

Rôle du delta intérieur du fleuve Niger dans la régulation des bilans de l'eau et de sédiments

Cécile Picouet
Hydrogéochimiste

Didier Orange
Hydrogéochimiste

Gil Mahé
Hydrologue

Jean-Claude Olivry
Hydrologue

Le delta intérieur du fleuve Niger est une zone stratégique pour le Mali. Sa potentialité en ressources agricoles renouvelables, liée à la présence de l'eau dans cette zone sahélienne, explique que le delta intérieur soit un lieu d'activité rurale intense (pêche, riz, élevage). Depuis une vingtaine d'années, la zone soudano-sahélienne est touchée par un déficit pluviométrique qui a provoqué une diminution des ressources en eau (Bamba *et al.*, 1996 ; Bricquet *et al.*, 1997 a ; Mahé *et al.*, 2000), ce qui a modifié et amplifié les tensions qui s'exercent sur les différents types de ressources du delta et entre les différents utilisateurs (Poncet et Orange, 1999). L'objectif de cette étude a été de comprendre le rôle du delta intérieur du Niger sur les flux d'eau et de matières, qui influencent directement la richesse trophique du milieu et dont l'évolution est en relation avec la variabilité climatique (Bricquet *et al.*, 1997 b). L'ensemble des travaux que nous avons menés s'appuie sur les observations réalisées dans le cadre du réseau de surveillance des flux particuliers et dissous

transportés par le fleuve Niger au Mali. Ce réseau a été mis en place en 1990 par un programme de coopération (projet Equanis, Olivry *et al.*, 1995) entre l'IRD (anciennement Orstom) et le CNRST (Centre national de la recherche scientifique et technologique, Mali) et poursuivi en collaboration avec la DNH (Direction nationale de l'hydraulique, Mali) dans le cadre du projet Gihrex (*Gestion intégrée, hydrologie, ressources et systèmes d'exploitation*) de l'IRD (Orange *et al.*, 2000).

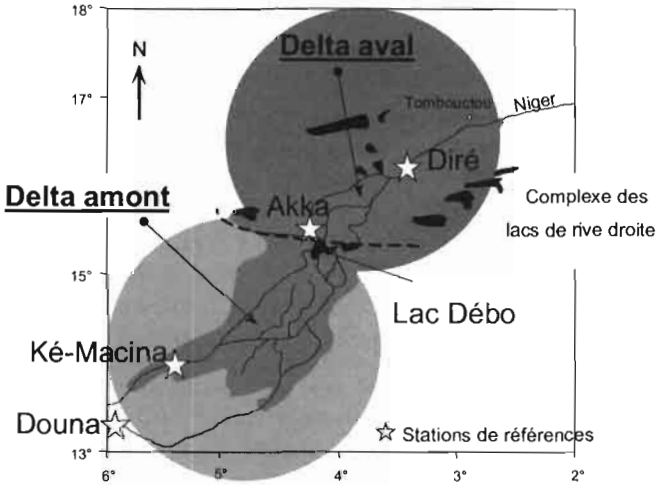
I Zone d'étude

Le delta intérieur du Niger se situe au centre du système fluvial malien du fleuve Niger, en régions sahéliennes et subdésertiques sur environ 40 000 km², en bordure des régions désertiques du Sahara. Cette vaste zone d'épandage des eaux du Niger et de son principal affluent le Bani commence en amont dans les plaines et dépressions où les crues de ces deux affluents se rencontrent (entre Ké-Macina et Mopti) et se termine en aval aux environs de Tombouctou où tous les écoulements se sont rejoints. La zone potentielle d'inondation forme un grand parallélogramme d'axe SO-NE de 400 km de longueur et 125 km de largeur, sans limites de bassin versant bien établies. De l'entrée à la sortie du delta, le fleuve Niger parcourt environ 600 km et perd seulement 12 m d'altitude, soit une pente moyenne de 2 cm km⁻¹.

Le delta intérieur du Niger est constitué de deux zones géomorphologiques distinctes (fig. 1) :

- le *delta amont*, correspondant à une plaine d'inondation, s'étend des points d'entrées du delta (Ké-Macina et Douna) aux grands lacs centraux ; il est caractérisé par de vastes plaines d'inondation et par un réseau complexe et hiérarchisé de défluent et de mares, parfois aménagés de façon artisanale par les populations locales ; c'est une région de grandes prairies aquatiques composées essentiellement de bourgou ;
- le *delta aval* allant des lacs centraux à Tombouctou (au port de Koryoumé) est caractérisé par trois défluent qui sillonnent entre des cordons dunaires et inondent des plaines de moindre importance, en relation plus ou moins fréquentes avec d'importants lacs périphériques en rives droite et gauche.

Cette étude a pour but d'aborder les conséquences sur les transferts de matières de ces deux parties du delta, dont les caractéristiques géomorphologiques sont très différentes.



■ Figure 1

Géographie du delta intérieur du Niger et stations d'échantillonnage des débits et flux de matières. Les lacs sont représentés en noir et la zone inondable en grisé foncé.

Matériels et méthodes

Un réseau de surveillance des flux particuliers transportés par le fleuve Niger au Mali a été mis en place depuis 1991 aux différentes stations de références du delta intérieur du Niger :

- les entrées sont représentées par les stations de Ké-Macina sur le Niger (bassin versant de 141 000 km²) et de Douna sur le Bani (102 000 km²) ;
- les sorties du delta amont par la station de Aka sur le défluent principal du lac Débo (ainsi que deux autres stations secondaires sur les deux autres défluent) (Bricquet *et al.*, 1997 b) ;

– enfin, pour des raisons de facilités d'accès, les travaux présentés ici ont comme point de sortie la ville de Diré (340 000 km²), située à environ 60 km en amont de Tombouctou (fig. 1).

On dispose d'observations journalières sur les débits écoulés et d'observations hebdomadaires sur les concentrations en *matière en suspension* (MES) de 1992 à 1998. La description de ces données, de même que la méthodologie utilisée pour l'échantillonnage, leur analyse et leur validation sont présentées dans Picouet (1999). Pour les calculs des flux de MES, la procédure de calcul utilisée dans cette étude s'appuie sur l'interpolation linéaire des concentrations instantanées hebdomadaires entre deux valeurs connues selon une méthode préconisée par Meybeck *et al.* (1996). L'ensemble des concentrations reconstituées est ensuite utilisé pour la détermination des flux journaliers, desquels sont déduits les flux moyens mensuels et annuels. L'erreur globale sur l'estimation des bilans de MES peut être estimée à moins de 15 % (Picouet, 1999).

Il est intéressant de noter que les années de prélèvements regroupent des cycles hydrologiques représentatifs des fluctuations hydroclimatiques de ces 25 dernières années. Comparé au module moyen de cette période, on peut distinguer des années *sèches* (1992/93, 1993/94), des années *humides* (1994/95, 1995/96) et des années *moyennes* (1996/97, 1997/98) avec respectivement un débit moyen annuel des entrées (correspondant à la somme des débits de Ké-Macina et Douna) de 800 m³ s⁻¹, 1 590 m³ s⁻¹ et 1 110 m³ s⁻¹.

■ Fonctionnement hydrologique du delta intérieur du Niger

Le fonctionnement hydrologique du delta intérieur du Niger est, d'une part, largement dépendant des régimes hydroclimatiques des bassins supérieurs du Niger et du Bani – l'essentiel des écoulements provient des régions amonts beaucoup plus arrosées (Bamba *et al.*, 1996 ; Olivry, 1998 ; Picouet 1999) – et, d'autre part, des conditions morphologiques propres au delta intérieur (topographie, micro-relief, forme et altitude des plaines, lacs, cuvettes...). Les conditions climatiques (pluie, évaporation, infiltration) qui entrent en considération dans le bilan hydrologique

ne représenteraient que 5 à 10 % des écoulements d'eau du delta (Mahé *et al.*, sous-presse et ce volume¹). De nombreux travaux hydrologiques ont étudié les conséquences du delta sur la crue du Niger (Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; Mahé *et al.*, sous-presse). Ainsi du fait de l'inondation, le stockage temporaire de quantités importantes d'eau provoque l'amortissement de l'onde de crue à la sortie du delta. Par ailleurs, ces inondations induisent des pertes hydriques importantes par évaporation (les pertes par infiltration étant négligeables), d'où l'expression de *machine évaporatoire* qui sied parfaitement au delta intérieur du Niger. Ces deux caractéristiques du fonctionnement hydrologique global du delta sont bien sûr étroitement liées ; elles sont fonction de l'extension spatio-temporelle de l'inondation, et donc des conditions hydroclimatiques (Orange *et al.*, ce volume²). Les bilans hydrologiques réalisés par la différence des flux d'eau entre les entrées et les sorties du delta (fig. 2) montrent que les pertes annuelles en eau sont d'autant plus fortes que les apports de l'amont le sont aussi. La perte en eau de l'hydrosystème « delta » augmente donc avec le débit annuel entrant (fig. 2). Elle représente de 30 à 45 % des apports totaux en eau selon l'hydraulicité de l'année (Picouet, 1999) et est essentiellement due à l'évaporation sur surface d'eau libre (Mahé *et al.*, ce volume).

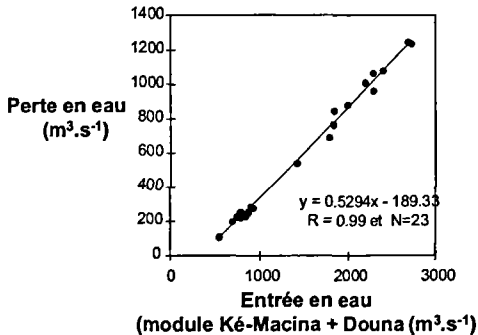


Figure 2
Relation entre les volumes d'eau entrant (somme de Ké-Macina et Douna) et sortant (à Diré) du delta intérieur du Niger de 1955 à 1997.

¹ Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé N., ce volume – « Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali) ». *In* : partie 2.

² Orange D., Mahé G., Dembélé L., Diakité C. H., Kuper M., Olivry J.-C., ce volume – « Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger ». *In* : partie 2.

Cependant, ces pertes en eau se répartissent différemment entre le delta amont et le delta aval, mais dépendent toujours de l'hydraulicité de l'année (fig. 3) : seule l'année à très forte crue (en 1994/95) montre un équilibre des pertes entre l'amont et l'aval, alors que les autres années les pertes par évaporation sont toujours beaucoup plus importantes dans le delta amont. Pourquoi ?

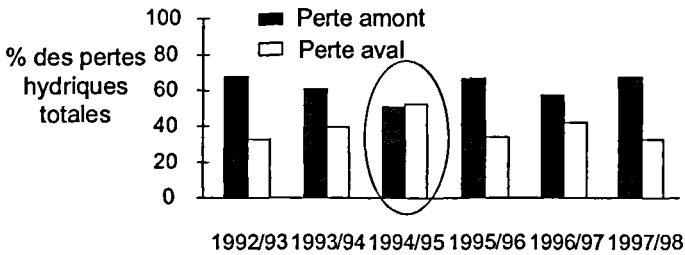


Figure 3

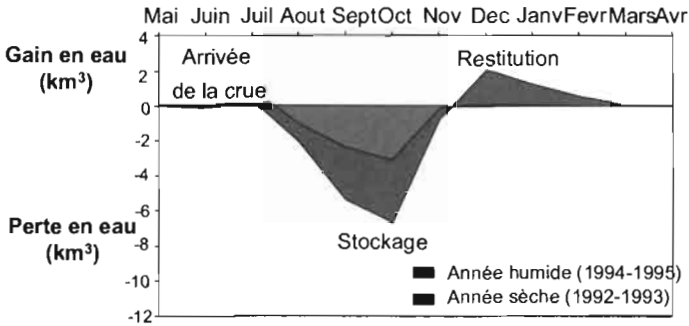
Répartitions des pertes en eau entre les deux parties du delta.

L'étude des pertes en eau mensuelles sur les deux parties du delta permet de préciser les différences dans le fonctionnement hydrologique entre l'amont et l'aval. A titre d'exemple, la figure 4 présente l'évolution des pertes en eau mensuelles au cours de l'avancement de la crue sur les différentes parties du delta pour l'année sèche 1992/93 et l'année humide 1994/95. Notons que le temps de propagation de l'onde de crue est de 15 jours à 6 semaines entre son entrée dans le delta et sa sortie, selon l'époque de l'année. Aussi pour la réalisation des bilans entrées / sorties, un décalage moyen constant d'un mois a été appliqué. Lorsque le bilan entrée / sortie du couple mensuel considéré est négatif, on parlera de « perte en eau » : effectivement, à l'échelle de l'hydrosystème pris dans son ensemble, le fleuve Niger perd de l'eau. *A contrario*, quand le bilan est positif, on parlera de « gain en eau ».

A l'arrivée de la crue en juillet, le delta amont joue un rôle de stockage jusqu'en octobre, puis restitue de l'eau au système – le fleuve – uniquement en année humide à partir de novembre (fig. 4a). Sur le delta aval, le delta n'aurait qu'un rôle de stockage de juillet en novembre (fig. 4b). Pour les deux années étudiées, le volume d'eau stocké mensuellement est plus important sur le delta

amont que sur le delta aval ; et il est plus important pour l'année humide que pour l'année sèche aussi bien à l'amont qu'à l'aval. Le phénomène de restitution des eaux stockées dans les plaines inondées semble donc survenir uniquement sur le delta amont et seulement pour l'année humide, ce qui explique le bilan annuel équilibré entre l'amont et l'aval en 1994/95 noté en figure 3.

(a) delta amont



(b) delta aval

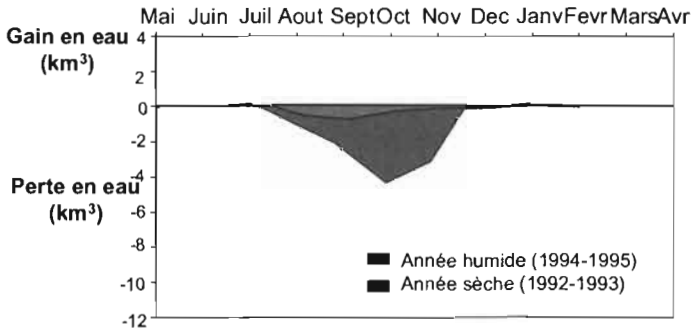


Figure 4

Comparaison des pertes mensuelles en volume d'eau (en km^3) sur le delta amont (a) et sur le delta aval (b) pour une année sèche (1992/93) et pour une année humide (1994/95).

En fait, le delta fonctionne par seuils de remplissage de ses chenaux, mares, plaines puis lacs ; lorsque tout est plein, le surplus retourne au drain principal pour sortir du delta. Lors du cycle le plus humide de la décennie, en 1994/95, le seuil de remplissage

maximum du delta amont a été atteint, d'où l'importante restitution en eau cette année-là (fig. 4). Sur le delta aval, les volumes d'eau stockés ne sont pas restitués ; il y a cette fois remplissage des lacs périphériques (fig. 1) – et notamment ceux de rive droite (les lacs Niangaye, Aougoundou, Do...) – sans retour aux drains majeurs du fleuve Niger. Du fait de l'importance en volume de ces lacs périphériques et de la morphologie spécifique du delta aval en cordon dunaire, le volume de remplissage du delta aval est plus élevé que celui du delta amont, d'autant plus que les sécheresses consécutives ont petit à petit asséché puis tari ces lacs.

Sur le plan hydrologique, le delta joue donc un rôle de tampon vis-à-vis de la variabilité hydroclimatique du fait de son organisation géomorphologique et de l'existence des lacs périphériques. Ce caractère a permis à ce milieu de garder intact, malgré les fortes variabilités hydroclimatiques, toute sa capacité à fournir une ressource en eau primordiale. Mais quelle est l'influence de ce fonctionnement sur la dynamique des matières en suspension ?

■ Bilans des matières en suspension

Les bilans des flux de matières en suspension transportées par le fleuve entre les entrées (Ké-Macina + Douna) et la sortie (Diré) montrent qu'il y a accumulation de sédiments dans le delta chaque année étudiée (tableau 1). Le delta intérieur retiendrait entre 0,15 million de tonnes de sédiments pour une année sèche (à faible superficie d'inondation, comme le cycle hydrologique 1992/93) et 1,3 million de tonnes lors d'une année humide (comme en 1994/95). Encore une fois, les comportements entre delta amont et delta aval diffèrent : s'il y a toujours accumulation de sédiments dans le delta amont, les bilans sur le delta aval sont plus équilibrés avec curieusement une propension à délivrer du sédiment lors des deux années hydroclimatiquement opposées, à savoir 1992/93 et 1994/95 (tableau 1). Sur l'ensemble du delta, Picouet (1999) montre que les pertes en sédiments sont, comme les pertes en eau, une fonction croissante linéaire des flux de MES entrants. Cela se traduit par le fait que les pertes de MES sont d'autant plus importantes que les pertes hydriques par évaporation le sont aussi (fig. 5). Or seul le cycle sec 1992/93 ne répond pas à

cette loi. En effet, ce cycle est caractérisé par une hydraulicité très faible et une grande partie des eaux du fleuve est restée dans le drain principal sans pouvoir déborder des berges (Orange *et al.*, ce volume). Le processus de dépôt de sédiments dans les plaines d'inondation n'a alors pas pu se faire, d'où des pertes en MES extrêmement faibles.

Tableau 1

Module hydrologique annuel entrant (en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) et bilan des flux de matières particulaires transitant dans le delta intérieur du fleuve Niger (exprimés en milliers de tonnes par an). Les bilans négatifs indiquent une accumulation de sédiments dans le delta. (1) somme des flux de MES des deux entrées du delta (stations de Ké-Macina et Douna) ; (2) somme des flux de MES des émissaires sortant du lac Débo (stations de Aka, Awoye et Korientzé) ; (3) flux de MES à la sortie unique du delta (station de Diré).

Cycles hydrologiques	1992/ 1993	1993/ 1994	1994/ 1995	1995/ 1996	1996/ 1997	1997/ 1998
Débit annuel entrant ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	820	780	1 780	1 400	1 110	1 110
MES (10^3 tonnes) :						
entrées delta (1)	944	1 343	2 703	2 090	1 645	1 587
sortie Débo (2)	696	747	1 250	1 162	1 032	957
sortie delta (3)	784	766	1 487	1 183	962	887
bilan delta amont	-248	-596	-1 453	-928	-613	-630
bilan delta aval	+88	+19	+237	+21	-70	-71
bilan total	-160	-577	-1 216	-907	-683	-700

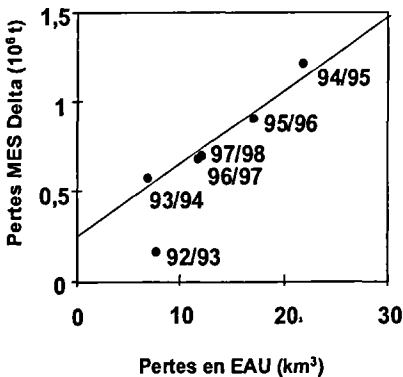


Figure 5
Evolution annuelle des pertes en sédiments (en 10^6 tonnes) dans l'ensemble du delta versus les pertes hydriques (en km^3).

Le delta amont est donc une immense plaine d'inondation où les nombreux méandres d'alimentation des innombrables mares et l'importante couverture végétale constituent des pièges à sédiments majeurs (tableau 1). Dans cette partie du delta, la quantité de matières déposées est fonction d'une part, de l'importance de l'inondation (directement liée à l'hydraulicité de la crue) et d'autre part, de la compétence érosive de la crue sur les versants avant son arrivée dans le delta (en fait, de la quantité de sédiments entrants). La figure 6a montre que les deux cycles hydrologiques extrêmes de notre étude (1992/93 pour le sec et 1994/95 pour l'humide) ne suivent pas exactement ce schéma. Pour le cycle sec, comme évoqué précédemment, la crue n'a pas atteint le seuil minimum pour déborder suffisamment du lit majeur. Par contre, lors du cycle 1994/95, trop de sédiments sont perdus par rapport à la norme ; du fait de la forte hydraulicité, l'inondation a pu atteindre de nombreux endroits très reculés du drain majeur, qui constituent autant de pièges à sédiments supplémentaires. La figure 6b met en évidence l'absence de perte en sédiments dans le delta aval, du fait des très faibles concentrations en MES dans les eaux (Gourcy, 1994 ; Bricquet *et al.*, 1997b), et souligne le comportement atypique du cycle 1994/95 au cours duquel les fortes pertes en eau sont accompagnées de gains significatifs en sédiments (tableau 1).

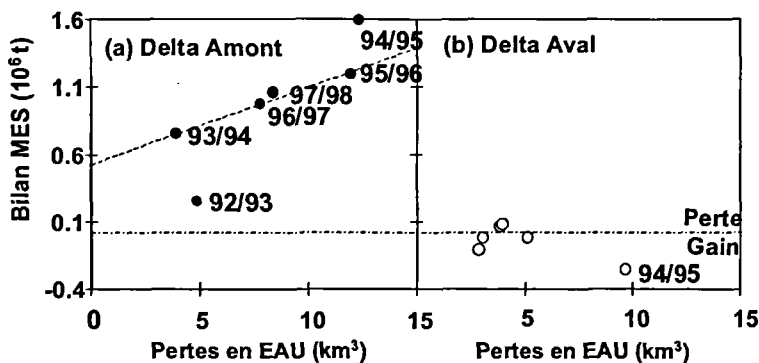


Figure 6

Evolution annuelle des pertes en sédiments (en 10⁶ tonnes) versus les pertes hydriques (en km³) pour le delta amont (a) et pour le delta aval (b).

L'étude des bilans de MES au pas de temps mensuel, selon la méthode décrite pour les bilans mensuels d'eau, permet de mieux comprendre ces disparités (fig. 7).

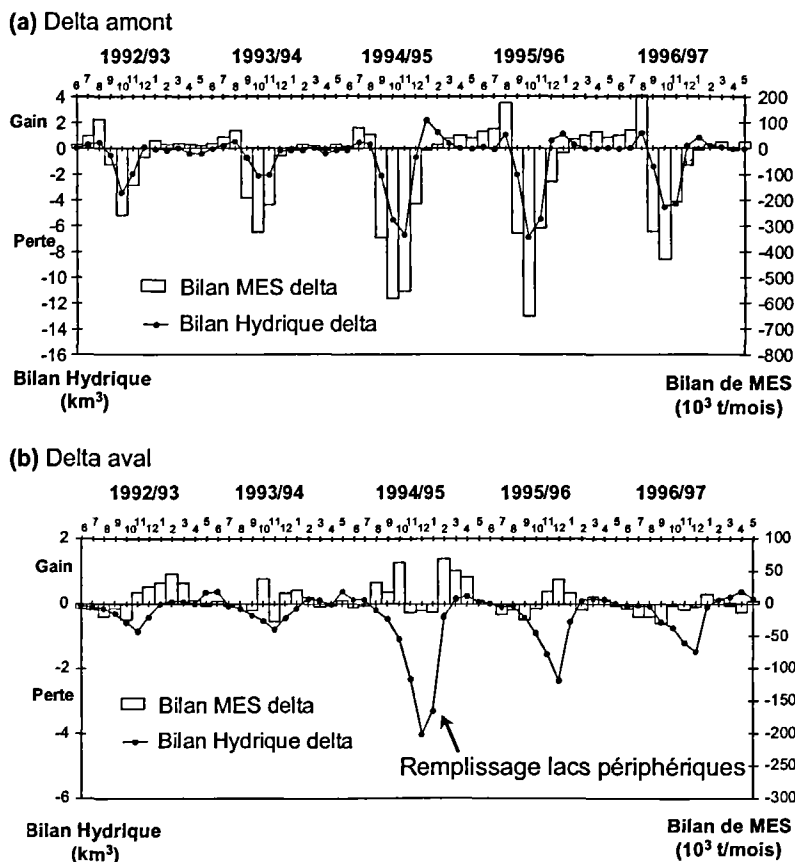


Figure 7

Evolution comparée des bilans mensuels (sorties-entrées) du transport hydrique et du transport particulaire de 1992 à 1996 dans le delta amont (a) et dans le delta aval (b).

Les bilans mensuels de pertes en MES sont caractérisés par l'alternance au cours du cycle hydrologique de périodes de « reprise » (aussi appelée « gain en sédiments », il y a alors exportation de sédiments en dehors du delta) et de périodes de

« sédimentation » (appelée « perte en sédiments », il y a alors stockage de sédiments dans le delta). En termes de flux, la sédimentation est largement prédominante, et l'étude à l'échelle mensuelle confirme qu'elle se réalise surtout – voire uniquement – dans le delta amont, où les périodes de sédimentation correspondent aux périodes de pertes en eau, à savoir lors de la saison de crue (de septembre à décembre) (fig. 7a).

Dans la partie aval, le bilan entrées/sorties des flux de matières est proche de zéro et ne semble pas dépendre de l'hydraulicité de l'année (fig. 6b). En fait, après le passage de la plaine amont et des lacs centraux, les eaux sont très peu chargées et les quantités de sédiments mises en jeu sont donc faibles. Le bilan mensuel montre que les périodes de reprises semblent toutefois être prépondérantes par rapport aux périodes de pertes (fig. 7b). Des reprises de sédiments sont systématiquement observées en décembre-janvier au début de la saison sèche. Elles sont surtout importantes pour les cycles 1992/93 et 1994/95. Pour les années sèches telles que 1992/93, ces gains sont sans doute liés à l'effet de l'érosion éolienne sur des versants secs (donc non inondés) peu ou pas recouverts de végétation. Au contraire, pour les années humides comme lors du cycle 1994/95, les flux d'eau de décembre sont encore importants ; des apports de sédiments par une érosion des berges encore humides ou par une forte remobilisation des sédiments déposés sur les sols inondés et sur les végétaux (lors du retour d'eau des plaines vers le fleuve) sont alors possibles.

Enfin, seul le cycle 1994/95 montre des gains de matières en début de crue sur le delta aval. L'importance des écoulements, associés à une forte pluviométrie cette année-là, a eu probablement pour conséquence une érosion précoce des versants encore non protégés par le couvert végétal et un effet de « chasse d'eau » des laissés de crue des années précédentes.

Finalement, la reprise des laissés de crues dans les lits mineurs associée à l'érosion des versants probable en début de crue, puis la remobilisation de décrue et l'érosion éolienne après la crue en début de saison sèche sont probablement les processus majeurs dans la dynamique annuelle de transport de sédiments par le fleuve dans le delta aval. Ainsi contrairement aux pertes en eau, les lacs périphériques ne semblent pas jouer un rôle majeur sur le bilan des matières transportées par le fleuve Niger au travers du delta.

Conclusion

Cette étude menée sur les variations mensuelles des flux hydriques et particulaires entrant et sortant du delta intérieur du Niger a permis d'appréhender le rôle de ce complexe inondable dans les transferts d'eau et de sédiments. Ce travail a confirmé les fonctionnements hydrologiques très différents entre la partie amont, proprement deltaïque, et la partie aval, caractérisée par une alternance de cordons dunaires et de petites plaines inondables. La partie amont montre un comportement assimilable à celui d'un canal distribuant par seuils de remplissage successifs des eaux dans une multitude de plaines et mares qui stockent puis restituent des volumes d'eau conséquents lorsque le seuil de remplissage maximum est atteint. A l'inverse, la partie aval ne montre que des périodes de stockage du fait de l'existence de lacs périphériques agissant comme « évacuateurs du trop plein d'eau ». L'eau capturée par les lacs est alors définitivement perdue pour le système hydrologique majeur que constitue le bras principal du fleuve Niger.

Cette disparité amont/aval existe aussi pour les processus de transferts de sédiments. Les bilans entrées / sorties de matières en suspension montrent que 26 à 54 % des sédiments entrants dans le delta sont perdus par le fleuve Niger lors de la traversée du delta. Ces pertes annuelles de MES, quel que soit le niveau de crue de l'année, se font uniquement sur la partie amont qui favorise un processus d'alluvionnement du fait de sa morphologie de grande plaine inondable. Sur la zone deltaïque du delta et la zone des lacs centraux (delta amont), les bilans mensuels de MES ont pu mettre en évidence une alternance de périodes de reprise et de dépôts de sédiments. Les phases de dépôt de sédiments, largement prédominantes sur les phases de reprise, concordent avec les phases de perte en eau, centrées sur le maximum d'inondation.

Sur le delta aval, les bilans annuels mettent en jeu de plus faibles quantités de matières. Les pertes et les gains mensuels de matières sont très variables dans le temps et font intervenir au-delà du simple bilan hydrologique les facteurs édaphiques des versants. Enfin, si les lacs périphériques sont des pièges à eau, ils ne sont pas des pièges à sédiments, rôle joué par la grande plaine d'inondation que constitue le delta amont.

Bibliographie

- Bamba F., Diabate M., Mahé G., Diarra M., 1996 – "Rainfall and runoff decrease of five river bassins of the tropical upstream part of the Niger river over the period 1951-1989". In Roald L. A. (éd.): *Global hydrological change*, EGS XXIth gen. ass., La Haye, Pays Bas, 6-10 Mai 1996, 16 p.
- Bricquet J.-P., Bamba F., Mahé G., Toure M., Olivry J.-C., 1997 a – Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau*, 3 : 321-337.
- Bricquet J.-P., Mahé G., Bamba F., Diarra M., Mahieux A., Des Tureaux T., Orange D., Picouet C., Olivry J.-C., 1997 b – Erosion et transport particulaire par le Niger : du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observation). *IAHS publ.*, 246 : 335-345.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.P., Molinier M., 1986 – *Monographie hydrologique du fleuve Niger. II - Cuvette Lacustre et Niger moyen*. Paris, Orstom, coll. Monographie Hydrologique, 8, 506 p.
- Gourcy L., 1994 – *Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali)*. Thèse doct., univ. Paris-XI, 271 p.
- Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.-C., sous presse – Water losses in the Niger river inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes J.*
- Mahé G., Olivry J.-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F., Servat E., 2000 – Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, série II a, 330 : 689-692.
- Meybeck M., Pasco A., Ragu A., 1996 – *Evaluation des flux polluants dans les eaux superficielles*. Etude inter-agences de l'eau, ministère de l'Environnement, Paris, 3 tomes.
- Olivry J.-C., 1998 – « Hydrologie et géochimie du bassin soudano-sahélien du fleuve Niger ». In : *Hydrologie et géochimie isotopique*, Paris, Orstom, coll. Colloques et séminaires : 73-95.
- Olivry J.-C., Gourcy L., Touré M., 1995 – « Premiers résultats sur la mesure des flux de matière des apports du Niger au Sahel ». In Olivry J.-C., Boulégue J. (éd.) : *Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone*, Paris, IRD, coll. Colloques et séminaires : 281-292.
- Orange D., Gréard M., Cissé N., Ouattara M., 2000 – *Éléments pour la réalisation d'un réseau d'observation de qualité de l'environnement dans le bassin du Niger (au Mali) : les matières en suspension, indicateur qualité*. Etudes et rapports Gihrex, ER54, IRD, Bamako, Mali, 43 p.
- Picouet C., 1999 – *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur*. Thèse doct. Sciences, univ. Montpellier, 454 p.
- Poncet Y., Orange D., 1999 – L'eau, moteur de ressources partagées : l'exemple du delta intérieur du Niger au Mali. *Aménagement et Nature*, 132 : 97-108.