

Altenburg & Wymenga



CONSEILLERS ÉCOLOGIQUES

OPIDIN: Prédiction des inondations dans le Delta Intérieur du Niger

A&W-rapport 1933



Commandité par



OPIDIN : Prédiction des inondations dans le Delta Intérieur du Niger

A&W-rapport 1933

L.Zwarts

Photo de couverture

La partie Sud du Delta Intérieur Niger à un niveau d'inondation élevé (octobre 2012). Photo: Leo Zwarts

L.Zwarts 2013

OPIDIN : Prédiction des inondations dans le Delta Intérieur du Niger. A&W-rapport 1933

Altenburg & Wymenga consultants écologistes, Feanwâlden, Pays-Bas

Commandité par

Wetlands International

Horapark 9

6717 LZ Ede

Pays-Bas

Tel. +31 318 660910

Realisé par

Altenburg & Wymenga ecological consultants

P.O. Box 32

9269 ZR Feanwâlden

Pays-Bas

Tel. +31 511 47 47 64

Fax + 31 511 47 27 40

info@altwym.nl

www.altwym.nl

Número du Projet

2025opi

Chef de Projet

E. Wymenga

Etat

Version finale

Autorisation

Approuvée

Autographe

E. Wymenga

Date

19 août 2013

Sommaire

1	Introduction	1
	Remerciements	2
2	Résultats	3
2.1	Courbes annuelles des inondations	3
2.2	Les courbes moyennes des inondations	8
2.3	Niveau élevé du pic de la crue à Mopti et dans les stations hydrométriques en amont.	9
2.4	Le niveau élevé du pic de la crue à Mopti et dans les stations hydrométriques en aval.	10
2.5	Date du pic de la crue	11
2.6	Prédiction de la crue : prendre en compte l'impact de Sélingué	12
2.7	Prédiction du pic de la crue : une relation curviligne	13
2.8	Prédiction du niveau du pic de la crue : intervalles de confiance	14
2.9	Prédiction du pic de la crue : équations de régression	16
2.10	Prédiction du pic de la crue à Akka et Diré	17
2.11	Prédiction de la date de début de la décrue	19
2.12	OPIDIN et le <i>calendrier de traversées</i>	20
3	Bibliographie	23

1 Introduction

Dans le Delta Intérieur du Niger, la hauteur de la crue peut atteindre six mètres, mais certaines années elle fait moins de six mètres. Ces récentes années, elle a été beaucoup plus basse. La variation du pic de la crue d'une année à l'autre est précisément connue puisque la montée saisonnière et la récession des eaux d'inondation ont été mesurées quotidiennement par la DNH (Direction Nationale de l'Hydraulique) au niveau de plusieurs stations hydrologiques pendant des décennies (Fig. 1).

Le niveau de l'eau est bas d'avril à juin et il commence à monter à partir de juillet. Pendant les années de basses eaux l'eau peut atteindre environ 3,5 mètres de hauteur vers la fin du mois d'octobre à Mopti. Pendant les hautes eaux du fleuve, bien que le niveau monte au même rythme quotidien, il ne fait aussi pendant une longue période, atteignant le pic de 6 mètres vers la fin du mois de décembre à Mopti. Habituellement, les inondations de faible niveau couvrent les plaines d'inondation pendant quatre mois seulement (octobre – février) mais les inondations de hautes eaux les couvrent deux fois plus longtemps (septembre – avril).

Pendant l'inondation et la décrue, le niveau de l'eau monte et chute de 2-5 cm par jour. Ceci donne l'opportunité de prédire le niveau de la crue de la semaine ou de la quinzaine suivante. OPIDIN (**O**util de **P**rédiction des **I**nondations dans la **D**elta **I**ntérieur du **N**iger) est un outil pour prédire les inondations dans le Delta Intérieur du Niger quand l'eau commence à monter. Comme tel, cet outil fonctionne comme un système d'alerte précoce pour les populations vivant dans le Delta Intérieur du Niger.

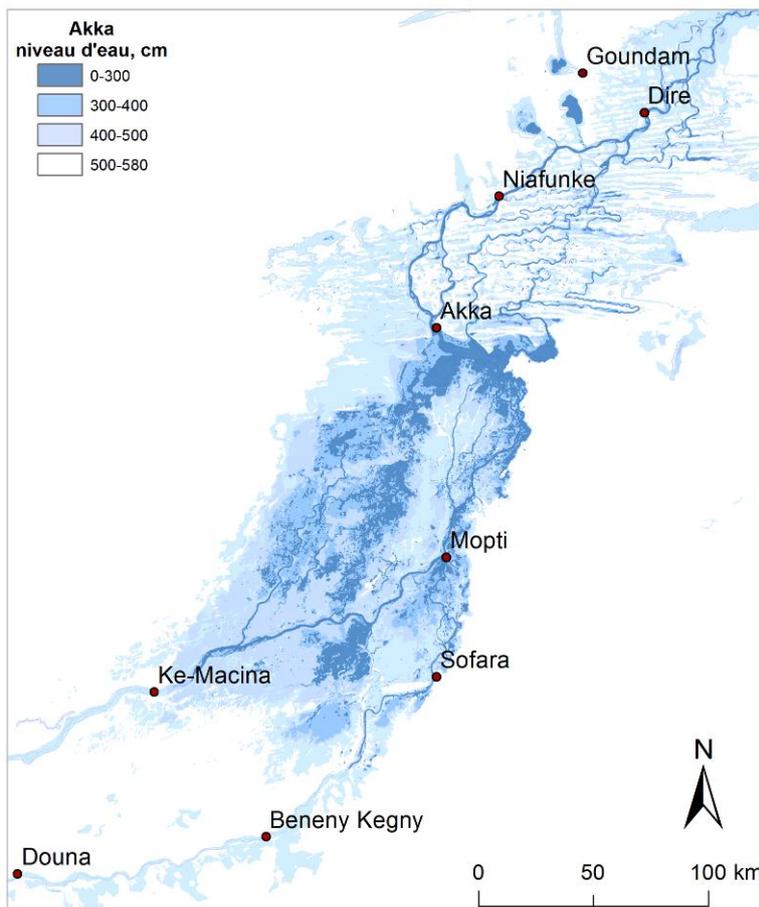


Fig. 1. Les neuf (9) stations hydrométriques utilisées par OPIDIN. Les quatre couleurs bleues montrent l'étendue de l'inondation dans le Delta Intérieur du Niger à différents niveaux d'inondation à Akka.

OPIDIN prédit le niveau maximum de la crue et la date à laquelle le pic de la crue est atteint mais il peut être également utilisé pour prédire le niveau de l'eau pendant les différents stades de la courbe de l'inondation, par exemple, la date à laquelle le niveau de l'eau a chuté à un certain niveau.

Le modèle d'inondation présenté dans *Le Niger, une artère vitale* (Zwarts et al. 2005) permet d'indiquer précisément l'étendue de l'inondation liée à un certain niveau d'inondation. Ainsi, OPIDIN prédit non seulement le pic de la crue mais aussi les zones inondées.

L'étude consolide les travaux antérieurs. Une version préliminaire d'OPIDIN a été élaborée en 2009 dans le cadre du *Projet PvW 07012 (Mali): Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin du Niger en amont de Taoussa – Outil d'aide à la décision*, étude financée par ``Partenaires pour l'Eau``, une initiative conjointe de six Départements du Gouvernement des Pays-Bas. Une première version d'OPIDIN a été décrite par Zwarts (2009a).

L'étude a eu une suite dans le cadre du *Projet Wetlands et Moyens d'Existence / Wetland & Livelihoods Project: GIRE (Gestion intégrée de ressources naturelles) dans le bassin du Niger en amont de Taoussa*, un projet de Wetlands International. Ces résultats ont été résumés dans le document de Zwarts (2009b). OPIDIN a été davantage amélioré dans le cadre du projet AFROMAISON de Cadre 7-UE``. Les résultats sont intégrés dans ce rapport.

OPIDIN a encore été beaucoup amélioré en 2012/2013 :

- Les prédictions sont fondées sur toutes les données collectées depuis 1922 ;
- Les prédictions sont améliorées en utilisant des équations de régression curviligne au lieu des équations de régression linéaire ;
- Le changement de la courbe d'inondation dû au réservoir de Sélingué a été quantifié et intégré aux prédictions améliorées de l'inondation ;
- Les prédictions sont données pour plus de stations (Mopti, Akka, Diré) ;
- Les intervalles de confiance sont indiqués pour toutes les prédictions ;
- La date de la décrue est également donnée.

Par ailleurs, un Atlas a été produit, montrant dans 52 cartes (26 pour la moitié Nord et 26 pour la moitié Sud du Delta Intérieur du Delta) l'extension de la crue entre 300 et 520 cm à l'échelle de mesure d'Akka. L'Atlas est disponible sous forme de livre (Zwarts & Hoekema 2013), mais aussi en format PDF.

OPIDIN est en ligne depuis août 2013 (voir www.opidin.org). La visionneuse sur le site donne le niveau prédit du pic de la crue et l'étendue de l'inondation, sur la base des mesures en cours. Les mêmes informations seront fréquemment diffusées sur les antennes des radios locales en août-septembre.

Ce rapport est un document d'informations techniques de base. Il explique la méthodologie et donne les statistiques essentielles telles que les équations de régression utilisées pour prédire l'inondation et la récession de la crue. Pour avoir des informations générales relatives à OPIDIN, consulter les rapports antérieurs et le site web suivant : www.opidin.org.

Remerciements

L'Ambassade des Pays-Bas au Mali a rendu possible l'amélioration et l'extension de l'OPIDIN en 2013.

2 Résultats

2.1 Courbes annuelles des inondations

La DNH mesure chaque jour le niveau de l'eau au niveau des stations hydrométriques le long du Niger depuis déjà très longtemps et à Koulikoro depuis 106 ans.

Ce rapport utilise toutes les données disponibles des neuf stations (voir Fig. 1) :

- Trois le long du Bani (Douna, Beneny-Kegny et Sofara),
- Ké-Macina à l'entrée du Delta Intérieur du Niger,
- Cinq stations dans le Delta Intérieur du Niger même (Mopti, Akka, Niafunké, Diré et Goundam).

La Fig. 2 donne les mesures quotidiennes des neuf stations durant ``l'année hydraulique`` (1 juin au 1 juin de l'année suivante). Les courbes sont données pour les années mentionnées dans le titre des graphiques. Les courbes lient les mesures quotidiennes. Naturellement, l'augmentation quotidienne pendant la crue et la baisse quotidienne pendant la récession des eaux sont très régulières. Ceci est important à noter parce qu'OPIDIN se fonde sur les mesures quotidiennes et si elles variaient beaucoup, elles seraient une source d'erreurs. Les courbes sont moins régulières pour Ké-Macina (impact des lâchers irréguliers au niveau du barrage de Sélingué et de Markala), mais ses irrégularités disparaissent plus loin en aval. Une partie de la variation quotidienne du niveau de l'eau semble être due aux variations de la pluviométrie quotidienne dans le Niger Supérieur et dans le Bani Supérieur.

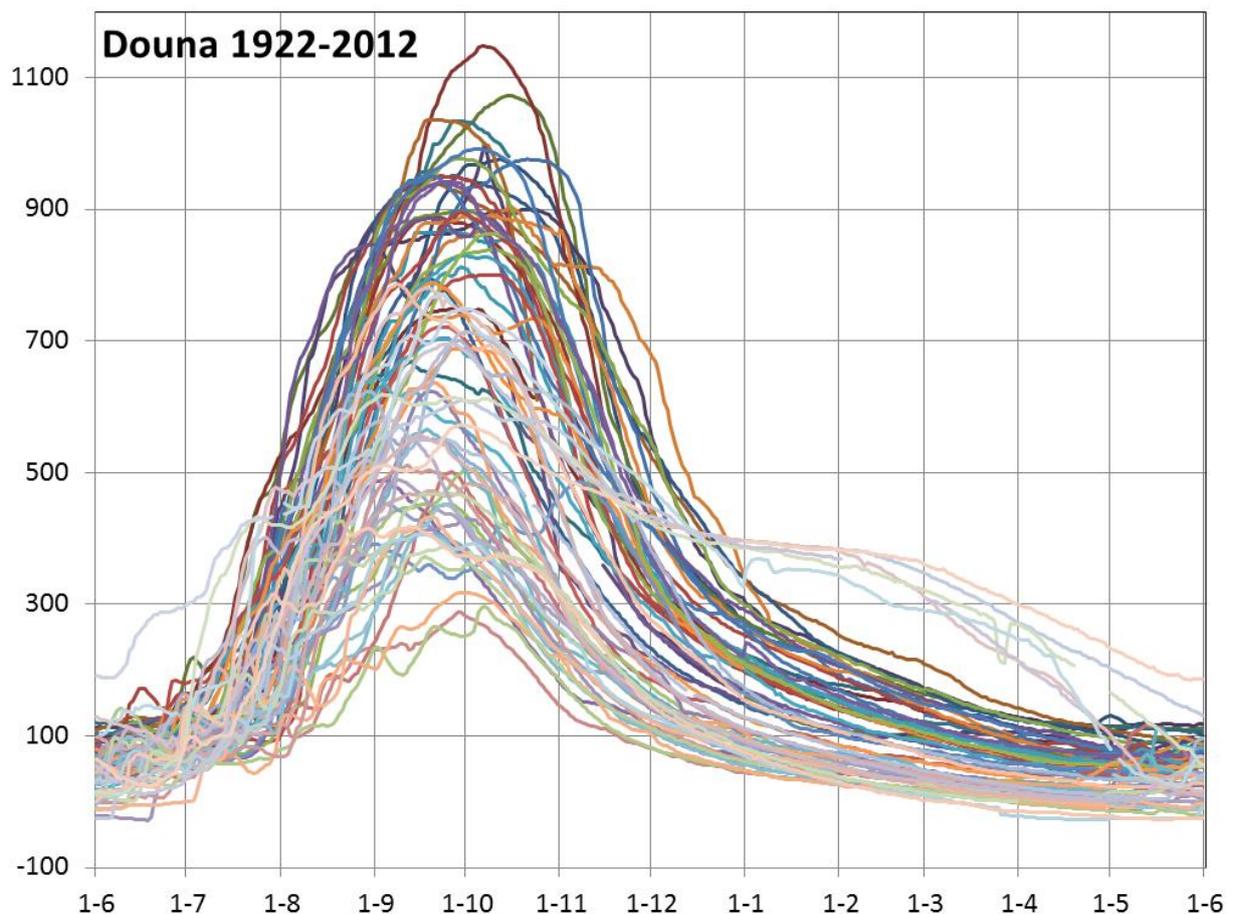


Fig. 2. Les mesures quotidiennes du niveau de l'eau (cm) entre le 1 juin et le 1 juin de l'année suivante à Douna, données séparément pour toutes les années disponibles. Source : DNH. Observez les six courbes qui sont deux (2) mètres plus hautes que toutes les autres années pendant la saison sèche. Observez que ces courbes se rapportent aux années les plus récentes depuis la construction du réservoir de Talo en 2005.

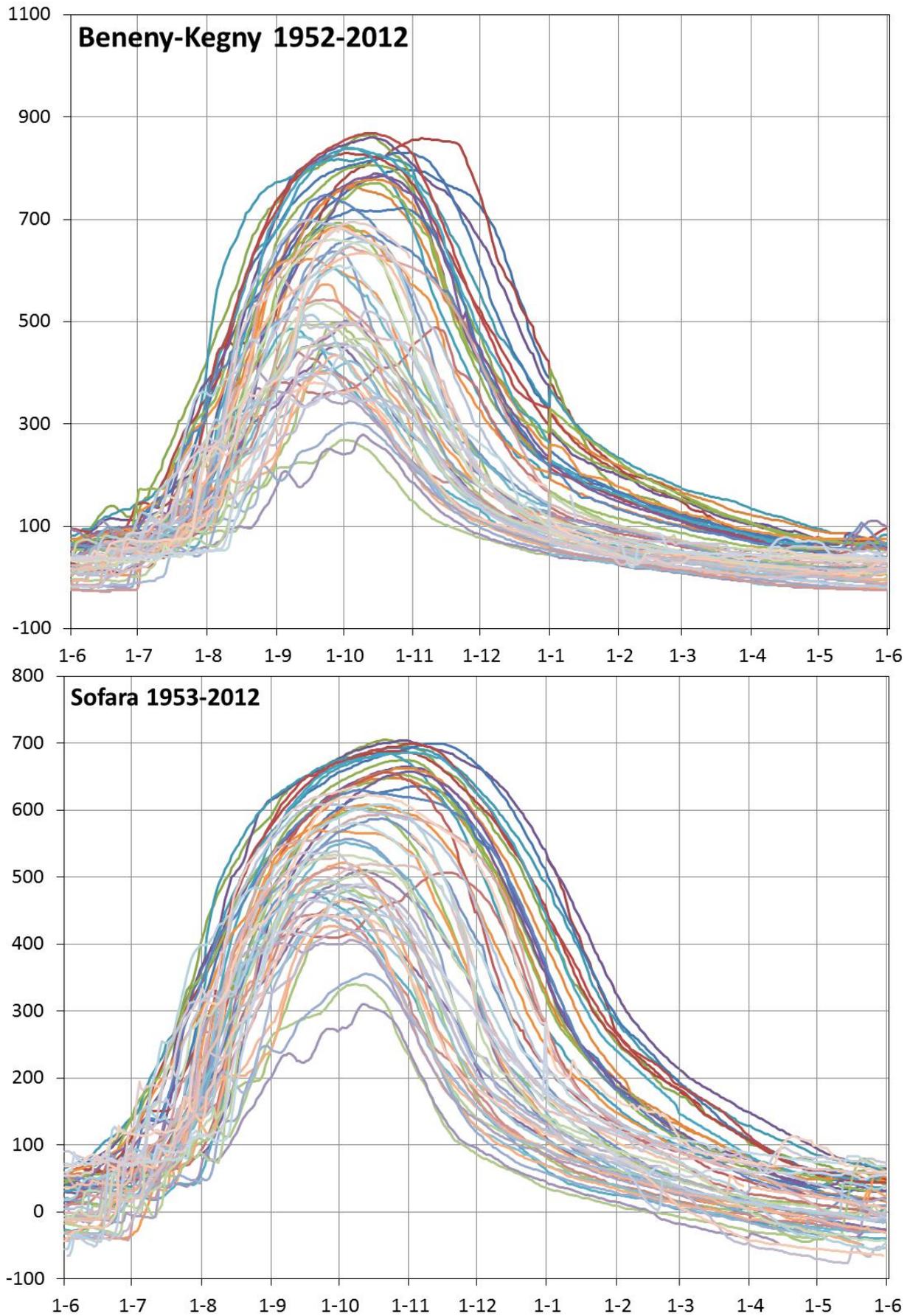


Fig. 2 (suite). Les mesures quotidiennes du niveau de l'eau (cm) entre le 1 juin et le 1 juin de l'année suivante à Beneny-Kegny et Sofara, données séparément pour toutes les années disponibles. Source : DNH.

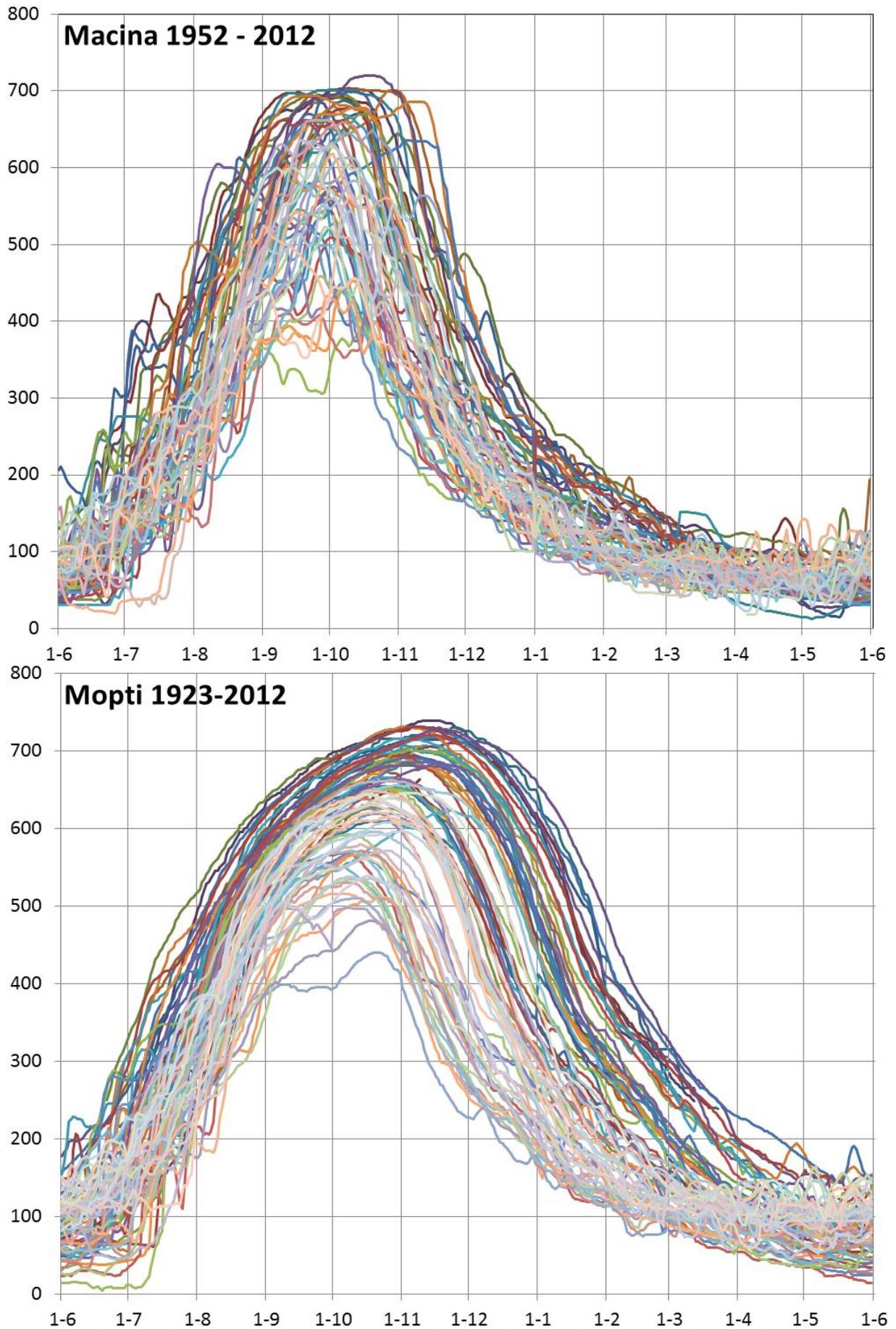


Fig. 2 (suite). Les mesures quotidiennes du niveau de l'eau (cm) entre le 1 juin et le 1 juin de l'année suivante à Ké-Macina et Mopti, données séparément pour toutes les années disponibles. Source : DNH.

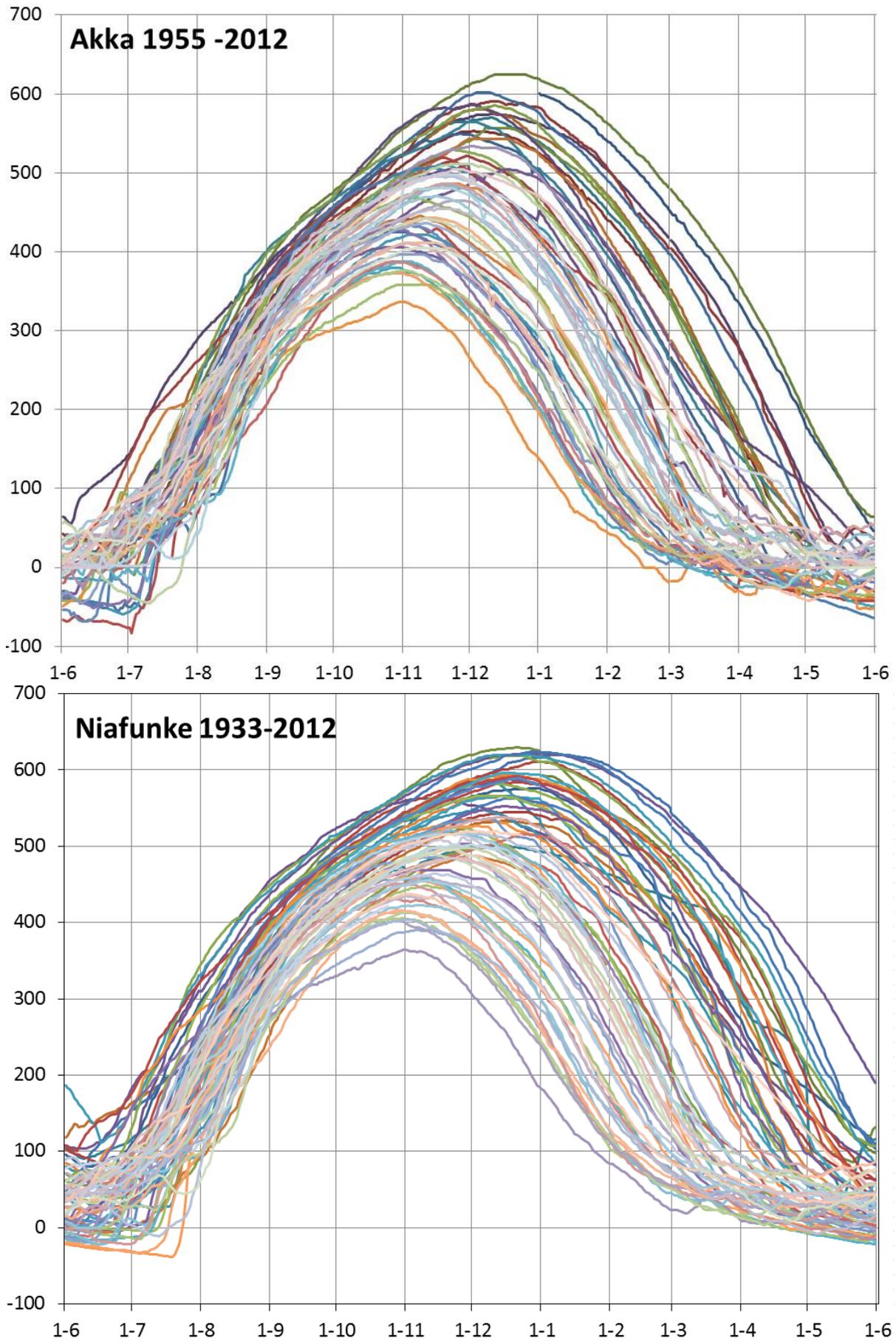


Fig. 2 (suite). Les mesures quotidiennes du niveau de l'eau (cm) entre le 1 juin et le 1 juin de l'année suivante à Akka et Niafunké, données séparément pour toutes les années disponibles. Source : DNH.

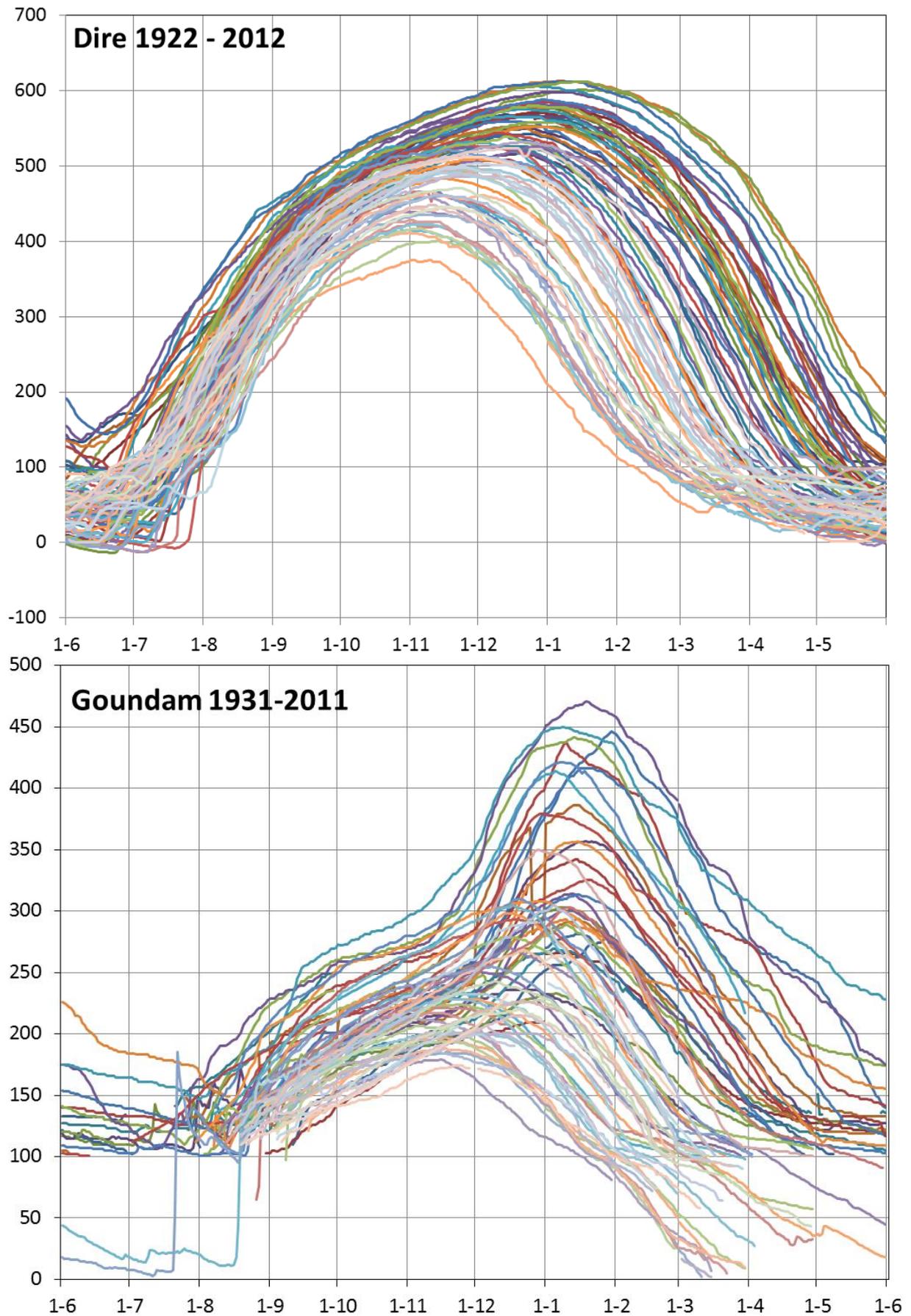


Fig. 2 (suite). Les mesures quotidiennes du niveau de l'eau (cm) entre le 1 juin et le 1 juin de l'année suivante à Dire et Goundam, données séparément pour toutes les années disponibles. Source : DNH.

2.2 Les courbes moyennes des inondations

La Fig. 2 montre clairement que les courbes saisonnières des inondations sont différentes dans les années à crue élevée et les années à crue basse. Pour étudier la variation de la courbe de la crue en tant qu'une fonction de la hauteur de la crue, toutes les mesures quotidiennes ont été subdivisées en six (6) catégories selon la hauteur du pic de la crue à Mopti. Les résultats sont donnés dans la Fig. 3 pour les trois (3) stations du Bani et dans la Fig. 4 pour les six (6) stations du Delta Intérieur du Niger.

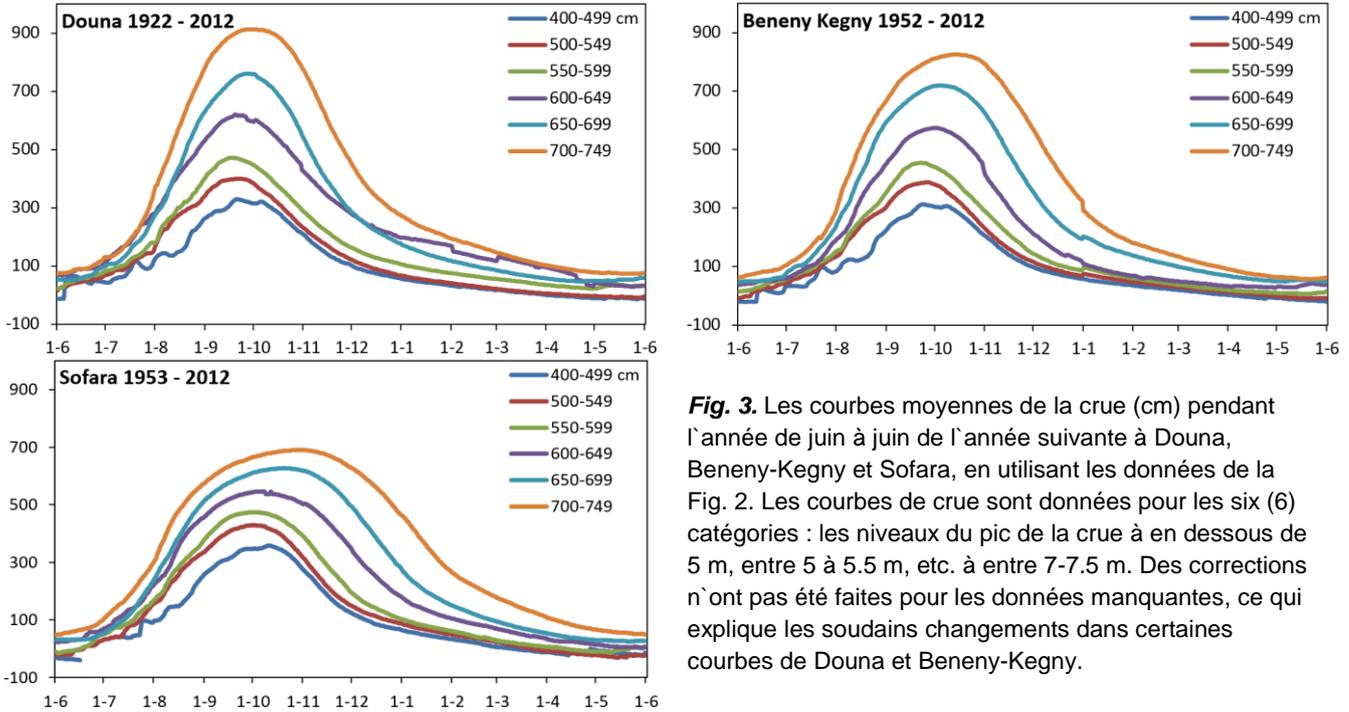


Fig. 3. Les courbes moyennes de la crue (cm) pendant l'année de juin à juin de l'année suivante à Douna, Beneny-Kegny et Sofara, en utilisant les données de la Fig. 2. Les courbes de crue sont données pour les six (6) catégories : les niveaux du pic de la crue à en dessous de 5 m, entre 5 à 5.5 m, etc. à entre 7-7.5 m. Des corrections n'ont pas été faites pour les données manquantes, ce qui explique les soudains changements dans certaines courbes de Douna et Beneny-Kegny.

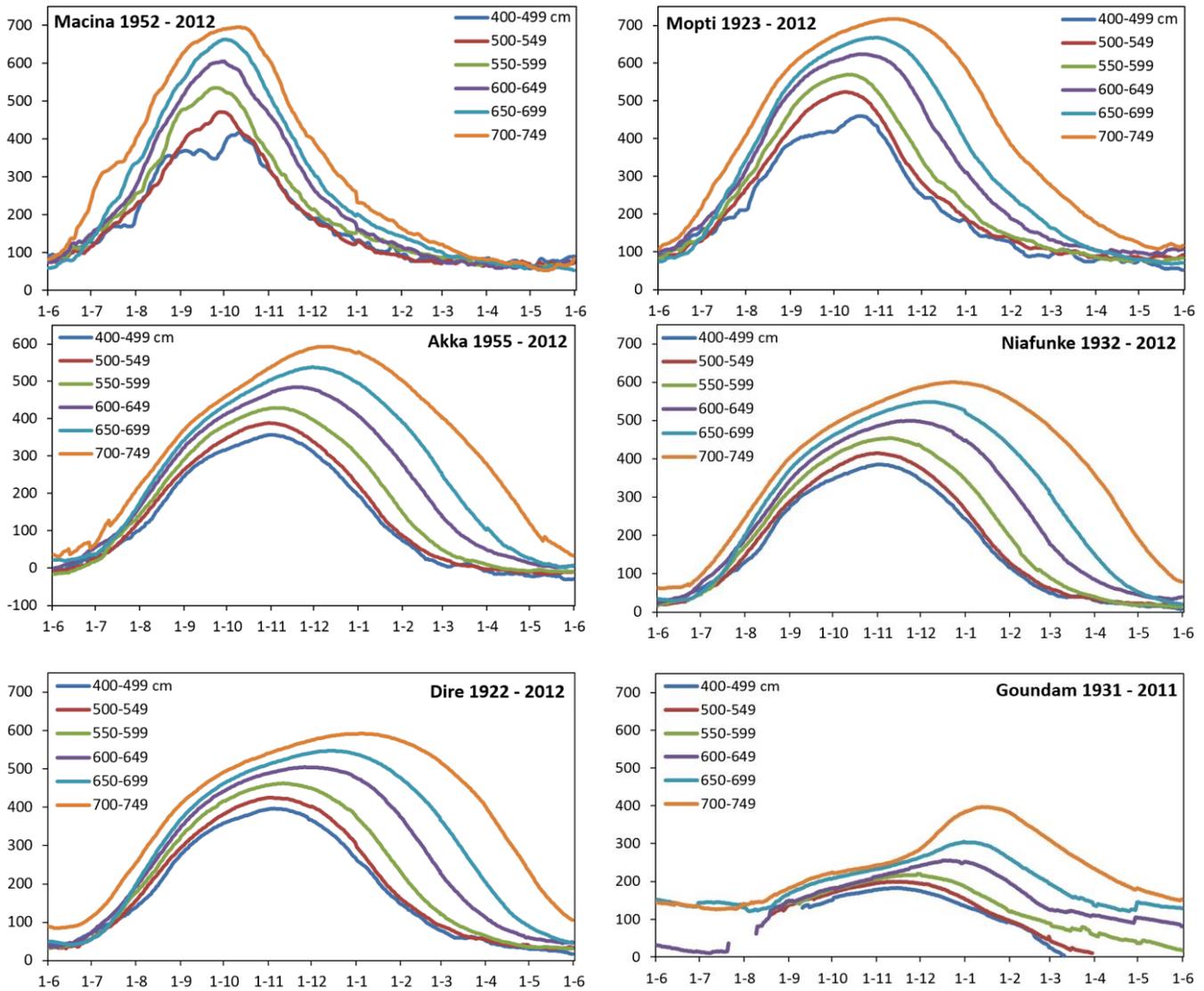


Fig. 4. Les courbes moyennes de crue (cm) pendant l'année de juillet à juillet de l'année suivante dans les six (6) stations du Delta Intérieur du Niger, en utilisant les données de la Fig. 2. Les moyennes de crue sont données pour les six (6) catégories: les niveaux des pics de la crue à Mopti inférieurs à 5 m, entre 5 et 5.5 m, etc. à entre 7-7.5 m. Des corrections n'ont pas été faites pour les données manquantes ; ce qui explique les quelques soudains et petits changements dans certaines courbes. Les courbes irrégulières de Ké-Macina sont toutes liées aux grandes fluctuations du niveau quotidien de l'eau (voir Fig. 2).

2.3 Niveau élevé du pic de la crue à Mopti et dans les stations hydrométriques en amont.

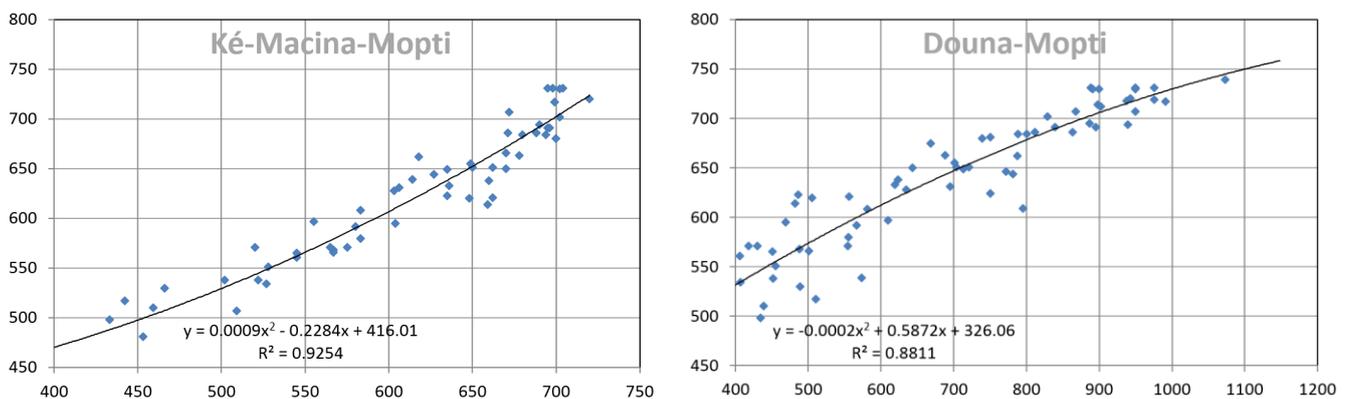


Fig. 5. Le niveau du pic de la crue à Mopti (cm) comme une fonction du pic (même année) à Ké-Macina (à gauche) et à Douna (à droite).

Le niveau annuel du pic de la crue à Mopti avait varié entre 470 et 730 cm. Le niveau élevé du pic de la crue est déterminé non seulement par le débit du Niger mais aussi par le débit du Bani. La corrélation entre les niveaux élevés du pic de la crue à Ké-Macina et Mopti est un peu plus élevée qu'entre Douna et Mopti (Fig. 5). Contre toute attente, le niveau élevé du pic de la crue à Douna n'est que hebdomadairement liée au pic de la crue à Ké-Macina. (On s'attendrait à une plus grande corrélation puisque la pluviométrie dans le Niger Supérieur et le Bani Supérieur fluctue de façon concordante, étant relativement élevée pendant les années humides et relativement basse pendant les années sèches).

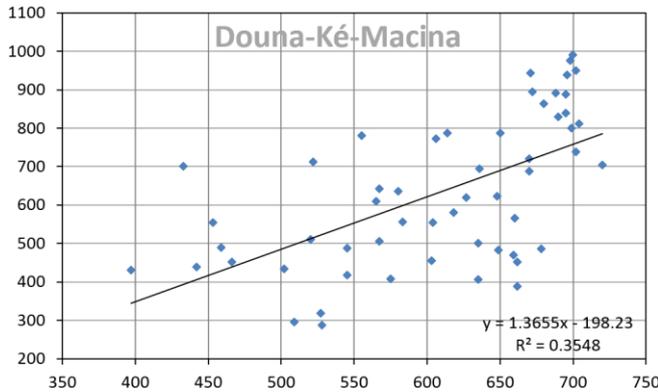


Fig. 6. Le niveau élevé du pic de la crue à Douna (cm) comme une fonction du pic de la crue à Ké-Macina (cm), mesuré pendant la même année.

2.4 Le niveau élevé du pic de la crue à Mopti et dans les stations hydrométriques en aval.

Le niveau annuel du pic de la crue à Mopti est hautement en corrélation avec les autres stations hydrométriques dans le Delta Intérieur du Niger (Fig. 7), mais les relations sont clairement non linéaires

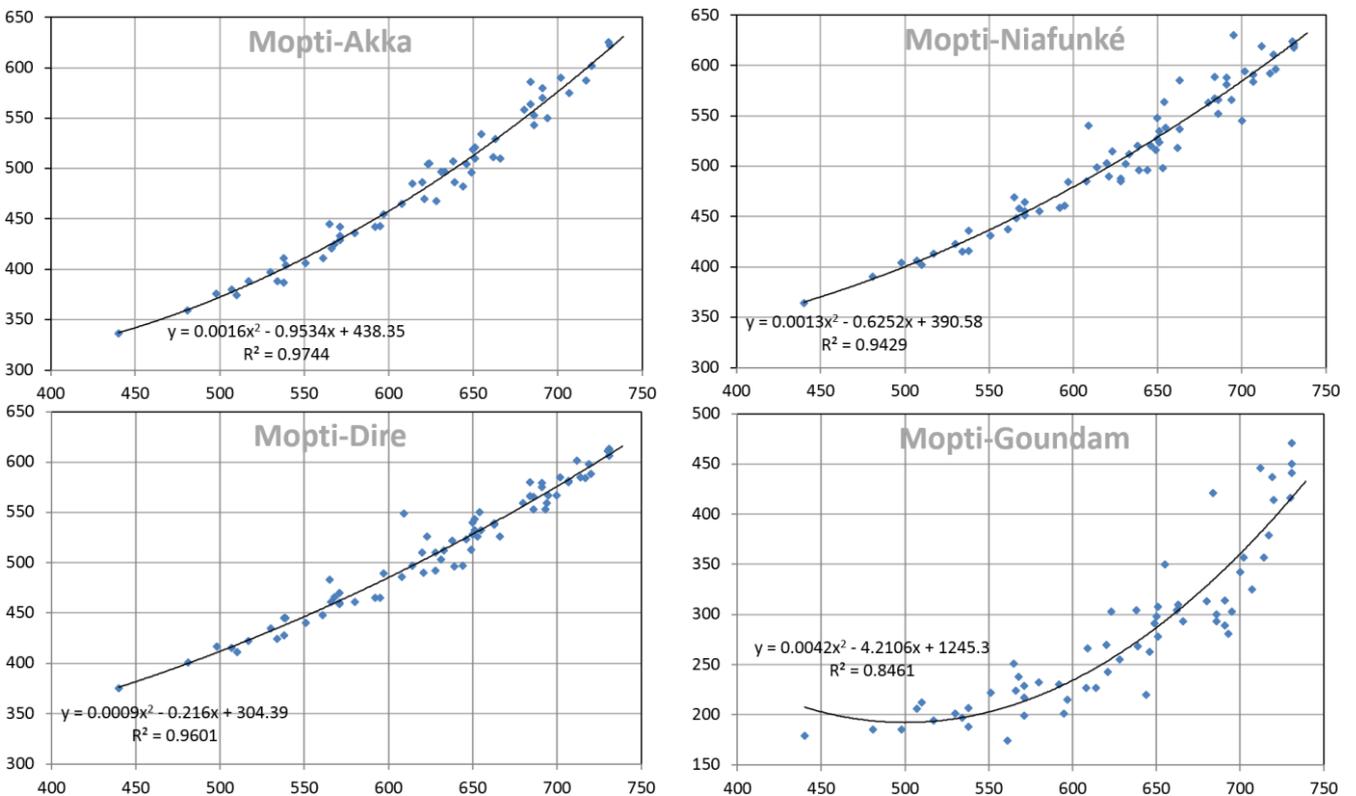


Fig. 7. Le niveau annuel du pic de la crue à Akka, Niafunké, Diré et Goundam comme une fonction du pic de la crue de la même année à Mopti, tous en cm, mêmes les données telles que figurant dans la Fig. 2 et 3.

2.5 Date du pic de la crue

Il n'y a presque pas de relation entre la hauteur du niveau du pic de la crue à Douna et la date à laquelle le pic de crue est atteint (Fig. 8). Le niveau le plus élevé à Douna est habituellement observé aux alentours du 19 septembre mais ceci une semaine plus tard, en moyenne, quand le niveau de l'eau est élevé. Le niveau élevé du pic de la crue à Beneny-Kegny (120 kms en aval de Douna) survient, en moyenne, 5 jours plus tard que sa survenance à Douna mais dans les années à niveau élevé de crue, le retard s'accroît de 12 jours. Le niveau du pic de la crue à Sofara, étant encore à 110 kms en aval, survient environ 20 jours plus tard après sa survenance à Douna, pendant une année moyenne. Dans une année extrêmement sèche ou extrêmement humide, cet écart de temps se situe entre 12 et 33 jours.

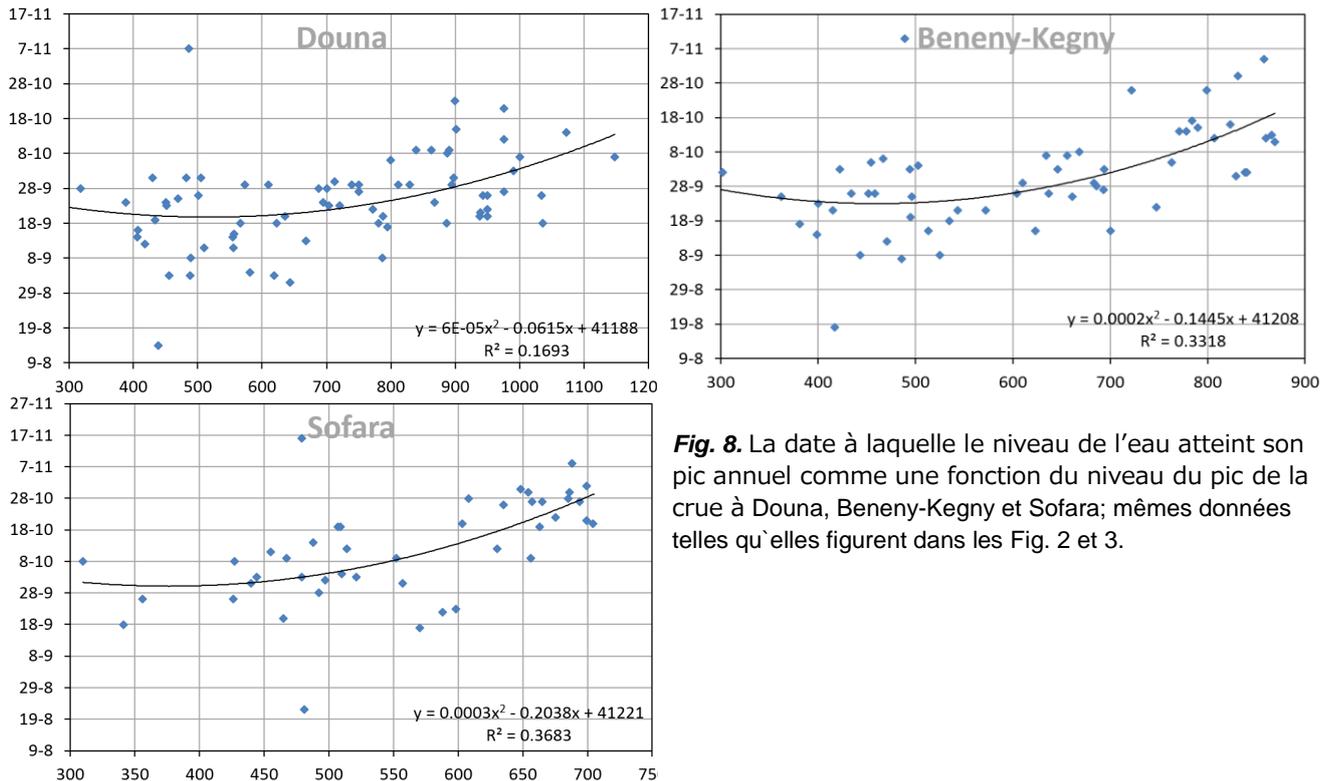


Fig. 8. La date à laquelle le niveau de l'eau atteint son pic annuel comme une fonction du niveau du pic de la crue à Douna, Beneny-Kegny et Sofara; mêmes données telles qu'elles figurent dans les Fig. 2 et 3.

La Fig. 9 montre la relation entre la hauteur du pic de la crue et la date correspondante pour les six (6) stations se trouvant dans le Delta Intérieur du Niger. A l'entrée du Delta, il n'y a presque pas de relation entre la hauteur et la date du pic de la crue, mais le retard est évident à Mopti et devient plus grand plus loin en aval (Table 1). En années humides, le retard est beaucoup plus grand qu'en années sèches.

Table 1. La date moyenne du niveau du pic de la crue à trois niveaux de crue: 500 cm (= <550), 600 cm (= 550-650 and 700 cm (= >650) à l'échelle de mesure de Mopti. Les mêmes données sont affichées dans la Fig. 9 sont utilisées. Cependant, pour rendre les données comparables, les niveaux moyens et les dates moyennes des niveaux de la crue dans les six (6) stations hydrométriques ont été catégorisées pour les trois catégories de crue à Mopti et non séparément pour les six (6) stations (comme fait dans la Fig. 9).

	Date moyenne du pic de la crue			Retard moyen après le 30/9		
	500 cm	600 cm	700 cm	500 cm	600 cm	700 cm
Ké-Macina	30-9	1-10	3-10	0	2	3
Mopti	19-10	29-10	22-11	19	29	53
Akka	3-11	18-11	15-12	35	49	76
Niafunké	8-11	29-11	3-1	39	60	95
Diré	14-11	4-12	13-1	45	65	105
Goundam	14-11	11-12	15-1	46	72	107

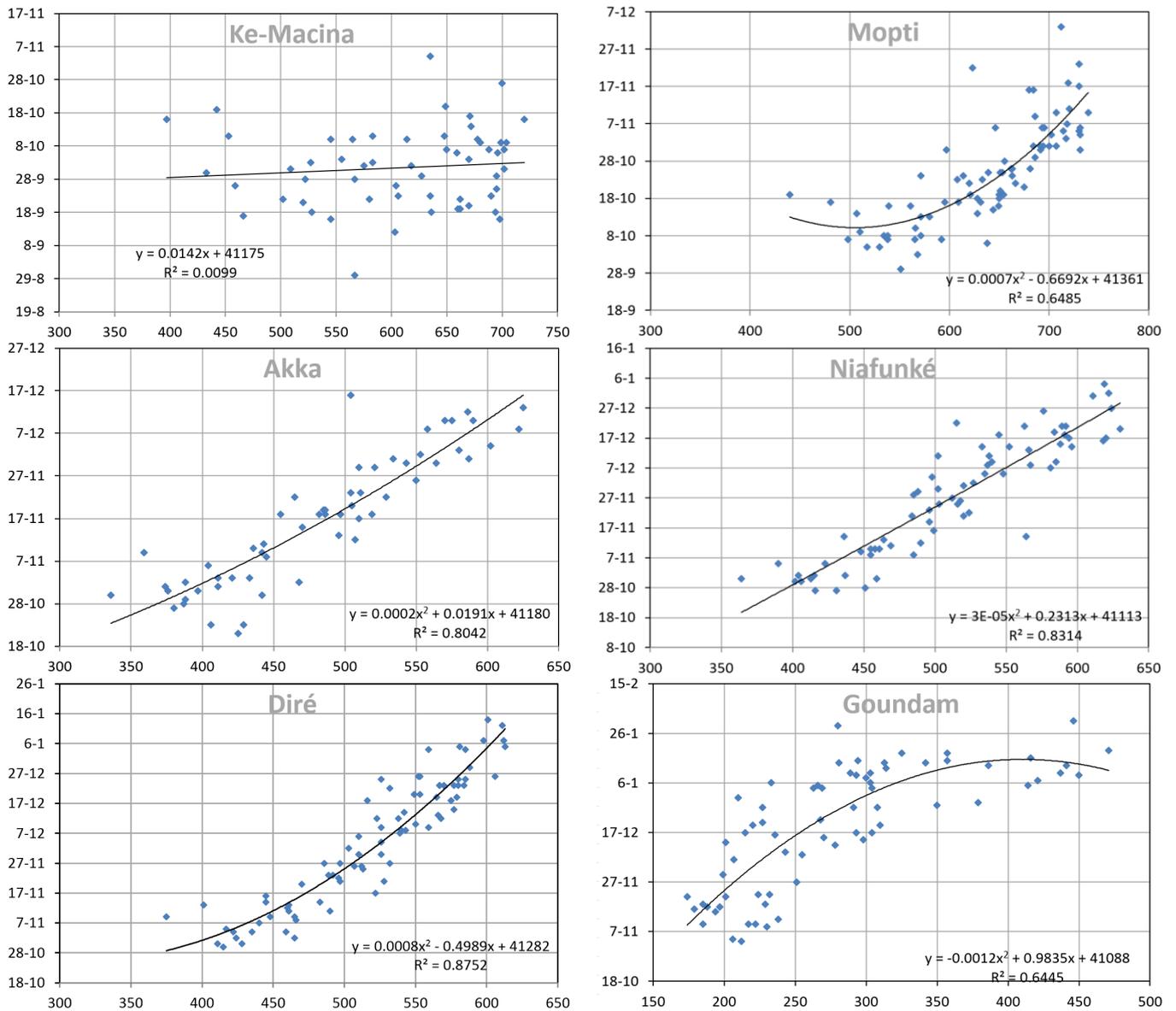


Fig. 9. La date à laquelle la crue atteint le niveau de son annuel comme une fonction du niveau du pic de la crue (cm) à Ké-Macina, Mopti, Akka, Niafunké, Diré et Goundam.

2.6 Prédiction de la crue : prendre en compte l'impact de Sélingué

Le réservoir de Sélingué a changé la courbe des inondations. Le niveau du pic de la crue est réduit parce que le réservoir est rempli en début de saison humide et vidé en saison sèche; ce qui fait que le débit du fleuve se double en avril et Mai. En conséquence, la relation entre le niveau de l'eau au début de la saison humide et le niveau du pic de la crue a changé. La Fig. 10 donne deux exemples : le niveau du pic de la crue comme une fonction du niveau de l'eau le 1^e et le 21 août. Le niveau de l'eau observe le 1^e août donne une indication brute du pic de la crue attendue mais il est évident que la prédiction avec ou sans Sélingué diffère d'une estimation de 61 cm en moyenne. La relation avec le niveau du pic de la crue est beaucoup meilleure le 21 août. L'impact moyen de Sélingué est réduit à 37 cm. Cette grande différence est due à un effet combiné : (1) dans les années ayant le même niveau du pic de la crue, le niveau de l'eau est, en moyenne plus élevé au début du mois d'août depuis la construction de Sélingué en raison de l'eau lâchée pendant la saison sèche ; (2) dans les années ayant un niveau d'eau similaire au début du mois d'août, le niveau du pic de la crue est plus bas depuis la construction de Sélingué parce que l'eau est retenue.

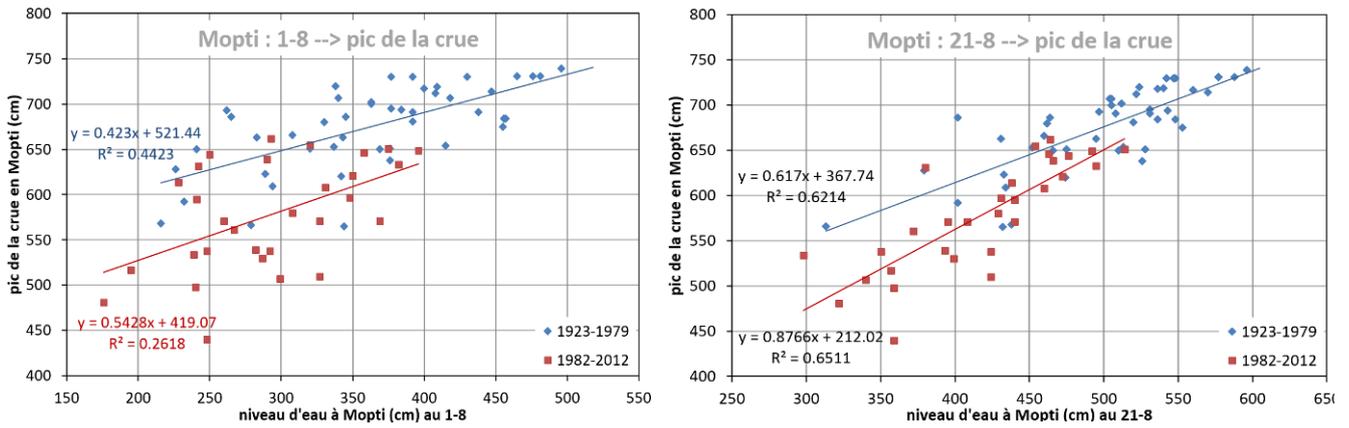


Fig. 10. Le pic de crue à Mopti comme une fonction du niveau de l’eau à Mopti le 1^e août (à gauche) et le 21 août (à droite) se divise pour les années avec ou sans Sélingué.

Il serait erroné de prédire le niveau du pic de la crue dans la situation actuelle (donc avec Sélingué) en utilisant l’équation de régression calculée sur toutes les données historiques. Le problème n’est résolu qu’en utilisant les années après la construction de Sélingué. Par contre, nous avons décidé d’utiliser toutes les données et calculer une équation à régression multiple avec une pente commune mais un point d’intersection pour prendre en compte la différence avant et après la construction de Sélingué. Pour illustrer le principe, la Fig. 11 montre le résultat d’une date, à savoir : le 1^e août.

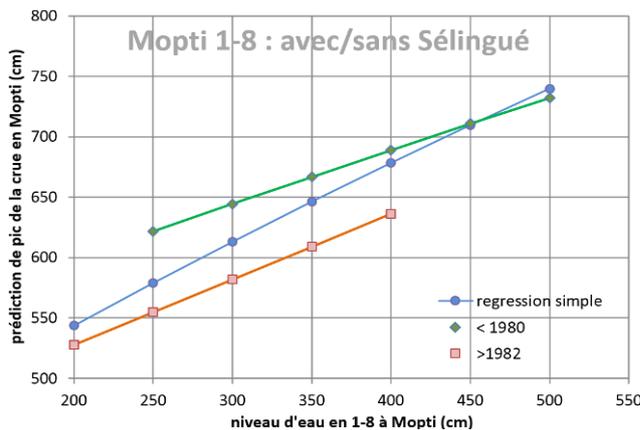


Fig. 11. Les données du 1^e août de la Fig. 10 sont utilisées pour calculer une équation de “régression simple” pour toutes les données (ligne bleue ; “régression simple”) et une équation de régression multiple, là où les données étaient divisées avant (ligne verte) et après (ligne rouge) la construction de Sélingué. Noter que les pentes des deux régressions sont égales et que seule l’interception diffère. La ligne rouge est utilisée dans OPIDIN pour prédire le niveau du pic de la crue.

2.7 Prédiction du pic de la crue : une relation curviligne

Les relations montrées dans la Fig. 10 sont linéaires en août mais plus tard dans la saison elles sont devenues curvilinéaires (Fig. 12). Nous avons donc utilisé dans OPIDIN les équations polynomiales de second degré pour établir la relation entre le niveau de l’eau en août-octobre au niveau du pic de la crue.

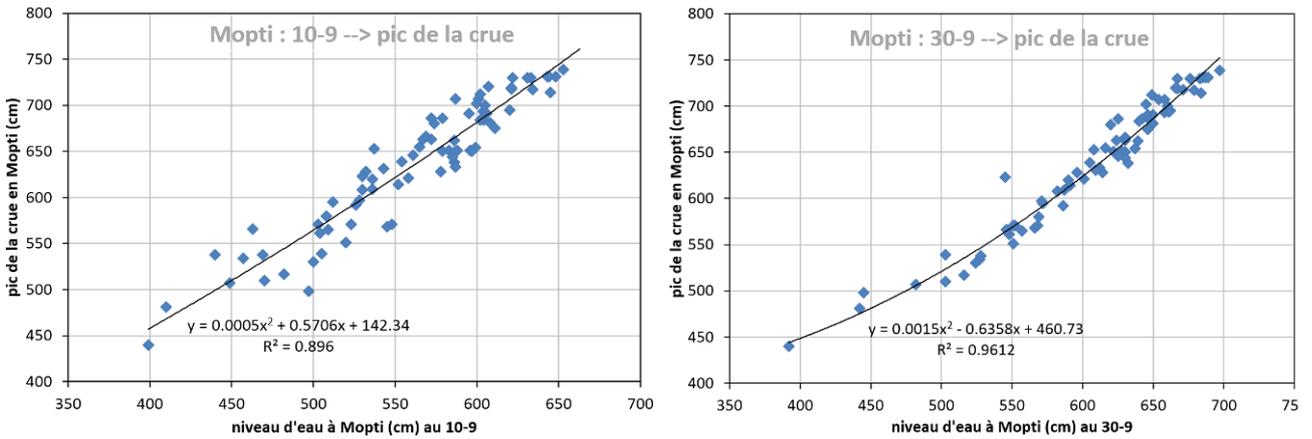


Fig. 12. Le niveau du pic de la crue à Mopti comme une fonction du niveau de l'eau mesuré à Mopti le 10 septembre (à gauche) et le 30 septembre (à droite). La relation est linéaire au début du mois d'août mais devient curvilinéaire en septembre.

2.8 Prédiction du niveau du pic de la crue : intervalles de confiance

Il est déjà évident en août, que le niveau du pic de la crue soit élevé ou bas. Par exemple, si le niveau de l'eau est de 550 cm le 20 août, nous pouvons dire que le niveau du pic de la crue sera de 700 cm, pendant que le niveau de l'eau n'est pas supérieur à 300 cm, la crue sera basse aussi, environ 500 cm (Fig. 13). La relation n'est pas parfaite, comme c'était déjà clair dans les Fig. 10 et 12, étant même plutôt mauvaise en juillet mais devenant meilleure plus tard dans la saison.

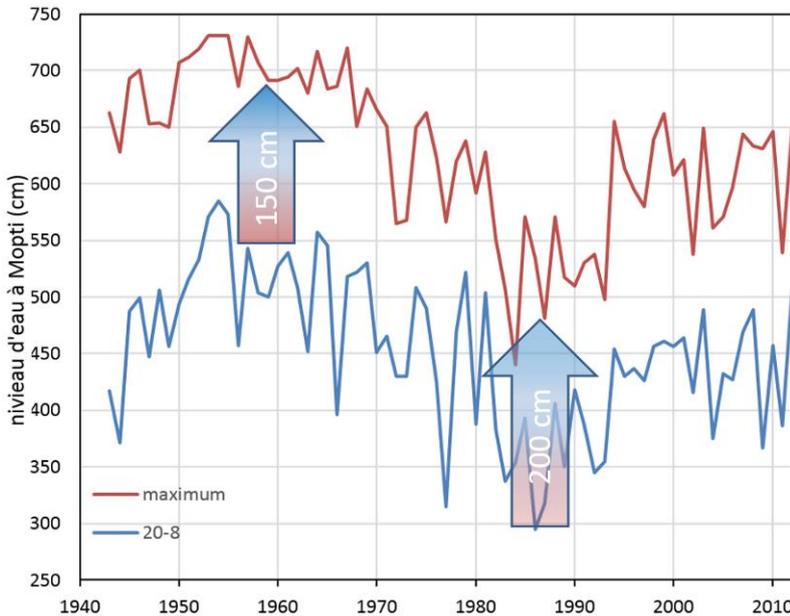


Fig. 13. La variation annuelle du pic à Mopti (ligne rouge) et le niveau de l'eau à Mopti le 20 août des 70 dernières années, pour montrer que le pic de la crue en octobre-décembre peut être déjà prédit en août.

Nous avons calculé la relation entre le niveau du pic de la crue à Mopti comme une fonction du niveau de l'eau à Mopti le 21 juillet, le 26 juillet, le 1^e août, le 5 août, le 16 octobre etc., jusqu'à 18 dates au total. La section suivante donne les équations de régression linéaire, mais ici nous accordons une attention à l'exactitude du niveau de crue prédit.

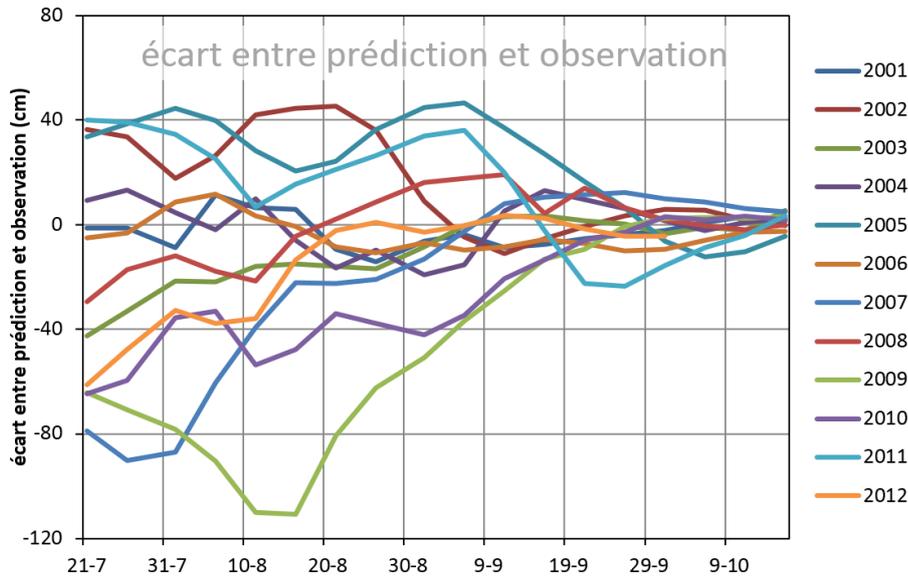


Fig. 14. L'écart entre le niveau de crue effectivement observé et le niveau de crue prédit à Mopti entre le 21 juillet et le 16 octobre. L'erreur est montrée pour les 12 dernières années.

Nous avons calculé le niveau du pic de crue prédit à Mopti en utilisant les 18 équations du 21 juillet au 16 octobre et avons comparé les valeurs prédites aux valeurs effectivement mesurées en octobre. La Fig. 14 montre pour 12 années (2001-2012) la différence entre le pic de crue prédit et le pic de crue effectivement mesuré. L'erreur est évidemment petite à partir de la mi-septembre. L'erreur est également petite dans la plupart des années dans les semaines précédentes mais il y a quelques années durant lesquelles les écarts sont grands. Par exemple, nous avons prédit un très bas niveau du pic de la crue en 2009, vu le niveau encore très bas de l'eau en août (voir la ligne verte de la Fig. 14). Les pluies sont arrivées tard cette année-là et le niveau de l'eau est monté rapidement à partir de la mi-août ; ce qui a aussi entraîné la montée du pic de crue prédit. Une grande sous-estimation similaire est survenue en 2007 jusqu'au début du mois d'août (voir la ligne bleu foncé de la Fig. 14). Il est évident qu'en se fondant sur la Fig. 14, la sous-estimation peut être relativement grande en juillet et août mais que les surestimations sont limitées. Apparemment, si le niveau de l'eau est déjà élevé en début de saison, ceci est toujours une indication d'une crue élevée, mais si le niveau de l'eau est encore bas, habituellement le pic de la crue sera bas, mais s'élève parfois.

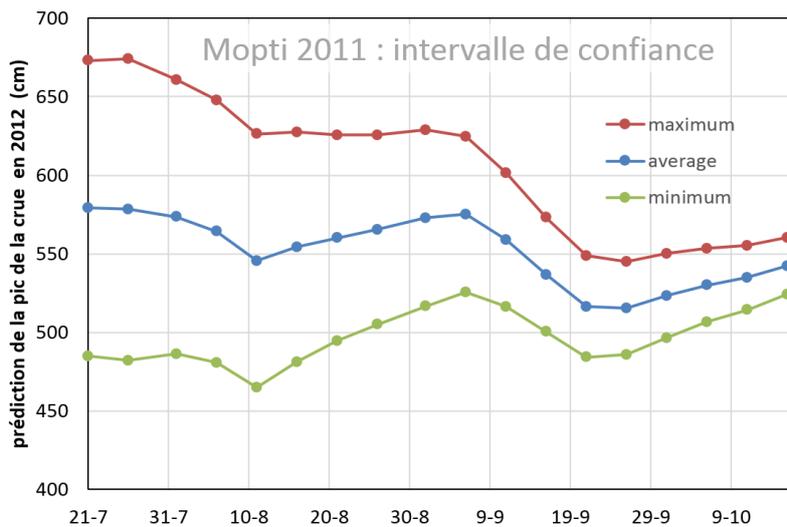


Fig. 15. Le niveau du pic de la crue prédit à Mopti en 2011 (ligne bleue). L'intervalle de confiance de 95% calculé (entre la ligne rouge et la ligne verte) est également donné. Le pic de crue effectivement mesuré le 16 octobre 2011 était de 539 cm, donc très proche des dernières prédictions.

Les équations donnent le niveau du pic de crue prédit mais donnent aussi les 95 % de l'intervalle de confiance ; ce qui signifie qu'il y a une probabilité que la prédiction tombera entre certaines limites. La Fig. 15 montre pour une année (2011) les prédictions à partir du 21 juillet et leur intervalle. En fin du mois de juillet 2012, on pouvait seulement dire que le pic de crue attend serait supérieur à 480 cm et inférieur à 670 cm. Au cours du mois d'août, l'exactitude s'est accrue graduellement. Il est donc

toujours important de donner la prédiction, non pas en simple valeur mais en tant que fourchette entre une valeur minimum attendue et une valeur maximum attendue.

2.9 Prédiction du pic de la crue : équations de régression

Le Tableau 2 donne un ensemble d'équations de régression utilisées pour prédire le niveau du pic de la crue à Mopti. La fonction peut être formulée comme suit :

$$\text{Pic-cm} = a + cm + cm^2 + \text{Sél (Sélingué)},$$

D`où cm = le niveau de l`eau à une certaine date,

Sélingué = 0 avant 1982 et Sél (Sélingué) = 1 depuis 1982.

A titre d`exemple : si le niveau de l`eau le 1^e septembre est de 500 cm, le niveau du pic de la crue prédit (cm) devient: $246,1 + 0,58*500 - 0,00033*500^2 - 26,3 = 594 \text{ cm}$.

L`intervalle de confiance (i.c.) du 1^e septembre est de 28 cm, ainsi la fourchette prédite est $594 \pm 28 \text{ cm}$, ou 566 - 622 cm.

Le tableau pertinent montre les formules utilisées pour calculer la date à laquelle le niveau du pic de la crue sera atteint. Exemple : si le niveau de l`eau au 1^e septembre est de 500 cm, le moment de survenance (`timing`) du niveau du pic de la crue prédit (date) devient:

$$41226 - 0,22*500 - 0,00035*500^2 - 2,2 = 41200.$$

C`est le nombre de jours du calendrier Julien qui peut être facilement converti (par exemple en Excel) à la date correspondante qui est le : 18 octobre 2012. Ici, l`année ne sied pas ; alors la prédiction est 18-10. L`intervalle de confiance (i.c.) du 1^e septembre est de 20 jours, ainsi la fourchette prédite pour le pic est le 18 octobre ± 20 jours ; alors, entre 28-9 et 7-11.

Table 2. Equations de progression multiple utilisées pour prédire le niveau du pic de la crue à Mopti en utilisant le niveau d`eau mesuré le 1, 6, 11 août, etc... jusqu`au 16 octobre. Le tableau de gauche donne les équations pour prédire le niveau du pic de la crue (en cm) et le tableau de droite donne les équations pour prédire la date à laquelle le pic de la crue est atteint. i.c.= 95% intervalle de confiance, R² = écart expliqué. Davantage d`explications sont données dans le texte.

CM	a	cm	cm ²	Sél	i.c.	R ²	DATE	a	cm	cm ²	Sél	i.c.	R ²
1-8	467,3	0,68	-0,00031	-61,3	44	0,63	1-8	41179	0,10	-0,00003	-6,8	22	0,34
6-8	423,7	0,80	-0,00041	-58,4	42	0,65	6-8	41165	0,17	-0,00011	-6,5	22	0,37
11-8	383,4	0,85	-0,00041	-54,0	41	0,67	11-8	41171	0,11	-0,00004	-6,3	23	0,35
16-8	274,4	1,13	-0,00058	-45,3	37	0,73	16-8	41171	0,08	0,00001	-5,2	23	0,36
21-8	266,4	0,93	-0,00023	-36,7	33	0,79	21-8	41177	0,02	0,00009	-3,5	21	0,41
26-8	304,6	0,56	0,00026	-31,5	30	0,82	26-8	41185	-0,04	0,00017	-2,4	23	0,44
1-9	246,1	0,58	0,00033	-26,3	28	0,85	1-9	41226	-0,22	0,00035	-2,2	20	0,44
6-9	185,4	0,65	0,00035	-19,9	25	0,88	6-9	41279	-0,43	0,00054	-1,4	20	0,46
11-9	157,3	0,62	0,00042	-17,1	21	0,91	11-9	41328	-0,61	0,00070	-1,4	20	0,47
16-9	230,5	0,29	0,00073	-15,9	18	0,93	16-9	41353	-0,69	0,00075	-1,6	20	0,47
21-9	313,1	-0,03	0,00100	-13,3	16	0,95	21-9	41379	-0,77	0,00081	-1,5	20	0,48
26-9	381,9	-0,31	0,00122	-9,0	15	0,96	26-9	41385	-0,78	0,00081	-1,0	20	0,48
1-10	389,1	-0,35	0,00124	-7,1	13	0,97	1-10	41391	-0,80	0,00081	-0,4	19	0,50
6-10	335,7	-0,18	0,00109	-6,0	12	0,97	6-10	41404	-0,84	0,00084	0,1	19	0,51
11-10	245,0	0,14	0,00078	-6,8	10	0,98	11-10	41398	-0,81	0,00081	0,4	19	0,53
16-10	217,2	0,28	0,00062	-7,6	9	0,98	16-10	41377	-0,74	0,00074	1,0	18	0,55

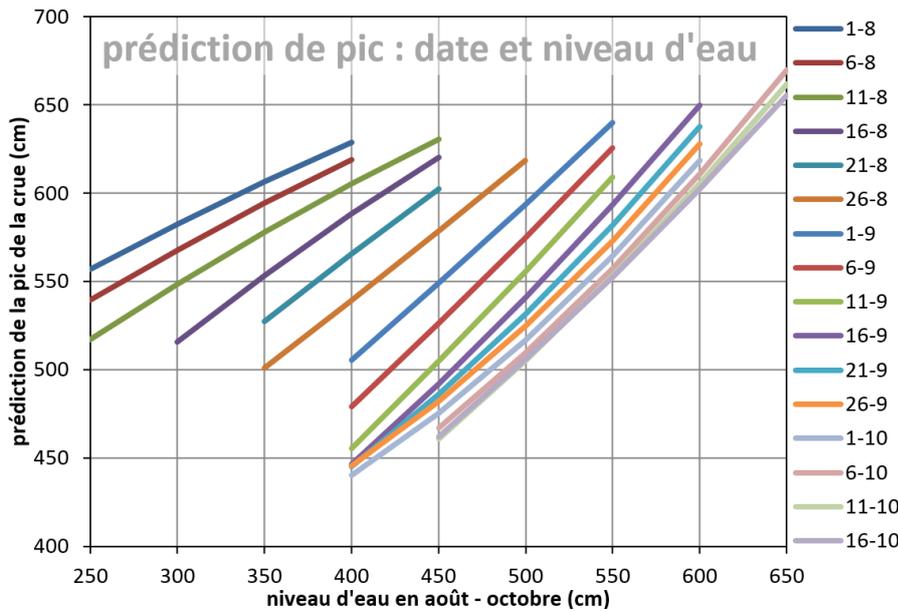


Fig. 16. Le pic de la crue prédit à Mopti comme une fonction du niveau de l'eau à 16 dates différentes. Les lignes sont calculées en utilisant les équations de régression données dans le Tableau 2.

Les niveaux du pic de la crue prédits comme une fonction de l'eau à des dates différentes sont donnés dans la Fig. 16. Les lignes de régression sont données pour la fourchette de valeurs qui sont jusqu'ici en train être observées. La Fig. 17 montre les niveaux du pic prédits à un certain niveau de l'eau à différentes dates. Les Fig. 16 et 17 basées sur l'équation de régression calculée pour les 16 différentes dates.

Pour les dates d'intervention et les niveaux d'eau d'intervention, le niveau du pic de la crue prédit et la date de prédiction du pic de la crue ont été calculés par interpolation. Comme résultat, nous avons obtenu un tableau avec des niveaux prédits du pic de la crue donnés dans 77 colonnes (par jour entre le 1^{er} août et le 16 octobre) et 481 lignes (par cm entre 180 et 660 cm).

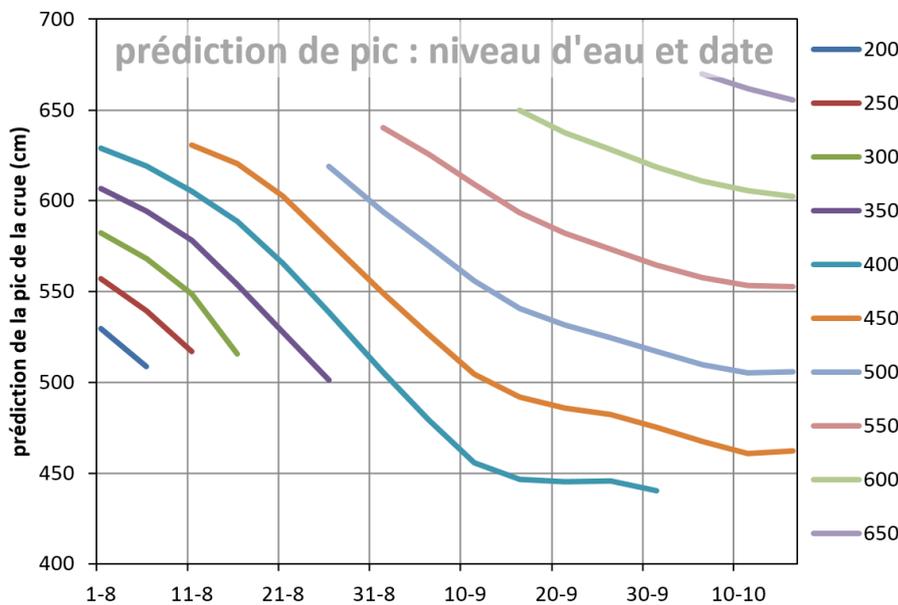


Fig. 17. Le pic de la crue prédit à Mopti comme une fonction du niveau de l'eau, les dates données séparément pour dix niveaux d'eau. Les lignes sont calculées en utilisant les équations de régression données dans le Tableau 2.

2.10 Prédiction du pic de la crue à Akka et Diré

Les mesures de l'eau en août-octobre à Mopti ont été utilisées pour prédire le pic de la crue à Mopti mais de la même façon les mesures ont été utilisées pour prédire l'inondation à Akka et Diré. Les équations de régression sont données dans le Tableau 3 (Akka) et le Tableau 4 (Diré). Les prédictions relatives à Akka sont moins exactes que celles relatives à Mopti, mais la différence entre les intervalles de confiance n'est pas grande (Fig. 18). Contre toute attente, les prédictions relatives à Diré sont

même plus exactes que celles relatives à Mopti, au moins avant mi-septembre. Il est également possible d'utiliser les niveaux de l'eau à Akka en août-septembre (au lieu de ceux de Mopti) pour prédire le pic de la crue à Akka mais comme montré dans une analyse antérieure, ceci donne des prédictions moins exactes pour Akka (Zwarts 2009a). Donc, ici nous n'utilisons que les niveaux d'eau à Mopti pour prédire les pics de la crue au niveau de plusieurs stations dans le Delta Intérieur du Niger.

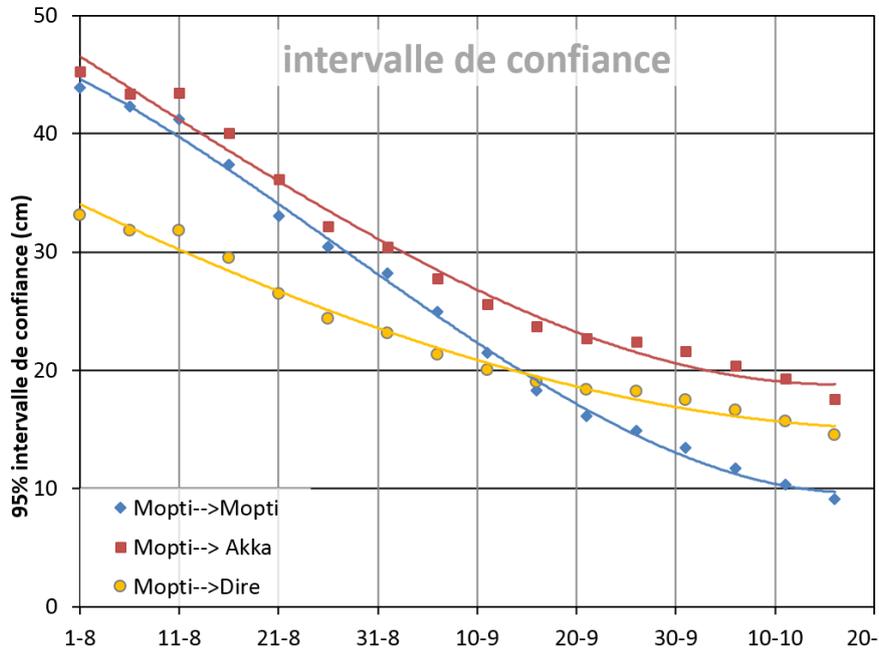


Fig. 18. Les intervalles de confiance des 18 équations de régression relatives au niveau de l'eau à certaines à Mopti pour le pic de la crue de la même année à Mopti (symboles bleus), à Akka (symboles rouges) et à Diré (symboles jaunes).

Tableau 3. Equations de régression multiple utilisées pour prédire le pic de la crue à Akka en utilisant le niveau d'eau mesuré à Mopti les 1, 6, 11 août, etc. ..., jusqu'au 16 octobre. Le tableau de gauche donne les équations pour prédire le niveau du pic de la crue (en cm) et le tableau de droite donne les équations pour prédire la date à laquelle le pic de la crue est atteint. i.c. = 95% Intervalle de confiance, R² = écart expliqué. Davantage d'explications sont données dans le texte.

cm	a	cm	cm ²	Sél	i.c.	R ²
1-8	407,0	0,02	0,00089	-51,7	45	0,63
6-8	396,1	-0,01	0,00089	-47,7	43	0,66
11-8	376,1	0,03	0,00078	-45,5	43	0,66
16-8	312,3	0,18	0,00064	-39,3	40	0,71
21-8	316,6	-0,01	0,00090	-33,2	36	0,77
26-8	457,9	-0,81	0,00182	-27,2	32	0,81
1-9	573,3	-1,39	0,00239	-24,9	30	0,83
6-9	632,3	-1,70	0,00267	-20,4	28	0,86
11-9	714,9	-2,05	0,00297	-20,0	26	0,88
16-9	743,9	-2,14	0,00298	-20,6	24	0,90
21-9	808,1	-2,33	0,00308	-19,6	23	0,91
26-9	832,2	-2,40	0,00308	-16,5	22	0,91
1-10	789,6	-2,23	0,00289	-15,1	22	0,92
6-10	782,6	-2,19	0,00282	-13,9	20	0,93
11-10	696,8	-1,85	0,00247	-15,5	19	0,93
16-10	627,2	-1,55	0,00215	-16,0	18	0,95

date	a	cm	cm ²	Sél	i.c.	R ²
1-8	41224	-0,05	0,00025	-7,6	23	0,43
6-8	41200	0,07	0,00006	-7,0	22	0,46
11-8	41200	0,06	0,00007	-6,8	23	0,44
16-8	41189	0,08	0,00005	-6,0	22	0,46
21-8	41188	0,06	0,00009	-4,9	21	0,51
26-8	41216	-0,10	0,00028	-3,7	21	0,55
1-9	41260	-0,30	0,00047	-3,3	20	0,55
6-9	41306	-0,49	0,00065	-2,5	20	0,56
11-9	41352	-0,67	0,00080	-2,6	20	0,57
16-9	41366	-0,70	0,00082	-2,8	20	0,58
21-9	41391	-0,78	0,00087	-2,6	19	0,59
26-9	41393	-0,78	0,00085	-2,0	19	0,60
1-10	41391	-0,77	0,00083	-1,6	19	0,61
6-10	41404	-0,81	0,00086	-1,0	19	0,64
11-10	41394	-0,77	0,00082	-0,9	18	0,66
16-10	41369	-0,68	0,00073	-0,4	17	0,70

Table 4. Equations de régression multiple utilisées pour prédire le pic de la crue à Dir en utilisant le niveau d'eau mesuré à Mopti les 1, 6, 11 août, etc., jusqu'au 16 octobre. Le tableau de gauche donne les équations pour prédire le niveau du pic de la crue (en cm) et le tableau de droite donne les équations pour prédire la date à laquelle le pic de la crue est atteint ; c.i. = 95% intervalle de confiance, R^2 = écart expliqué. Davantage d'explications sont données dans le texte.

cm	a	cm	cm ²	Sél	c.i.	R ²
1-8	443,4	0,15	0,00040	-58,3	33	0,71
6-8	412,1	0,25	0,00026	-55,4	32	0,73
11-8	392,3	0,28	0,00021	-53,5	32	0,73
16-8	316,8	0,49	0,00004	-46,9	29	0,77
21-8	304,1	0,39	0,00022	-40,3	26	0,81
26-8	344,4	0,07	0,00061	-36,2	24	0,84
1-9	356,3	-0,11	0,00084	-33,1	23	0,86
6-9	362,5	-0,24	0,00099	-28,7	21	0,88
11-9	395,6	-0,43	0,00117	-27,4	20	0,89
16-9	452,2	-0,65	0,00135	-27,2	19	0,90
21-9	541,9	-0,97	0,00160	-25,8	18	0,91
26-9	586,6	-1,13	0,00171	-23,0	18	0,91
1-10	580,9	-1,12	0,00168	-21,4	18	0,92
6-10	554,6	-1,02	0,00158	-20,4	17	0,93
11-10	507,5	-0,84	0,00140	-20,7	16	0,93
16-10	471,2	-0,68	0,00122	-20,9	15	0,94

date	a	cm	cm ²	Sél	c.i.	R ²
1-8	41237	-0,03	0,00023	-18,5	31	0,51
6-8	41213	0,09	0,00006	-17,3	30	0,53
11-8	41220	0,03	0,00012	-17,3	30	0,51
16-8	41205	0,07	0,00010	-15,3	30	0,54
21-8	41196	0,06	0,00013	-13,0	28	0,58
26-8	41211	-0,05	0,00026	-11,3	27	0,61
1-9	41258	-0,28	0,00050	-10,2	26	0,63
6-9	41307	-0,49	0,00070	-8,8	26	0,65
11-9	41381	-0,77	0,00095	-8,4	25	0,67
16-9	41427	-0,94	0,00108	-8,2	25	0,68
21-9	41469	-1,07	0,00118	-7,8	24	0,69
26-9	41478	-1,10	0,00118	-6,9	24	0,69
1-10	41482	-1,10	0,00118	-6,1	24	0,71
6-10	41497	-1,15	0,00120	-5,4	23	0,72
11-10	41499	-1,14	0,00118	-5,2	22	0,74
16-10	41479	-1,07	0,00111	-4,6	21	0,76

2.11 Prédiction de la date de début de la décrue

Pour beaucoup d'habitants du Delta intérieur du Niger, la date à laquelle l'eau a baissé d'un certain niveau, est plus importante que la crue elle-même. La date de début de la décrue varie beaucoup entre les années. Si le pic de la crue a été bas, la plupart des plaines d'inondation sont déjà sèches dans la deuxième moitié du mois de décembre, mais s'il a été élevé, cette situation de sécheresse des plaines d'inondation survient en avril, quatre mois plus tard (Fig. 19). Les graphiques montrent la période de la décrue quand le niveau de l'eau a baissé de 200 et à 100 cm à Akka comme une fonction du pic de la crue à Mopti quelques mois auparavant. Le même type de relations peut facilement être calculé pour d'autres stations et d'autres niveau d'eau.

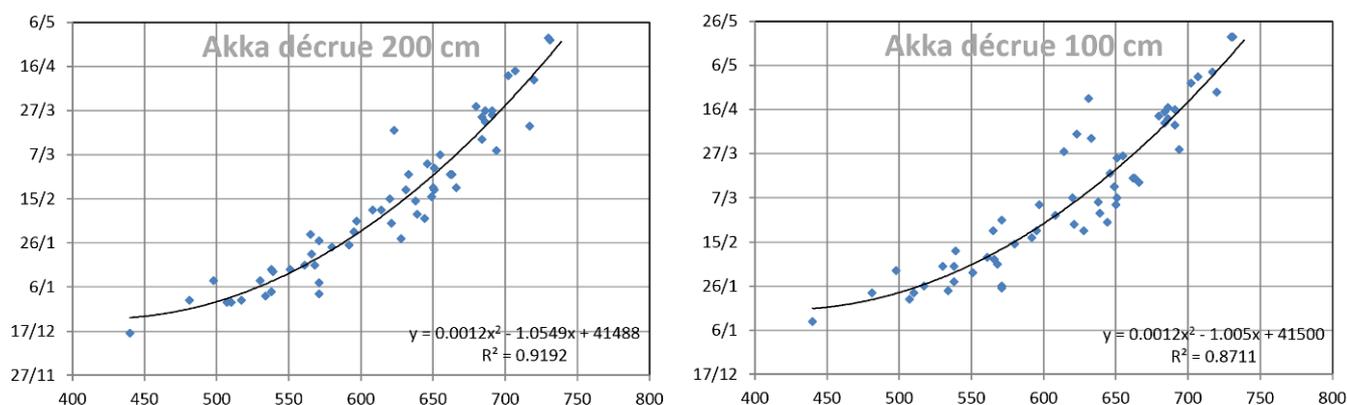


Fig. 19. Le moment où le niveau de l'eau à Akka a chuté à 200 cm (gauche) ou à 100 cm (droite) comme une fonction du niveau du pic de la crue à Mopti quelques mois auparavant.

2.12 OPIDIN et le calendrier de traversées

Les bergers et leur bétail doivent traverser le fleuve pendant la décrue. Il y a trente-deux passages fréquemment utilisés. La date à laquelle il est autorisé de faire passer le bétail (bœufs, vaches et veaux) diffère selon les points de passage parce que la plaine d'inondation de la partie Sud-Est devient disponible avant la plaine d'inondation du Delta Central du Niger et l'accès y est déjà autorisé en novembre à Diafarabé. Entre 90 à 110 jours plus tard, la zone proche du Lac Walado est ouverte aux animaux pour le pâturage.

La réunion annuelle des acteurs cherche à déterminer le moment où le bétail est autorisé à entrer dans les différentes zones du Delta Intérieur. Cette réunion se tient dans la deuxième quinzaine d'octobre, donc encore durant la montée des eaux ou aux environs du moment des hautes eaux. Ainsi, la réunion arrive à prendre une décision relative au ``calendrier de déplacements``, aussi connu sous le vocable de ``calendrier des traversées`` ou même ``calendrier de la campagne des bourgoutières`` basé sur la date probable à laquelle la plaine d'inondation deviendra disponible à cet effet.

La date de la traverse du fleuve à Diafarabé pendant la période 1980-2009 a varié entre le 5-11 et le 17-12 (Fig. 20). La date moyenne était le 23 novembre, 30 % des dates annuelles étaient de 1 ou 2 jours après cette moyenne et dans 77 % des années elle était jusqu'à 9 jours plus tôt ou au plus tard par rapport au 23 novembre.

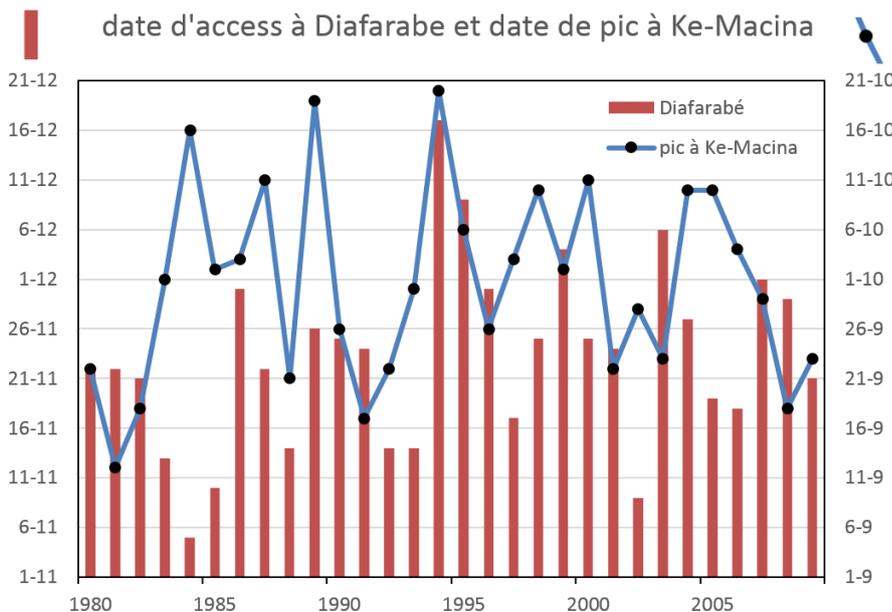


Fig. 20. La date annuelle entre 1980 et 2009 à laquelle il a été autorisé de faire entrer le bétail (bœufs, vaches et veaux) dans le Delta Intérieur du Niger à Diafarabé (barres rouges ; axe à gauche), comparée à la date à laquelle le niveau d'eau atteint son pic à Ké-Macina (ligne bleue; axe à droite). Ké-Macina est choisi ici puisque c'est la station hydrométrique la plus proche.

La variation de la date annuelle de la traversée du fleuve était liée au niveau du pic de la crue à Ké-Macina (Fig. 21). Deux régressions sont données : la ligne continue montre la régression linéaire, la ligne en pointillé donne la relation curviligne. L'ensemble de données n'est pas assez grand et la gamme trop large pour décider quelle est celle qui convient le mieux. Quelle que soit la régression utilisée, cela n'a pas d'importance dans les années ayant un pic moyen de la crue de 450 - 650 cm, mais la régression linéaire tend à arriver à une date probable qui est trop précoce dans les années extrêmement sèches ou extrêmement humides.

La réunion annuelle avec les acteurs se tient dans la deuxième quinzaine du mois d'octobre. Ainsi, quelques semaines après, le pic de la crue à Ké-Macina est atteint (voir Fig. 2 et 4). Alors, la Fig. 21 peut être utilisée comme une ligne directrice pour arriver à une date raisonnable de la traversée du fleuve.

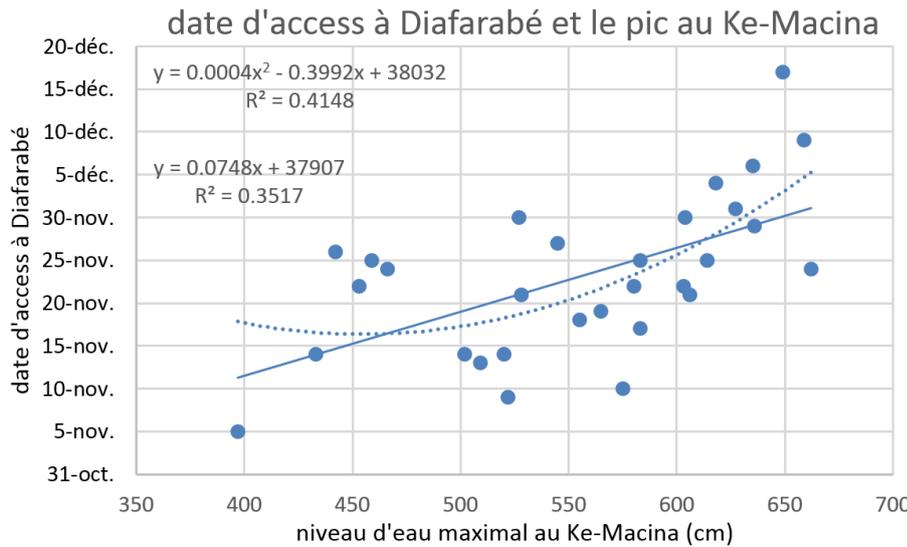


Fig. 21. Date annuelle à laquelle il est autorisé de faire entrer le bétail (bœufs, vaches et veaux) dans le Delta Intérieur du Delta à Diafarabé comme une fonction du pic de la crue à Ké-Macina dans la même année; mêmes données que la Fig. 20. Une régression linéaire et une régression curviligne sont montrées.

Le *calendrier de traversées* sert à indiquer la date à laquelle les bourgoutières inondées deviennent accessibles comme pâturages. Une façon de vérifier les dates prédites est de consulter la base de données de la DNH concernant le niveau de l'eau à Ké-Macina sur les données annuelles de la traversée du fleuve à Diafarabé (Fig. 22). Le niveau moyen de l'eau a atteint 254 cm, mais la variation est grande puisqu'il varie entre 180 and 340 cm à Ké-Macina (l'écart standard est de 41 cm). Il n'y a pas d'amélioration si on utilise à la place le niveau d'eau à Mopti. Dans ce cas, le niveau d'eau moyen au moment de la traversée est de 420 cm à Mopti, mais l'écart standard est double (84 cm).

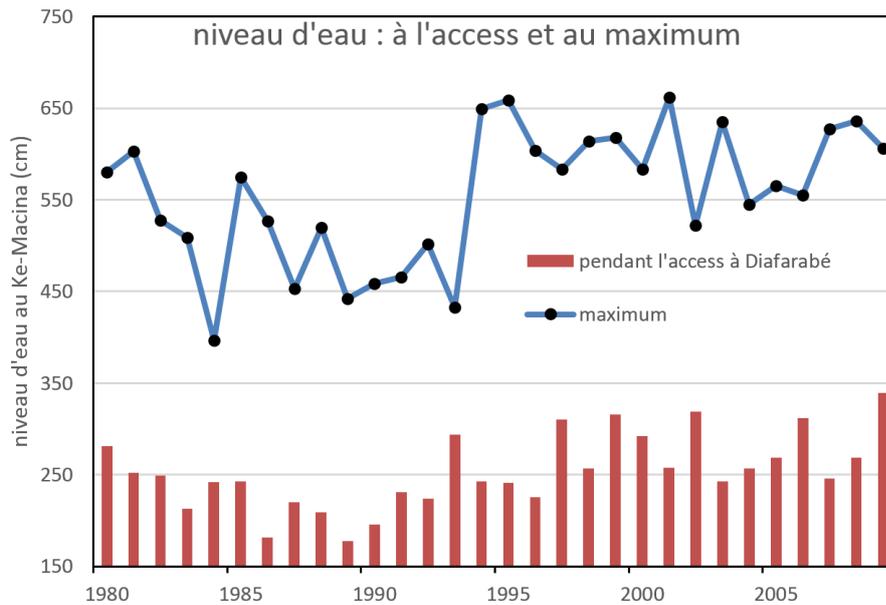


Fig. 22. Le niveau de l'eau à Ké-Macina à la date à laquelle les troupeaux sont autorisés à entrer dans le delta intérieur à Diafarabé (barres rouges), comparé au niveau maximal de l'eau à Ké-Macina pour la même année (ligne bleue).

Une partie de la variation du niveau de l'eau peut être expliquée par le niveau du pic de la crue (comparer la ligne bleue et les barres de la Fig. 22). Dans les années ayant un pic de crue bas, le bétail (bœufs, vaches et veaux) arrive plus tôt pendant la saison (Fig. 21) quand le niveau de l'eau est, en moyenne, déjà plus bas que dans une année humide. Par contre, dans les années ayant un pic de crue élevé, les animaux doivent attendre longtemps, c'est dire jusqu'en décembre quand le niveau de l'eau est, néanmoins, encore relativement élevé. La tendance est claire mais la variation annuelle est grande (Fig. 23).

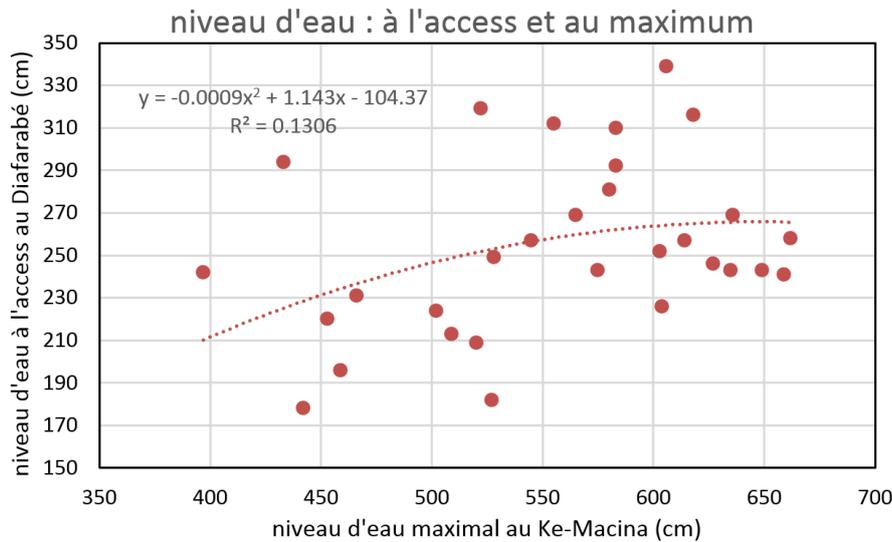


Fig. 23. Niveau de l'eau à Ké-Macina à la date à laquelle il est autorisé de faire entrer les animaux (vaches, bœufs, veaux) dans le Delta Intérieur du Niger à Diafarabé comme une fonction du niveau maximum de l'eau à Ké-Macina dans la même année. Mêmes données que dans la Fig. 22.

La date à laquelle les animaux ont accès au Delta Intérieur du Niger est un compromis entre différents intérêts. La traversée du fleuve à Diafarabé a lieu, en moyenne, 54 jours après la survenance du pic de la crue à Ké-Macina (Fig. 20 ; l'écart standard est de 13 jours). Le pic de la crue est atteint à Mopti plus tard (Fig. 2 et 4), le temps de retard entre la survenance du niveau du pic à Mopti et la traversée du fleuve à Diafarabé est également moindre : 30 jours, en moyenne (écart standard : 10 jours).

Les animaux ne doivent pas arriver trop tôt afin que les problèmes avec les riziculteurs soient évités ; une arrivée tardive de 54 jours après que le pic de la crue ait été atteint doit être suffisante. La pression du bétail pour entrer dans le Delta Intérieur du Niger est beaucoup plus grande pendant les années sèches. Le créneau entre l'arrivée tardive des animaux et la survenance du pic de la crue à Ké-Macina peut être décrit avec une fonction linéaire ($R^2 = 0,33$). Pour un pic de la crue de 400 cm à Ké-Macina, la traversée du fleuve à Diafarabé est déjà à 40 jours après la survenance du pic de la crue à Ké-Macina. Pour un pic de 500 ou 600 cm, l'arrivée tardive des animaux s'accroît en passant à 50 ou 60 jours. Ainsi, une simple règle à retenir est la suivante : la date d'accès à Diafarabé (jours après la date du pic de la crue à Ké-Macina) est le niveau du pic de la crue à Ké-Macina divisé par 10. La date d'accès peut également être tirée de la Fig. 22, dès que le niveau du pic de la crue à Ke-Macina est connu.

Une alternative est l'utilisation d'OPIDIN pour prédire la date à laquelle le niveau de l'eau a baissé à un certain niveau. Cependant, il doit être d'abord clair si la date doit être prédite pour un certain niveau, par exemple le niveau d'eau moyen de 254 cm à Ké-Macina, ou si la date prédite doit prendre en compte le niveau du pic de la crue, par exemple, prédire la date à laquelle le niveau de l'eau est descendu à 250 cm, si le pic de la crue a été normal ou élevé (500-650 cm) ou attendre jusqu'à ce que le niveau de l'eau soit descendu à 220 cm, dans le cas d'un pic de la crue extrêmement bas (Fig. 23)

3 Bibliographie

Zwarts, L. 2009a. Predicting the annual peak flood level in the Inner Niger Delta. A&W-report 1254. Altenburg & Wymenga, ecological consultants, Feanwâlden.

http://www.altwym.nl/uploads/file/491_1369644431.pdf

Zwarts, L. 2009b. Towards a further extension of the OPIDIN tool. A&W Report 1514. Altenburg & Wymenga, ecological consultants, Feanwâlden.

http://www.altwym.nl/uploads/file/390_1294301749.pdf

Zwarts, L. 2009b. Vers une extension future de l'outil OPIDIN. A&W Report 1514. Altenburg & Wymenga, ecological consultants, Feanwâlden.

http://www.altwym.nl/uploads/file/391_1294302031.pdf

Zwarts, L & Hoekema, F.S. 2013. Atlas. Les plaines inondables du Delta Intérieur du Niger. Altenburg & Wymenga, ecological consultants, Feanwâlden.

http://www.altwym.nl/uploads/file/494_1372419095.pdf (13.7 MB) ou

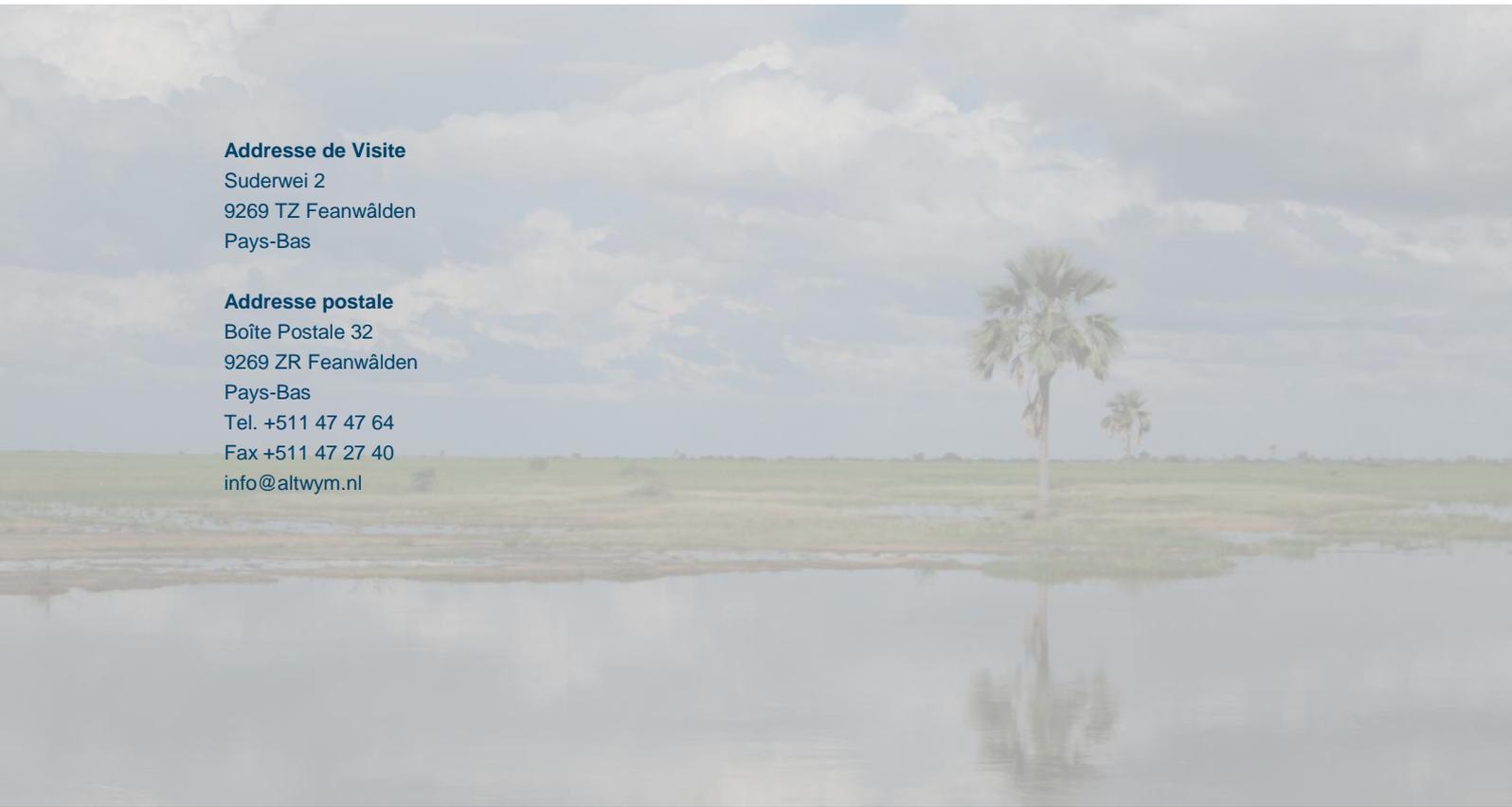
http://www.altwym.nl/uploads/file/495_1372420527.pdf (24.0 MB).

Zwarts, L., Beukering van, P, Kone, B, Wymenga, E. 2005. The Niger, a lifeline. Effective water management in the Upper Niger Basin. 304 p.

http://www.altwym.nl/uploads/file/361_1289481552.pdf

Zwarts, L., Beukering van, P, Kone, B, Wymenga, E. 2005. Le Niger, une artère vitale. Gestion de l'eau efficiente dans le bassin du Niger Supérieur. 304 p.

http://www.altwym.nl/uploads/file/361_1289481552.pdf



Adresse de Visite

Suderwei 2
9269 TZ Feanwâlden
Pays-Bas

Adresse postale

Boîte Postale 32
9269 ZR Feanwâlden
Pays-Bas
Tel. +511 47 47 64
Fax +511 47 27 40
info@altwym.nl