Analyse de deux phénomènes observés en saison sèche à la station de Podor sur le fleuve Sénégal, en régime d'écoulement influencé par les barrages de Diama et Manantali : abaissement anormal du niveau et fluctuations périodiques infra-journalières

Jean-Claude Bader

Jean-Christophe poussin

IRD/G-EAU, Montpellier, 12/03/2019

Résumé

On met en évidence une fluctuation périodique du niveau du fleuve Sénégal à la station de Podor en période d'étiage, qui s'ajoute à l'évolution moyenne du niveau et se traduit par un rehaussement en début de journée à 8H et un abaissement en fin de journée à 18H. Ce signal périodique analysé de décembre à juin s'observe sur toute la période analysée (du 01/01/2000 au 11/03/2019). Son amplitude moyenne tend à augmenter avec le temps, en passant de 2 cm en 2000 à 4 cm en 2019. Ceci permet de penser que les fluctuations ont une origine anthropique, au moins partielle (prélèvements diurnes probablement).

On met également en évidence une inversion de pente moyenne de ligne d'eau entre les stations de Podor et Richard Toll, intervenue de façon prolongée à deux reprises depuis janvier 2019 et qui perdure depuis le 18/02/2019. L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer ce phénomène, compte tenu des niveaux observés à Podor, Richard Toll et Diama et des débits observés à Matam et Diama, correspond à une alimentation du fleuve par un reflux du lac de Guiers par le canal de la Tahouey. Une partie de cet apport pourrait alors remonter le fleuve à partir de Richard Toll, du fait des apports de l'amont très affaiblis par les prélèvements et l'évaporation entre Matam et Podor.

Des mesures de débit sur le terrain seraient nécessaires pour expliquer l'origine des deux phénomènes de façon certaine.

Objectif

La cote du fleuve Sénégal est relevée une fois par jour à Diama (à 8H) et deux fois par jour à Richard Toll et Podor (à 8H et 18H). Les relevés récents montrent les deux phénomènes suivants :

- en valeurs moyennes journalières (fig. 1), le niveau du fleuve à Podor s'abaisse nettement, à deux reprises et de façon prolongée (du 16/01 au 22/01/2019 et du 18/02 au 11/03/2019), en dessous du niveau à Richard Toll et même en dessous du niveau à Diama amont ;
- en valeurs instantanées (fig. 2), le niveau du fleuve à Podor fluctue nettement de façon périodique autour du niveau moyen journalier, avec une élévation entre 18H et 8H le lendemain et un abaissement entre 8H et 18H.

L'objectif de cette note est d'analyser ces deux phénomènes, à partir des relevés de cote accumulés depuis 2000 jusqu'au 11/03/2019. Toutes les cotes sont exprimées en valeur absolue IGN (après

correction des relevés aux échelles, dont les zéros se situent aux altitudes 0, -40 et -44 cm à Diama, Richard Toll et Podor). Seules les cotes réellement observées sont exploitées, toute valeur précédemment reconstituée étant exclue de l'analyse. Enfin on ne prend en compte que les relevés effectués entre le 1er décembre et le 30 juin, pour des niveaux à Podor compris entre 190 et 250 cm IGN.

Fluctuations périodiques infra-journalières du niveau à Podor

Amplitude des fluctuations et évolution dans le temps

Les fluctuations sont analysées en considérant les niveaux instantanés réels à 8H et 18H, obtenus ainsi :

- du 02/09/2000 au 26/05/2006, les relevés disponibles proviennent d'enregistrements limnigraphiques et présentent plusieurs valeurs instantanées par jour. Chaque niveau instantané réel à 8H ou 18H en est alors déduit par interpolation linéaire, si et seulement si un délai inférieur ou égal à 4 heures le sépare du relevé le plus proche ;
- du 01/01 au 01/09/2000 et du 27/05/2006 au 11/03/2019, les niveaux instantanés réels à 8H ou 18H correspondent aux relevés biquotidiens effectués à ces heures par lecture d'échelle.

A partir des couples de niveaux instantanés réels à 8H sur deux jours consécutifs j et j+1, on calcule par interpolation linéaire un niveau *Hint* à 18H au jour j. Si par ailleurs on dispose du niveau instantané réel *Hobs* à 18H pour le jour j, on calcul alors la différence *Hobs-Hint*. On obtient ainsi 2819 valeurs de *Hobs-Hint*.

Si aux fluctuations du niveau moyen journalier ne s'ajoutait aucun signal périodique rehaussant le niveau à 8H et abaissant le niveau à 18H, alors *Hobs-Hint* devrait fluctuer de façon aléatoire autour de zéro. Or le cumul chronologique de *Hobs-Hint* décroît globalement et de façon régulière en fonction du rang R évoluant entre 1 et 2819 (fig. 3). Ceci montre qu'en moyenne, *Hobs* est globalement inférieur à *Hinst* sur toute la période 2000-2019.

L'évolution du cumul de *Hobs-Hint* en fonction du rang chronologique R peut être représentée par la fonction moyenne $g(R)$ suivante :

$$g(R) = -45.613-2.1026R-0.00035447R^2 \qquad (NSE = 0.99923)$$

La dérivée de $g(R)$ par rapport à R correspond par principe à *Hobs-Hint*. Ses valeurs (fig. 3) montrent que la moyenne de *Hobs-Hint* passe de -2.10 cm en 2000 (pour R=1) à -4.10 cm en 2019 (pour R=2819).

Ces résultats sont confirmés par l'évolution de *Hobs-Hint* en fonction de la date (fig. 4), qui peut être représentée par la fonction moyenne $k(D)$, où D est le nombre de jours écoulés depuis le 01/01/2000 :

$$k(D) = -2.2432-0.000084900D-0.000000021536D^2 \qquad (NSE = 0.03360)$$

La fonction $k(D)$ est décroissante et passe de -2.24 cm le 01/01/2000 à -3.90 cm le 11/03/2019.

Les résultats ci-dessus montrent donc que les fluctuations périodiques infra-journalières (abaissement à 18H et rehaussement à 8H), qui s'ajoutent à l'évolution moyenne du niveau à Podor, perdurent en s'amplifiant depuis 2000. L'abaissement moyen du niveau entre 8H et 18H, qui s'élevait à 2 cm en 2000, atteint désormais 4 cm en 2019.

Tentative de traduction des fluctuations de niveau en termes de débit

Les constations ci-dessus sont basées sur les relevés effectués entre le 1er décembre et le 30 juin de 2000 à 2019, uniquement pour des niveaux se situant à Podor entre 190 et 250 cm IGN. Avec les mêmes critères de sélection, les relevés permettent d'obtenir un échantillon de 3232 individus constitués chacun de 4 valeurs moyennes journalières : niveau à Podor, niveau à Diama amont, débit à Matam (décalé de -3 jours) et débit à Diama.

Les médianes et moyennes de niveau et débit obtenus sur cet échantillon, assez proches des valeurs observées de janvier à mars 2019 (fig. 1), sont données dans le tableau 1 ci-dessous.

	niveau Podor (cm IGN)	niveau Diama (cm IGN)	débit Matam (m^3/s)	débit Diama (m^3/s)
moyenne	225.1	216.8	234.1	100.5
médiane	225.0	218.0	242.2	105.0

Tableau 1 : valeurs médianes et moyennes des niveaux à Diama et Podor et des débits à Matam et Diama de décembre à juin sur la période 2000-2019, pour les conditions d'écoulement analysées (niveaux à Podor compris entre 190 et 250 cm)

Pour des apports donnés de débit provenant de l'amont, le niveau résultant du fleuve à Podor est noté respectivement *Zd* et *Z* avec et sans influence de Diama, et le niveau à Diama est noté *Zdo*. D'après Bader et al (2012), *Zd* est relié à *Z* et *Zdo* par l'expression suivante où *A*, *B*, *C* et *D* sont des paramètres dont les valeurs sont données en annexe :

$$Zd \approx (Z\times(C\times Zdo + D\times(1-A)) + D\times(Zdo-B)) / (Z\times A\times C + C\times B + D)$$

L'inversion de cette relation donne :

$$Z \approx ((C\times B + D) \times Zd - D\times(Zdo -B)) / (C\times(Zdo-A\times Zd) + D\times(1-A))$$

Par ailleurs l'étalonnage de la station de Podor en régime permanent s'exprime ainsi sans l'influence de Diama ni celle de la marée d'après Bader et al (2015), en notant *Q* le débit à Podor :

$$Q = 2.423\times Z^{1.00979}$$

Les deux relations précédentes permettent donc de calculer *Z* et *Q* en fonction de *Zd* et *Zdo*. Pour un niveau *Zdo* médian à Diama (218 cm, tableau 1), le tableau 2 ci-dessous donne les valeurs de *Z* et *Q* obtenues pour quelques valeurs de *Zd* proches de sa médiane (225 cm, tableau 1) :

Zd (cm IGN)	Z (cm IGN)	Q (m^3/s)
223	40.22	101.04
224	43.20	108.60
225	46.16	116.13
226	49.12	123.63
227	52.06	131.12

Tableau 2 : débit Q du fleuve Sénégal à Podor et niveau Z à cette station sans influence aval variable (Diama ou marée), calculés pour différents niveaux Zd à Podor influencés par un niveau Zd0 maintenu à 218 cm à Diama

Conclusion sur les fluctuations périodiques infra-journalières

On remarque que le débit obtenu (116 m^3/s) pour un niveau *Zd* médian (225 cm) est très inférieur au débit médian à Matam (242 m^3/s) et légèrement supérieur au débit médian à Diama (105 m^3/s) . Les ordres de grandeur paraissent relativement cohérents avec les prélèvements et les très fortes pertes par évaporation sur le fleuve. Compte tenu des hypothèses fortes implicitement retenues dans les calculs, ces résultats sont donc assez satisfaisants. Ils montrent que les fluctuations infra-journalières de niveau à Podor, bien que d'amplitude moyenne assez modeste (2 cm en 2000, 4 cm en 2019) pourraient correspondre à des fluctuations de débit d'amplitude assez importante (15 m^3/s en 2000, 30 m^3/s en 2019) entre début et fin de journée. Ceci repose cependant sur une traduction des fluctuations de niveau en fluctuations de débit qui mériterait d'être vérifiée par des jaugeages faits à 8H et à 18H. Il se pourrait en effet que l'hypothèse de régime permanent retenue pour la traduction des cotes en débit ne soit pas complètement valide pour de telles fluctuations à haute fréquence, eventuellement très localisées.

Parmi les causes naturelles possibles des fluctuations périodiques infra-journalière de niveau observées à Podor, l'évaporation pourrait être évoquée, avec des différences entre jour et nuit s'exprimant probalement en dizaines de m^3/s sur l'ensemble du fleuve depuis Matam. Un phénomène de seiche, dû à l'orientation particulière du fleuve et à la rythmicité des vents, pourrait aussi être envisagé.

Mais le doublement d'ampleur des fluctuations entre 2000 et 2019 fait penser à une origine anthropique, au moins partielle. L'accroissement sur cette période des prélèvements pour l'irrigation (effectués plutôt de jour a priori) pourrait être une explication, à vérifier.

Abaissement inhabituel du niveau moyen journalier à Podor depuis mi-janvier 2019

L'abaissement du niveau moyen journalier du fleuve à Podor (*Hp*) en dessous du niveau moyen journalier à Richard Toll (*Hr*) a déjà été observé en 2011 et en 2013, mais pas de façon aussi marquée qu'en 2019 (fig. 5). On remarque que le phénomène coïncide en 2019 avec des débits lâchés souvent nuls à Diama (fig. 1). Sauf déplacement accidentel de limnimètre à Podor, ou mauvaise altitude de référence à cette station (peu probable), les relevés montrent une inversion de pente de ligne d'eau entre Podor et Richard Toll, qui implique une inversion du sens d'écoulement du fleuve entre ces deux stations.

Du 18/02 au 11/03/2019, la pente moyenne journalière de ligne d'eau est constamment négative entre Podor et Richard Toll (fig. 1), avec une valeur moyenne de -0.037 cm/km. Sur la même période, cette pente est toujours positive (sauf le 01/03) entre Richard Toll et Diama, avec une valeur moyenne de 0.025 cm/km, alors même que le niveau à Diama tend à évoluer en fonction du débit lâché vers l'océan. Ceci implique un écoulement moyen du fleuve dirigé de l'aval vers l'amont entre Podor et Richard Toll et de l'amont vers l'aval entre Richard Toll et Diama. L'écoulement vers l'aval depuis Richard Toll est confirmé entre le 03/03 et le 10/03//2019 par l'augmentation régulière du niveau à Diama, qui passe de 218 à 222 cm IGN alors que le barrage reste fermé et ne lâche aucun débit vers l'océan. L'hypothèse la plus vraisemblable est que le fleuve est alimenté du 18/02 au 11/03/2019 par un reflux du lac de Guiers par le canal de la Tahouey. Depuis Richard Toll, une partie de cet apport remonte le fleuve du fait des débits trop faibles arrivant à Podor depuis l'amont (débit important à Matam grâce aux débits lâchés à Manantali, mais très forts prélèvements et pertes entre Matam et Podor). Tout cela mériterait bien sûr d'être vérifié sur le terrain par des mesures.

Références

Bader Jean-Claude, Saura P., Zongo Balde H (2012). Etude d'actualisation de la monographie du fleuve Sénégal et d'évaluation des inondations dans le bassin du fleuve Sénégal : deuxième partie : évaluation des crues du fleuve Sénégal. Dakar (SEN) ; Dakar : OMVS ; IRD, 2012, 189 p. multigr. + 73 p. multigr.

Bader Jean-Claude (ed.) (2015). Monographie hydrologique du fleuve Sénégal : de l'origine des mesures jusqu'en 2011. Marseille : IRD, 2015, 79 p. (livret) + CD-Rom (920 p.) ISBN 978-2-7099-1885-5

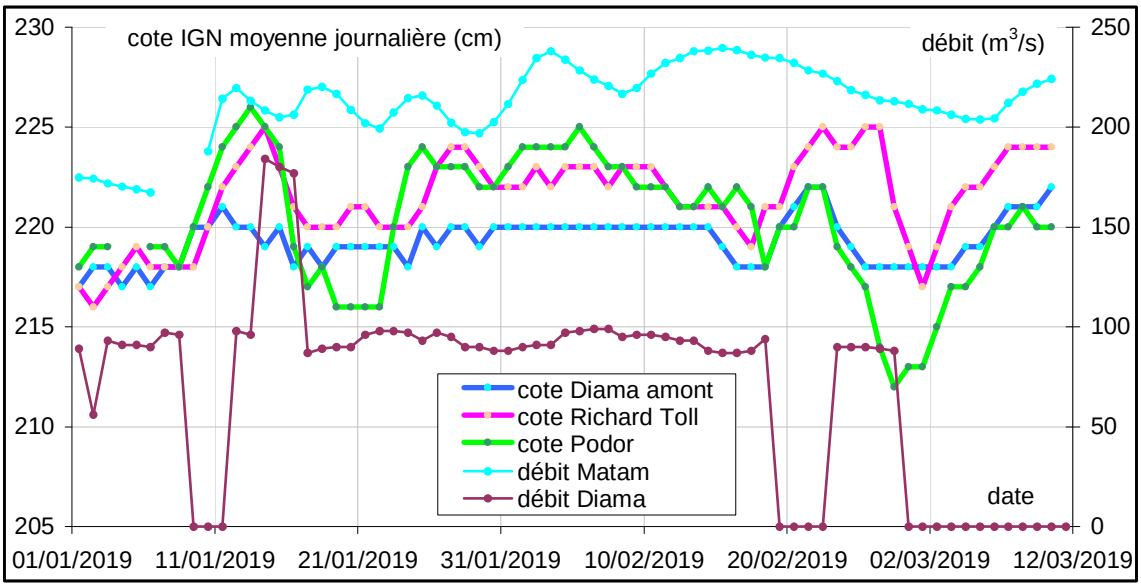

Figure 1 : évolution du niveau IGN de plan d'eau (moyenne journalière) de janvier à mars 2019 aux stations de Diama amont, Richard Toll et Podor, et débit du fleuve à Matam et Diama sur la même période

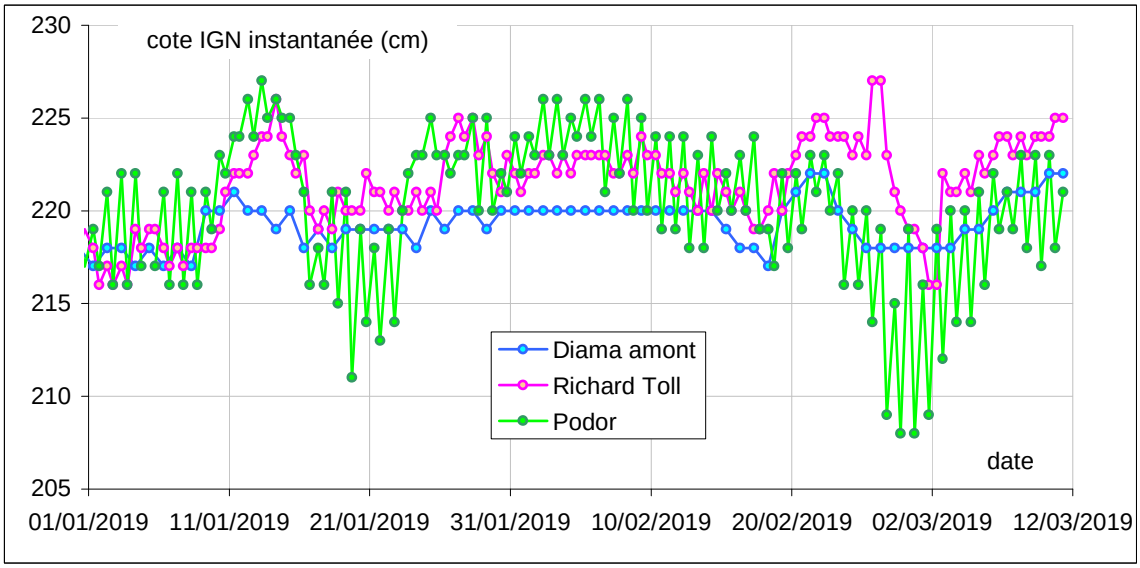

Figure 2 : évolution du niveau IGN de plan d'eau de janvier à mars 2019 aux stations de Diama amont, Richard Toll et Podor, en valeurs instantanées (relevés à 8 H et 18H à Richard Toll et Podor et à 8H à Diama amont)

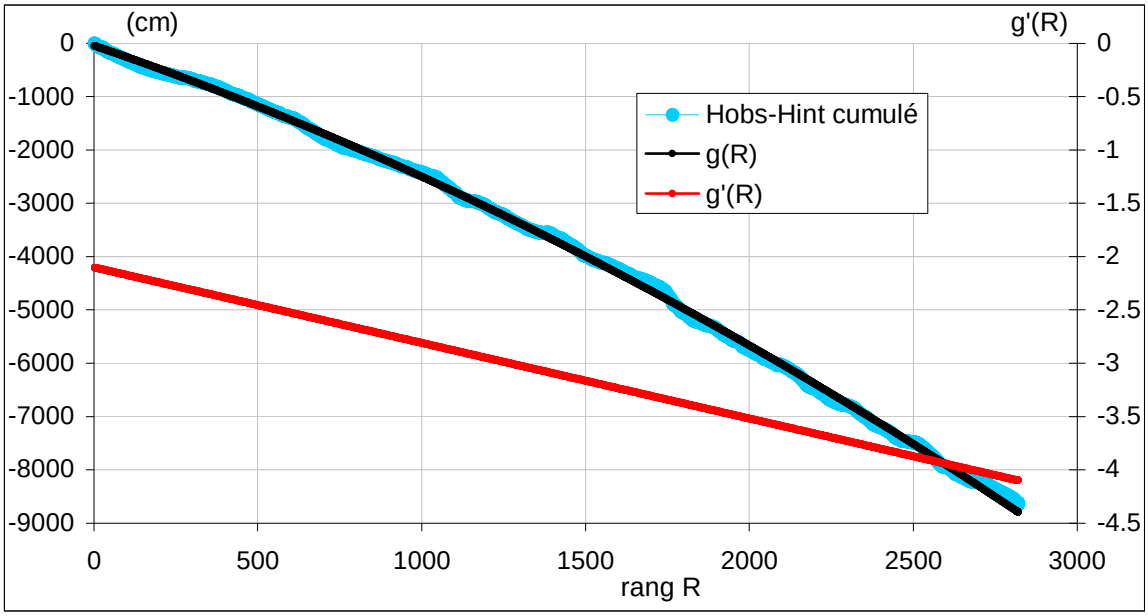

Figure 3 : évolution chronologique, sur la période 2000-2019 pour Podor (relevés entre 190 et 250 cm du 1er décembre au 30 juin), du cumul de la différence entre niveau instantané réel *Hobs* à 18H et niveau interpolé *Hint* à 18H (calculé à partir des niveaux réels à 8H le même jour et à 8H le lendemain)

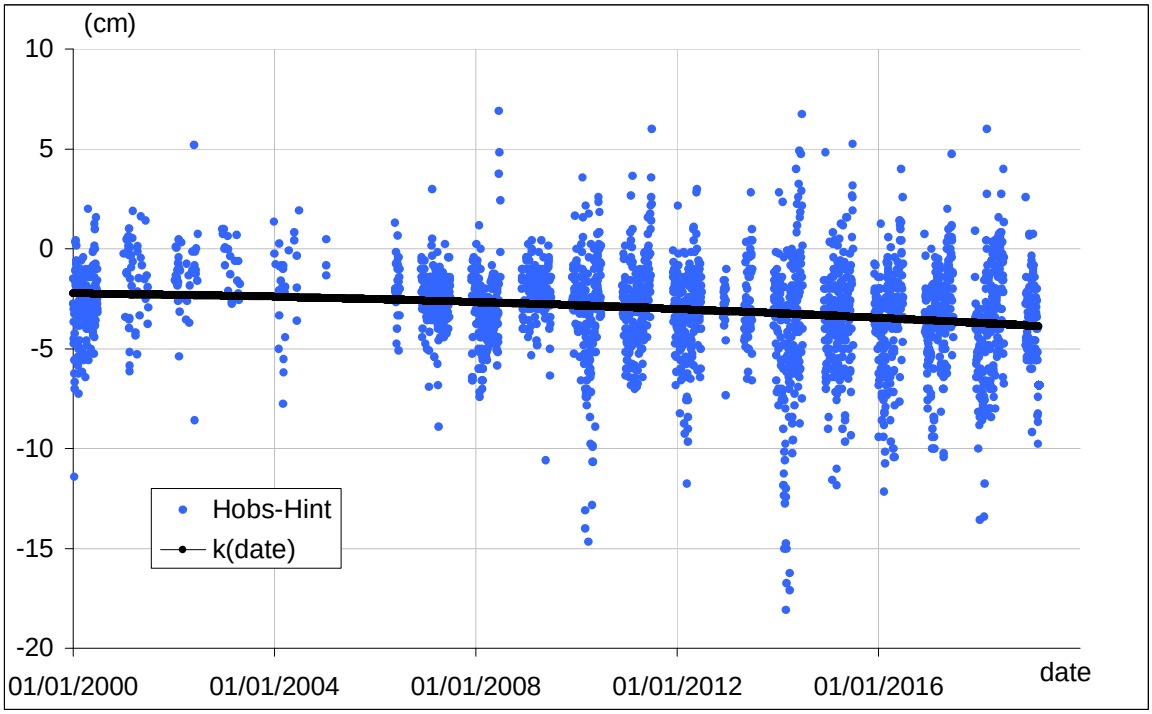

Figure 4 : évolution chronologique, sur la période 2000-2019 pour Podor (relevés entre 190 et 250 cm du 1er décembre au 30 juin), de la différence entre niveau instantané réel *Hobs* à 18H et niveau interpolé *Hint* à 18H (calculé à partir des niveaux réels à 8H le même jour et à 8H le lendemain)

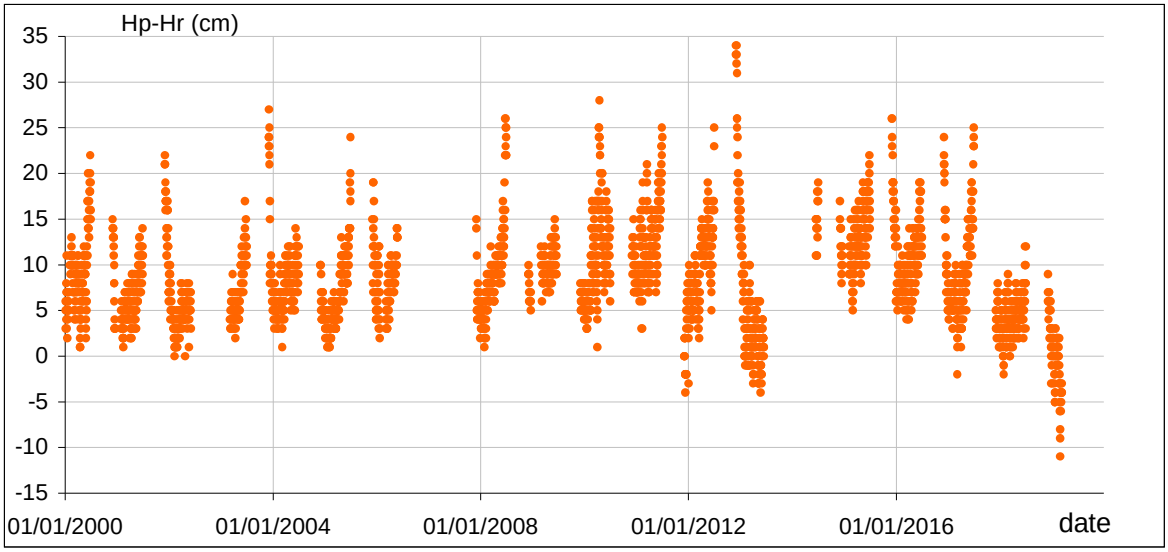

Figure 5 : différence entre le niveau moyen journalier du fleuve Sénégal à Podor (*Hp*) et son niveau moyen journalier *Hr* à Richard Toll de 2000 à 2019, pour *Hp* compris entre 190 et 250 cm entre décembre et juin

ANNEXE

(d'après : Bader Jean-Claude, Saura P., Zongo Balde H. Etude d'actualisation de la monographie du fleuve Sénégal et d'évaluation des inondations dans le bassin du fleuve Sénégal : deuxième partie : évaluation des crues du fleuve Sénégal. Dakar (SEN) ; Dakar : OMVS ; IRD, 2012, 189 p. multigr. + 73 p. multigr.)

Aux stations les plus à l'aval, le niveau du fleuve Sénégal est rehaussé par le remous du barrage de Diama. Par rapport au niveau produit par la propagation des écoulements depuis Bakel, le rehaussement peut être évalué de la façon suivante moyennant certaines hypothèses fortes.

Notations :

Γ : coefficent de Chezy

Δ : désigne une différentielle

H : charge hydraulique

J : pente de la charge hydraulique

Q : débit

R : rayon hydraulique

S : section mouillée

u : abscisse le long du cours d'eau, comptée positivement vers l'amont

Z : cote IGN de plan d'eau

Régime influencé par le barrage de Diama : les variables sont notées avec un indice ''d''

Régime non influencé par le barrage de Diama : les variables sont notées sans indice ''d''

Station de Diama amont : les variables sont notées avec un incide ''o''

Station située à l'amont de Diama : les variables sont notées sans incide ''o''

Hypothèses :

En régime non influencé par le barrage de Diama, le niveau à Diama est relié au niveau à la station amont par une fonction qu'on admet linéaire (paramètres A et B constants, caractéristiques du tronçon de cours d'eau) :

$Zo = f1(Z) \approx A \times Z + B$ (0)

Les vitesses sont jugées négligeables dans la charge hydraulique :

$Hd \approx Zd \Rightarrow \quad Jd = \Delta Hd / \Delta u \approx (Zd - Zdo) / \Delta u$ (1a)

$H \approx Z \quad \Rightarrow \quad J = \Delta H / \Delta u \approx (Z - Zo) / \Delta u$ (1b)

Calcul de *Zd* en fonction de *Z* :

La relation de Chezy permet d'écrire, pour les deux régimes :

$Qd = \Gamma d \times Sd \times (Rd \times Jd)^{0.5} \quad \Rightarrow \quad Jd = Qd^2 / (Rd \times \Gamma d^2 \times Sd^2)$ (2a)

$Q = \Gamma \times S \times (R \times J)^{0.5} \quad \Rightarrow \quad J = Q^2 / (R \times \Gamma^2 \times S^2)$ (2b)

(1a) et (2a) $\Rightarrow \quad Zd - Zdo = \Delta u \times Qd^2 / (Rd \times \Gamma d^2 \times Sd^2)$ (3a)

(1b) et (2b) $\Rightarrow \quad Z - Zo = \Delta u \times Q^2 / (R \times \Gamma^2 \times S^2)$ (3b)

On fait l'hypothèse supplémentaire que le terme $\Delta u / (R \times \Gamma^2 \times S^2)$ est une fonction du niveau de surface libre Z qu'on admet linéaire (paramètres C et D constants, liés aux caractéristiques du tronçon de cours d'eau : topographie, rugosité, etc.) :

$\Delta u / (Rd \times \Gamma d^2 \times Sd^2) = f2(Zd) \approx C \times Zd + D$ (4a)

$\Delta u / (R \times \Gamma^2 \times S^2) = f2(Z) \approx C \times Z + D$ (4b)

(3a) et (4a) $\Rightarrow \quad Zd - Zdo \approx (C \times Zd + D) \times Qd^2$ (5a)

(3b) et (4b) $\Rightarrow \quad Z - Zo \approx (C \times Z + D) \times Q^2$ (5b)

Avec un débit identique pour les deux régimes ($Q = Qd$), les relations (5a), (5b) et (0) donnent :

$(Zd - Zdo) \times (C \times Z + D) \approx (Z - Zo) \times (C \times Zd + D) \approx (Z - A \times Z - B) \times (C \times Zd + D)$

$\Rightarrow \quad Zd \approx (Z \times (C \times Zdo + D \times (1 - A)) + D \times (Zdo - B)) / (Z \times A \times C + C \times B + D)$

Il suffit donc de connaître les paramètres A, B (m), C (s^2m^{-6}) et D (s^2m^{-5}) pour pouvoir déterminer la cote rehaussée Zd à la station, en fonction de la cote Z non rehaussée (calculée par modèle de propagation à partir des cotes observées à Bakel) et de la cote Zdo à la station de Diama amont. Ces quatre paramètres sont déterminés pour chaque station à partir des données observées de 1987 à 2011, par la méthode des moindres carrés. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau ci-dessous, pour des cotes exprimées en cm.

A (-)	*B* (cm)	*C* ($s^2\ m^{-5}\ cm^{-1}$)	*D* ($s^2\ m^{-5}$)	altitude du zéro (cm IGN)	station
2.41E-01	2.04E+01	-6.45E-02	1.75E+01	-40	Richard Toll
2.87E-01	1.33E+01	-6.09E-02	1.67E+01	-44	Dagana
1.91E-01	2.04E+01	-5.00E-02	1.75E+01	-44	Podor
3.74E-02	9.09E+01	-5.35E-02	1.73E+01	-63	Guede

Bader Jean-Claude, Poussin Jean-Christophe. (2019).

Analyse de deux phénomènes observés en saison sèche à la station de Podor sur le fleuve Sénégal, en régime d'écoulement influencé par les barrages de Diama et Manantali : abaissement anormal du niveau et fluctuations périodiques infra-journalières.

Montpellier : IRD, 10 p. multigr.