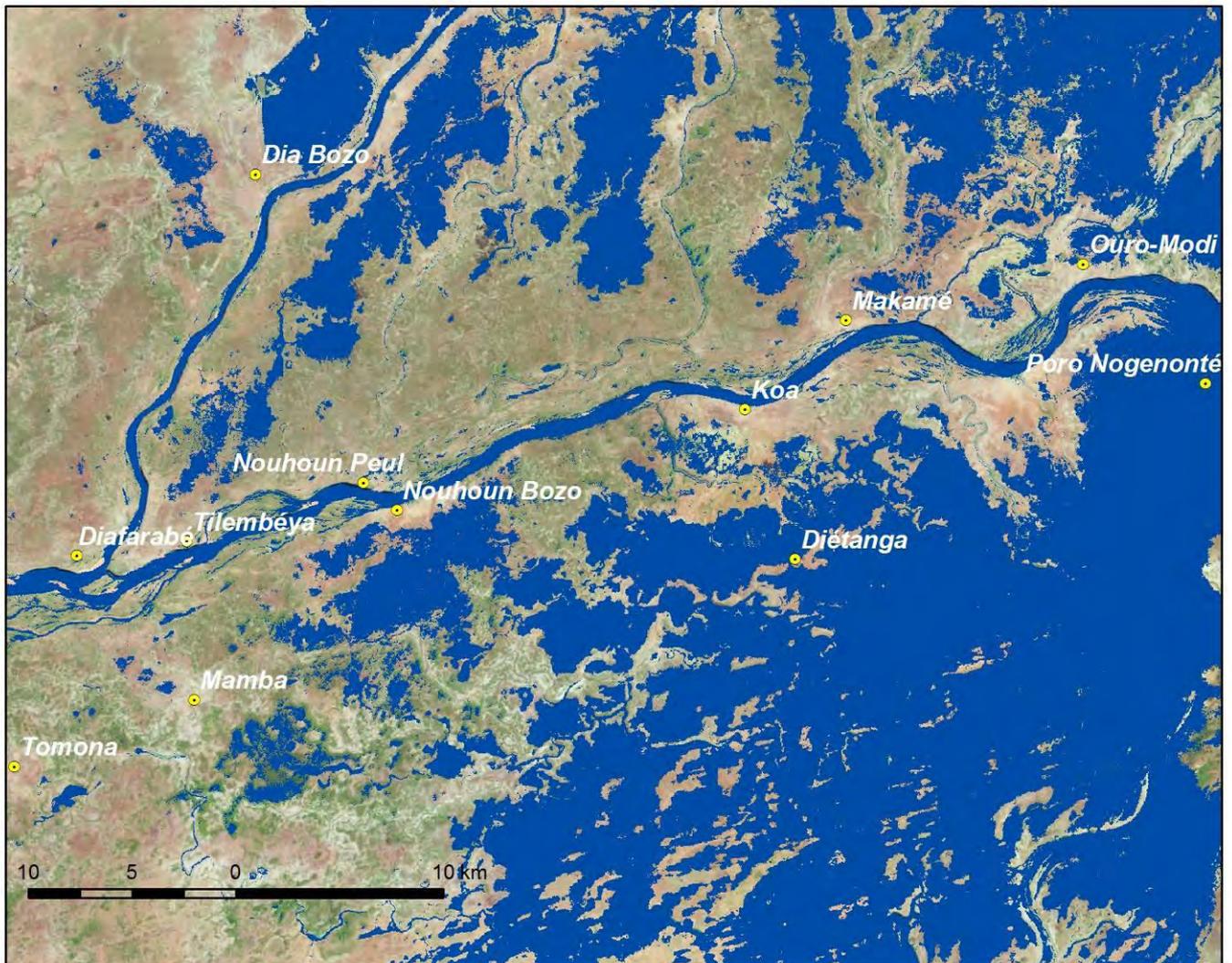


Figure A8. L'étendue de l'inondation le 28 novembre 1999, indiquée en bleu, lorsque le niveau d'eau à Kirango était de 238 cm, trois jours avant la descente probable de l'eau à 200 cm. Cette année-là, la pointe de crue à Kirango avait été atteinte le 29 septembre (544 cm). Ainsi, l'étendue de l'inondation est montrée 61 jours après que la pointe de crue a été atteinte et alors que le niveau d'eau à Kirango a déjà baissé de 306 cm.

L'étendue de l'inondation présentée dans la Fig. A10 (indiquant l'étendue de l'inondation en 1987) est similaire à celle de la Fig. A9 (indiquant l'étendue de l'inondation en 1986). L'étendue de l'inondation de la Fig. A10 est même légèrement plus faible que celle de la Fig. A9. Ce résultat est surprenant dans la mesure où le niveau d'eau de la Fig. A9 s'élève à 209 cm à Kirango et à 364 et 347 cm dans la Fig. A10, soit une différence de près de 1,5 mètres de hauteur ! L'explication de ce résultat en apparence étrange est liée au fait que la pointe de crue en 1986 s'élevait à 457 cm (Fig. A9) alors qu'elle n'était que de 348 cm en 1987 (Fig. A10). Ces données montrent encore que l'étendue de l'inondation observée pendant la décrue dépend fortement de la pointe de crue.

La même conclusion peut être tirée de la Fig. 11, qui montre une faible étendue de l'inondation en 1984. Même si le niveau d'eau n'était pas bas lorsque l'image a été prise (248 cm), la pointe de crue avait été extrêmement faible (348 cm).

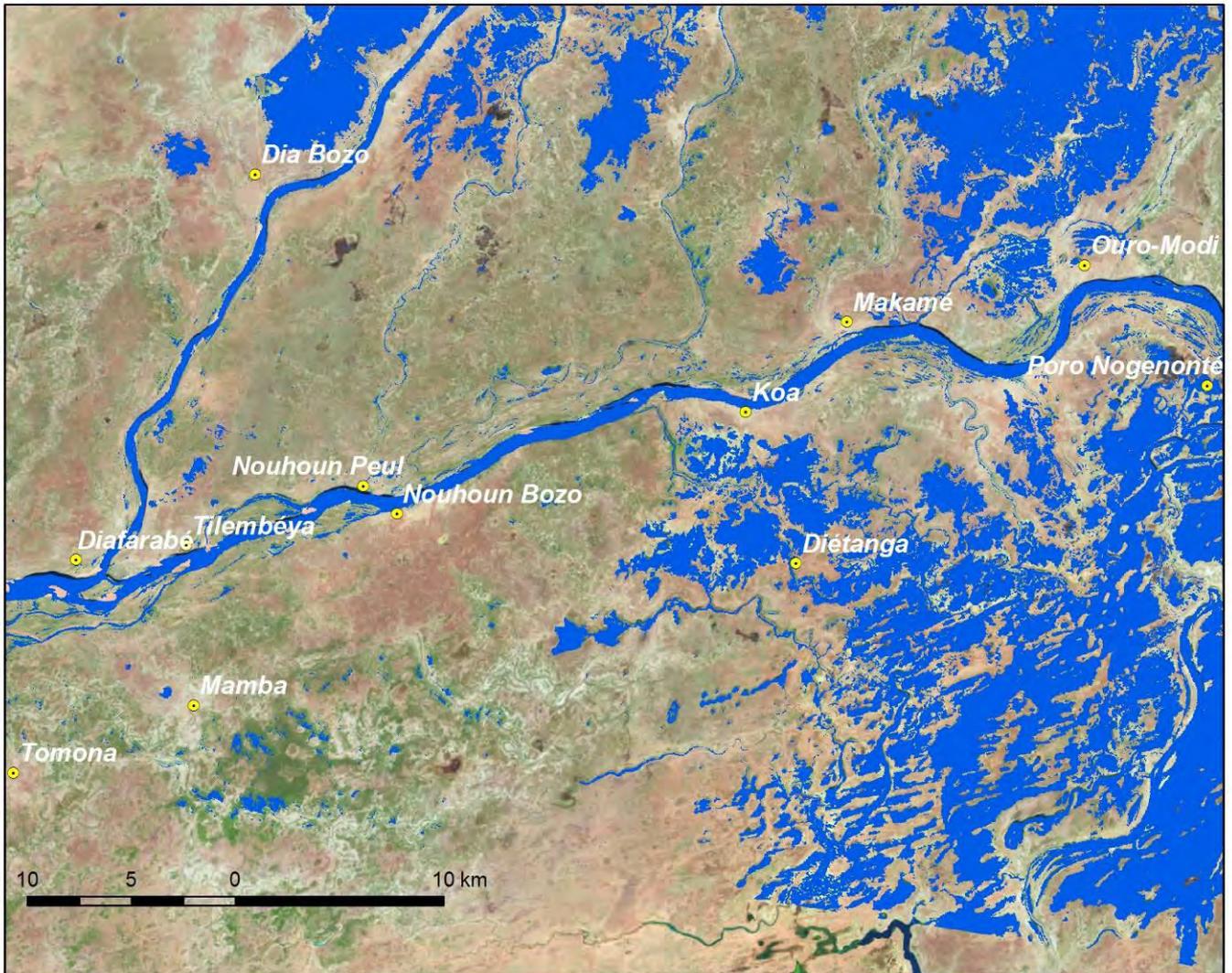


Figure A9. L'étendue de l'inondation le 16 novembre 1986, illustrée en bleu, lorsque le niveau d'eau à Kirango était de 209 cm, trois jours avant la descente du niveau de l'eau à 200 cm. La pointe de crue avait été atteinte cette année là à Kirango le 1er Octobre (457 cm). Ainsi l'étendue de l'inondation est montrée 46 jours après que la pointe de crue a été atteinte et tandis que le niveau d'eau à Kirango a déjà baissé de 248 cm.

La Fig. A12 montre une carte des eaux composite, sur la base des Fig. A8, A9 et A11. Une sélection a été opérée au niveau de trois cartes des eaux ayant à peu près le même niveau d'eau (209-248 cm), mais sur des années différentes, au cours desquelles le niveau de la pointe de crue a varié entre 348 et 544 cm.

La principale conclusion de cet exercice est qu'il n'est pas facile de prédire l'étendue de l'inondation pendant la décrue, dans la mesure où elle dépend non seulement du niveau de l'eau lui-même, mais également de la pointe de crue atteinte au cours des mois précédents. Cela s'explique par le fait que l'eau du fleuve remplit les lacs isolés si la pointe de crue excède un certain niveau. Ainsi, plus le niveau de la pointe de crue est élevé, plus le nombre de lacs et de dépressions remplis augmente.

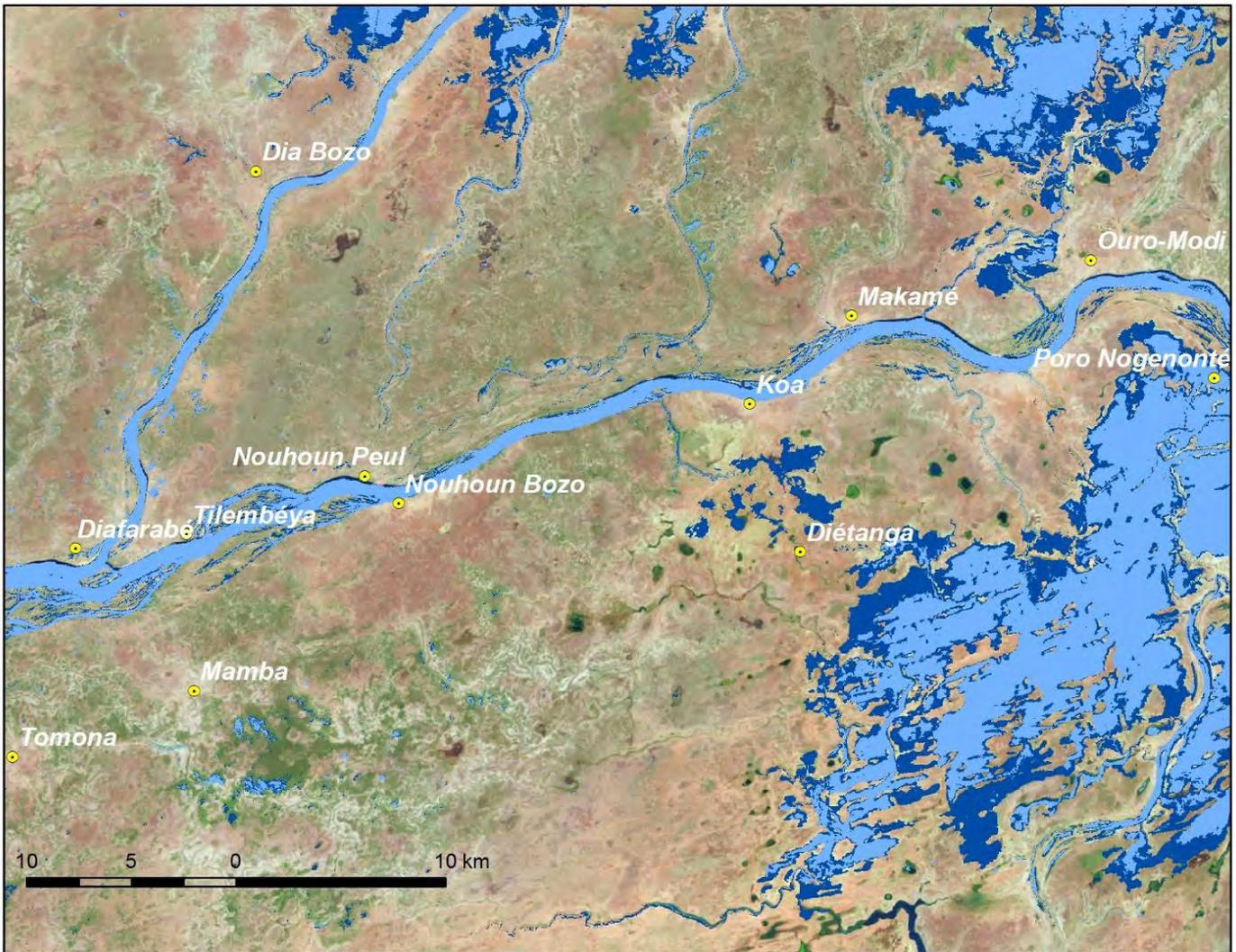


Figure A10. L'étendue de l'inondation le 2 octobre 1987 (364 cm à Kirango), illustrée en bleu foncé ou bleu clair, et celle du 18 octobre 1987 (347 cm à Kirango), indiquée en bleu clair. L'eau à Kirango a atteint son niveau maximal le 20 août 1987 (348 cm). La couleur combinée bleu foncé - bleu clair montre l'étendue de l'inondation 8 jours avant l'inondation maximale, tandis que la couleur bleu clair montre l'étendue de l'inondation 8 jours après l'inondation maximale. Ainsi l'étendue de l'inondation est indiquée pour 8 jours avant et 10 jours après que la pointe de crue a été atteinte. La différence en matière d'étendue de l'inondation entre ces deux jours s'élève à $364 - 347 = 17$ cm. Bien que cette différence soit faible, les premières plaines inondables situées au sud de Diétanga sont déjà asséchées (illustrées par le bleu foncé).

Ainsi, l'élaboration de modèles pour la décrue est rendue compliquée par les lacs peu profonds et les dépressions qui ne sont plus connectées au système de crue. En d'autres termes, il est nécessaire que le modèle couvre la période allant du moment où un lac a perdu la connexion avec le système hydrologique et sa disparition due à l'évaporation. Le déclin du niveau des eaux qui sont en connexion ouverte avec le système fluvial est de 3 à 5 cm par jour, mais il s'élève à seulement 0,7 cm (en raison de l'évaporation) dès qu'il se détache du système fluvial.

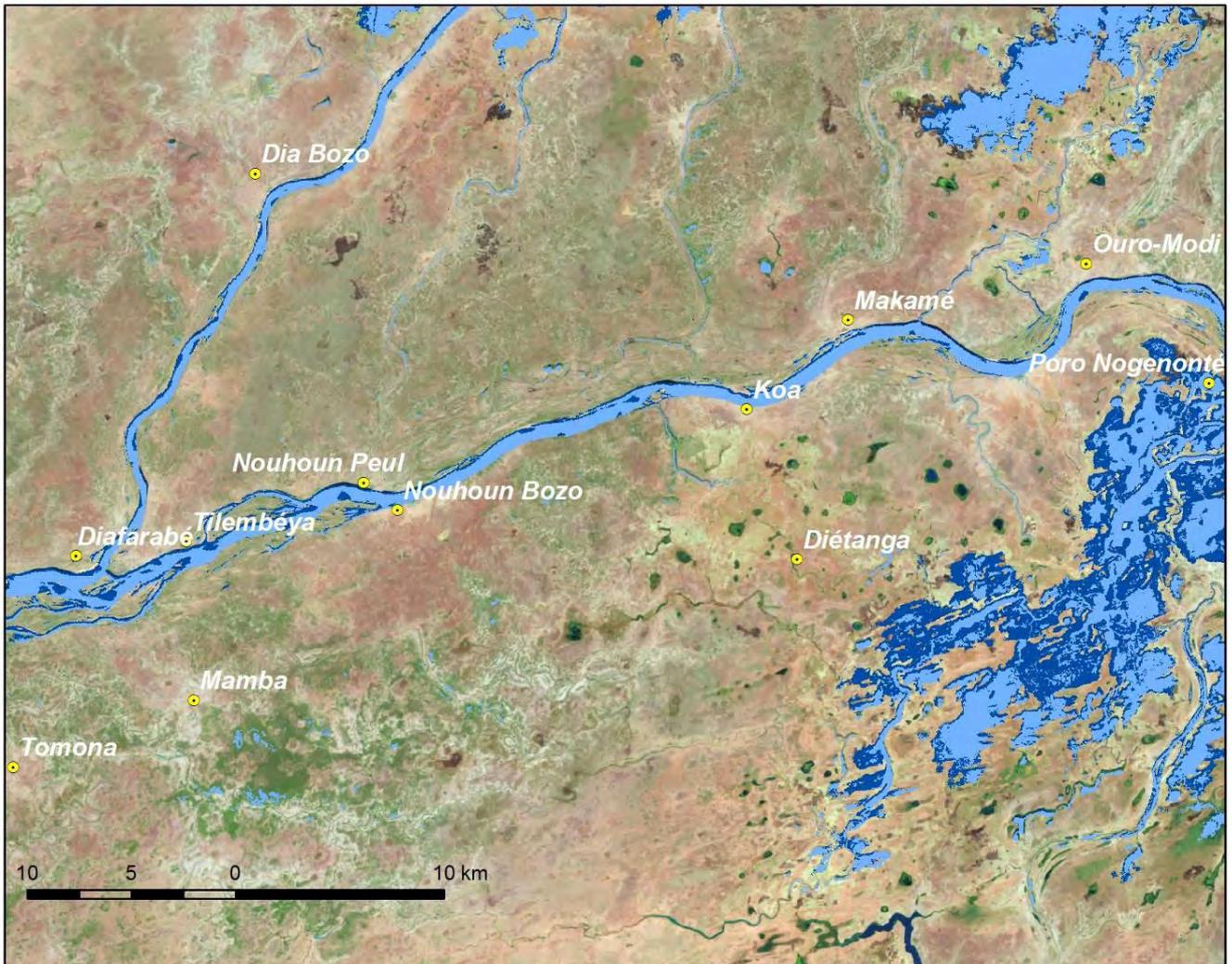


Figure A11. L'étendue de l'inondation le 25 octobre 1984 (niveau d'eau de 248 cm à Kirango), illustré en bleu clair ou bleu foncé, et le 10 novembre 1984 (niveau d'eau de 156 cm à Kirango), illustré en bleu clair. L'eau à Kirango a atteint son niveau maximal le 20 Août 1987 (348 cm). Ainsi l'étendue de l'inondation est indiquée pour le 43ème et le 59ème jours suivant le niveau de la pointe de crue. La différence dans l'étendue de l'inondation pour les deux jours s'élève à $248 - 156 = 92$ cm. Dans cette quinzaine, une grande part des plaines inondables du sud-est de Diétanga et du sud de Pora se sont asséchées (illustré en bleu foncé).

Davantage de zones restent couvertes par les eaux si le niveau d'eau a été élevé au cours des mois précédents. Zwarts et al. (2003)³ ont déterminé le volume de surface connectée et déconnectée au système fluvial pour chaque image satellite. Leur analyse montre que pendant la décrue, environ 50% de la zone inondée est déconnectée du fleuve au moment où l'eau descend à un niveau se situant entre 100 et 300 cm à l'échelle d'Akka. Dans le cas d'une année sèche, avec un niveau d'eau maximal relativement faible, tel qu'en 1984, la plupart de ces zones sont restées asséchées toute l'année.

³ Zwarts, L., Grigoras & W. Dubbeldam. 2003. A digital flooding model of the Inner Niger Delta: a first analysis of remote sensing data. Mali-PIN 03-01.

Zwarts & Grigoras (2005) ont, évidemment, rencontré le même problème lorsqu'ils ont construit leur modèle numérique des inondations. C'est également pour cette raison qu'ils ont élaboré deux modèles numériques des inondations pour la décrue - un modèle inclusif et un modèle exclusif. Cependant, lorsque le niveau de l'eau au moment de la décrue baisse, il est plus difficile de comparer les images issues de différentes années. Dans de telles conditions, le niveau de la pointe de crue ainsi que le temps écoulé depuis que l'eau a atteint son niveau maximal, déterminent les endroits où les lacs isolés et temporaires pourvus d'eau peuvent être localisés.

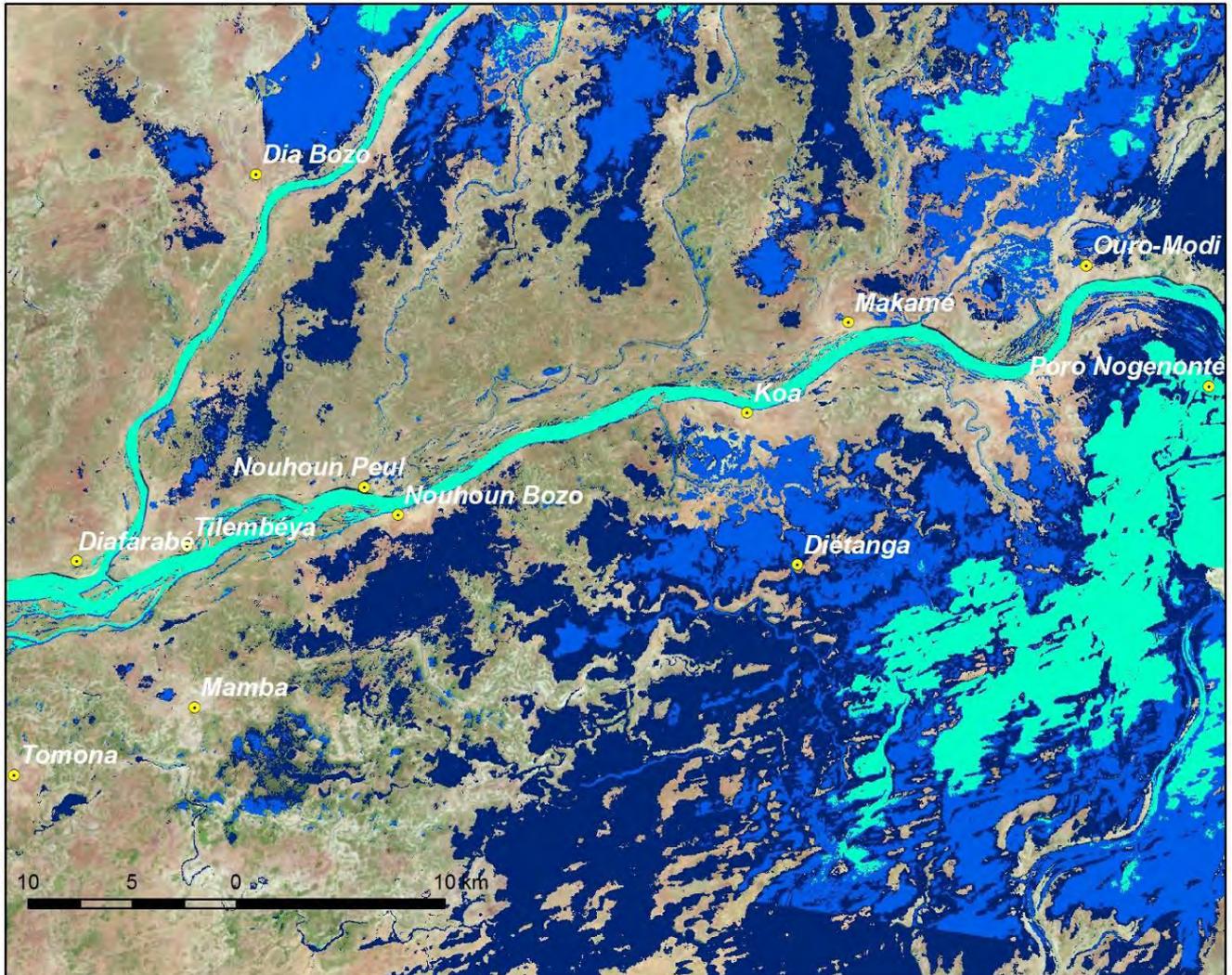


Figure A12. L'étendue de l'inondation sur trois jours différents :

Couleur	Date	Niveau d'eau	Pointe de crue	Nombre de jours depuis la pointe	Carte
Bleu foncé	28-11-1999	238 cm	544 cm le 29-9	61 jours	Fig. A8
Bleu clair	16-11-1986	209 cm	457 cm le 1-10	46 jours	Fig. A9
Bleu verdâtre	20-8-1984	248 cm	348 cm le 20-8	45 jours	Fig. A11

Il faut noter que la carte des eaux du 28-11-1999 s'étend plus au sud que les deux autres cartes sur lesquelles aucune inondation ne pouvait apparaître au niveau de l'angle sud-ouest aux dates du 16-11-1986 et du 20-8-1984.

En conclusion, l'on peut en déduire que l'inondation survenant pendant la montée de l'eau résulte davantage du niveau d'eau mesuré dans différentes centrales hydrologiques. Il peut en être de même pour la décrue, mais différents problèmes émergent et doivent être résolus. Outre les problèmes

mentionnés plus haut, une autre préoccupation peut apparaître lorsque le modèle numérique des inondations est utilisé concernant le bétail en pâturage. Les cartes des eaux dans les Fig. A9-A12 montrent l'étendue de l'inondation, que la profondeur de l'eau soit de 1 ou 600 cm. Les vaches peuvent paître dans un champ de bourgou avec une crue s'élevant à 0,5 m de hauteur, ou même davantage. Elles peuvent tout aussi paître dans les champs secs de bourgou (en dépit du fait que le stock de nourriture est réduit lorsque le bourgou devient disponible pour la pâture). Il serait possible de combiner différentes cartes des eaux avec une carte numérique de la végétation, pour élaborer une carte montrant la superficie de pâturage disponible (profondeur de l'eau de moins de 0,5 m) et montrer avec différentes couleurs quelles parties des champs de bourgou sont disponibles pour la pâture sur différentes périodes. Il serait utile de développer une telle carte.

La conclusion générale est que OPIDIN peut être utilisé pour prédire le niveau d'eau pendant la décrue des étendues d'eau qui restent connectées au système fluvial. Cependant, dès que les lacs et dépressions se détachent durant la décrue, la baisse du niveau de l'eau locale devient plus difficile à prédire.