

Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali)

Gil Mahé
Hydrologue

Fatogoma Bamba
Hydrologue

Didier Orange
Hydrologue

Lamine Fofana
Météorologue

Marcel Kuper
Hydraulicien

Bertrand Marieu
Hydrologue

Abdourhamane Soumaguel
Météorologue

Navon Cissé
Hydrologue

Le delta intérieur du fleuve Niger au Mali constitue une singularité hydrologique de par sa situation géographique au milieu de la zone sahélienne. L'étude de la variabilité tant spatiale que temporelle des paramètres hydroclimatiques (pluviométrie, température de l'air, évapotranspiration potentielle et nébulosité) devrait permettre une utilisation plus rationnelle de la ressource en eau. Le but de cet article a été non seulement de cartographier les variations spatio-temporelles des paramètres météorologiques mais aussi de les confronter à la dynamique des écoulements observés dans le delta intérieur du Niger pour en déduire son fonctionnement hydrologique.

Depuis les années 70, le continent africain est soumis à une dégradation des ressources en eaux de surface sans précédent (Pouyaud, 1987 ; Olivry, 1993 ; Mahé et Olivry, 1995, 1999 ; Orange *et al.*, 1997 ; Mahé *et al.*, 2001), qui a occasionné une baisse importante des écoulements et des réserves d'eau souterraines (Mahé *et al.*, 2000). Malgré quelques années de pluviométrie proche de la normale depuis 1990, l'écoulement reste déficitaire pour le fleuve Niger et son tributaire le Bani alimentant le delta intérieur du Niger (Bamba *et al.*, 1996 ; Bricquet *et al.*, 1996). La baisse des écoulements a provoqué une réduction des surfaces inondées dans le delta intérieur du Niger (Olivry, 1995) induisant des problèmes majeurs d'exploitation pour les populations de la zone (Poncet et Orange, 1999). Les activités économiques – agricoles, pastorales et halieutiques – du delta intérieur du Niger, très liées à la montée et à la descente des eaux, se trouvent en cette période de longue sécheresse d'autant plus soumises à la variabilité hydroclimatique spatio-temporelle interannuelle. Aussi dans le cadre du projet Gihrex, il s'est agi de construire une grille spatio-temporelle des données hydroclimatiques pertinente pour comprendre les contraintes liées aux variabilités saisonnière et interannuelle du bilan de l'eau sur la productivité des milieux – et donc sur les choix stratégiques d'exploitation. Dans un premier temps, nous présentons la variabilité spatiale récente des paramètres climatiques constitutifs du bilan de l'eau et discutons du comportement hydrologique par grandes régions géomorphologiques du delta. Dans une seconde partie, nous abordons la variabilité interannuelle de la ressource en eau depuis le début du siècle, en faisant la part entre la variabilité des écoulements provenant des bassins versants amont du delta et celle de la pluviométrie reçue par le delta.

■ Cadre physique de l'étude

Le delta intérieur du Niger est compris entre les latitudes 12°10' N et 16°20' N, les longitudes 3°00' O et 6°00' O (fig. 1). Cette zone d'inondation est alimentée par deux cours d'eau, le Bani à Douna et le fleuve Niger à Ké-Macina ; elle est caractérisée par des pentes très faibles entraînant des vitesses du courant en surface

n'excédant pas 0,3 à 0,6 m s⁻¹ dans les bras principaux, par un chapelet de lacs centraux (d'ouest en est : les lacs Wallado, Débo et Korientzé) où tous les écoulements amont venant du sud convergent, et par un point de sortie unique au niveau de Diré sur le fleuve Niger. Cet ensemble est constitué de plaines inondables, de mares, lacs et chenaux non pérennes, de dunes et plateaux, le tout réalisant une répartition spatiale complexe des eaux d'inondation. Son fonctionnement hydrologique dépend donc en grande partie des apports en eau des deux tributaires Niger et Bani – et donc de leur régimes hydroclimatiques –, de la pluviométrie, de l'évaporation et de l'infiltration dans le delta, et de ses caractéristiques morphologiques.

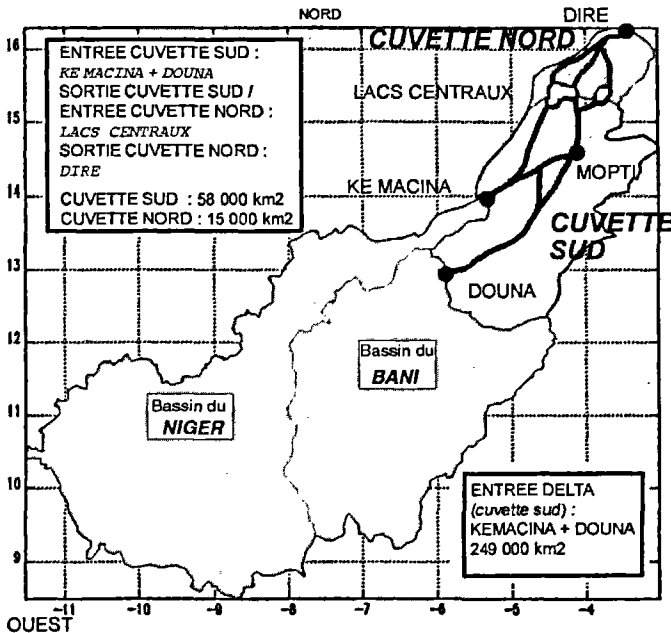


Figure 1

Situation géographique du delta intérieur du Niger (avec représentation de la « cuvette sud » et de la « cuvette nord » constitutives du delta) et des bassins hydrologiques d'alimentation (bassin du Niger et bassin du Bani). Seuls les principaux axes fluviaux du delta sont représentés avec indication des principales stations hydrologiques (Douna sur le Bani, Ké-Macina, Mopti et Diré sur le Niger et les lacs centraux).

La pluviométrie de la zone est comprise entre 600 mm au sud et 150 mm au nord. Elle est caractérisée par deux régimes climatiques : le régime sahélien au sud, zone comprise entre les isohyètes 600 mm et 300 mm ; et le régime subdésertique au nord, entre les isohyètes 300 mm et 150 mm.

La zone des lacs centraux permet de diviser le delta intérieur en deux entités géomorphologiques différentes (fig. 1) :

- au sud des lacs centraux, une cuvette amont (dite « cuvette sud ») correspondant à la plaine d'inondation *sensu stricto*, dont la superficie de l'impluvium¹ est d'environ 58 000 km² ;
- au nord des lacs centraux, la « cuvette nord » correspondant à un erg inondé (erg de Niafunké), dont la superficie de l'impluvium est de 15 000 km², en prenant Diré comme exutoire.

Le sud-est de la cuvette sud est occupé par des petits bassins versants descendant des plateaux dogons (d'une superficie de 25 000 km²), peu importants sur le plan hydrologique et dont seuls les réseaux inférieurs participent à la plaine d'inondation. Leur contribution est modeste, environ 50 m³ s⁻¹ en module annuel d'après Auvray (1960). La majeure partie de cette surface (environ 20 000 km²) n'appartient pas réellement au delta en tant que zone inondable puisque ce sont des terrains jamais inondés. Mais nous devons en tenir compte dans le bilan hydrologique car nous n'avons pas de stations de contrôle des écoulements aux exutoires de ces petits bassins entrant dans le delta. Sans la prise en compte de ces têtes de bassins, la surface de la cuvette sud se réduirait à environ 38 000 km², soit encore 2,5 fois plus que la cuvette nord.

Par contre, les contours des cuvettes sud et nord ne comprennent pas les surfaces des lacs latéraux, très nombreux et qui occupent de vastes superficies sur les marges de la cuvette nord. Ils sont alimentés par le fleuve par passages de seuils au fur et à mesure de la montée des eaux. L'existence de ces seuils à des niveaux variables à l'entrée de ces lacs provoque la retenue permanente de gros volumes d'eau lentement évaporés (Picouet *et al.*, ce volume). Le système de lacs de la région de Goundam (Télé, Faguibine) n'est pas compris dans le système hydrologique défini pour cette étude, car il est alimenté en aval de Diré. Enfin, l'ensemble de ces régions et le fonctionnement des systèmes de lacs ont été décrits par Auvray (1960), Guiguen (1985), Brunet-Moret *et al.* (1986).

¹ Surface délimitée dont le fonctionnement est assimilé à celui d'un bassin versant.

Construction d'une grille spatio-temporelle hydroclimatique

Méthode d'homogénéisation spatiale

Dans le cadre de la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger réalisée dans le projet Gihrex (Kuper *et al.*, ce volume²), il est nécessaire de connaître la variabilité interannuelle des paramètres du bilan de l'eau par maille d'un degré carré. Pour générer cette information, nous avons utilisé une chaîne de traitement automatique d'interpolation spline développée par Mahé *et al.* (1994). L'homogénéisation des données météorologiques a été réalisée à l'aide de la méthode du vecteur régional (MVR) présentée dans Wotling *et al.* (1995). La méthode d'interpolation spline a été testée sur des pas d'espace de la grille de 0,5° et de 1°. Les résultats des traitements de données ne montrent pas de changement significatif avec le choix du pas d'espace. Ceci nous a permis de nous limiter à la valeur de 1° pour la suite des calculs. On peut trouver le détail de ces traitements avec les représentations graphiques mensuelles dans Bamba *et al.* (1999).

Présentation des variables

La pluviométrie moyenne sur le delta a été déterminée à partir de la base de données annuelles observées durant la période 1901-1995 sur 49 postes pluviométriques couvrant l'ensemble de la zone étudiée (Soumaguel, 1996). Sur la période récente, la pluviométrie a également été homogénéisée par quinzaine.

Pour la température de l'air, l'évapotranspiration potentielle et la nébulosité, six stations encadrant et couvrant le delta ont pu être prises en compte, de 1993 à 1996, au pas de temps de quinze jours. Toutes les données proviennent des tableaux climatologiques mensuels fournis par le service de la Météorologie nationale du Mali. La température de l'air journalière est la moyenne des huit

² Kuper M., Mullon C., Poncet Y., Benga E., Morand P., Orange D., Mahé G. Arfi R., Bamba F., ce volume – « La modélisation intégrée d'un écosystème inondable : le cas du delta intérieur du Niger ». In : *partie 4.*

observations de la journée. Les températures moyennes utilisées dans la chaîne de calcul ont été obtenues en faisant la moyenne des quinze premiers jours puis des quinze derniers jours pour chaque mois, de mai 1993 à avril 1996. L'ETP a été calculée par une formule de Penman modifiée recommandée par l'OMM. Elle a subi le même traitement que la température de l'air. La nébulosité a été calculée à partir de la nébulosité observée à 12 heures. Les valeurs moyennes par quinzaine représentent la moyenne des valeurs de la nébulosité observée à midi sur la période considérée. Ce dépouillement a révélé des jours où la nébulosité était manquante soit par suite de phénomènes réduisant la visibilité verticale (tempête de poussières, brume humide...), soit plus rarement par manque d'observation ; ces jours ne sont pas pris en compte dans nos calculs. Aussi la nébulosité utilisée dans cette étude est probablement légèrement sous-estimée.

Les écoulements de surface entrants dans le delta sont calculés à partir des débits du Niger à Ké-Macina et du Bani à Douna sur la période 1907-1995. L'écoulement sortant est pris à la station de Diré sur le Niger. Les données hydrologiques proviennent de la collaboration IRD/DNH (Direction nationale de l'hydraulique au Mali) (Marieu *et al.*, 1998).

Variabilité spatiale mensuelle des paramètres climatiques dans le delta

A partir des cartes isohyètes construites par cette méthode, il apparaît que la pluie arrive dans le sud du delta la première quinzaine de juin et progresse d'est en ouest et du sud au nord pour couvrir tout le delta en juillet. Le maximum par quinzaine a lieu début août avec 180 mm au sud et 55 mm au nord. Fin octobre, alors que la pluie prend fin au sud du delta, elle continue encore un mois dans la partie ouest correspondant à la zone du Macina. De novembre jusqu'à fin avril, on observe une diminution de la température du sud au nord ; puis début mai, la température augmente du NO vers le SE avec une amplitude très faible ; et courant mai, on observe une inversion du gradient de température, c'est-à-dire une augmentation de la température du sud au nord, cette situation se maintient jusqu'au mois d'octobre. L'analyse des cartes d'isovaleurs de l'évapotranspiration potentielle montre bien une augmentation générale du sud au nord suivant en cela

l'évolution de la température de l'air (respectivement de 6 mm j^{-1} à 9 mm j^{-1} en moyenne), sans différence entre l'est et l'ouest. Le différentiel nord-sud est le plus fort en juin avec 3 mm j^{-1} au sud et plus de 10 mm j^{-1} au nord, impliquant des vents thermiques violents à cette époque. Enfin la répartition de la nébulosité suit un axe SO-NE. Elle augmente vers le nord en début de saison sèche (de janvier à mars) pour s'inverser ensuite jusqu'à l'arrivée des pluies. A partir de juin, les fortes nébulosités sont observées au sud du delta durant toute la saison des pluies, avec un léger gradient positif d'est en ouest.

Dans l'analyse spatio-temporelle des principaux facteurs météorologiques, on retrouve bien une opposition nord-sud classique avec un climat sahélien marqué au nord et un climat soudanien au sud. La différence de morphologie entre la cuvette sud et la cuvette nord ne se traduit pas par un changement de comportement climatique.

■ Bilan hydrologique annuel du delta depuis le début du siècle

Une période humide 1907-1969, une période sèche 1970-1995

L'analyse interannuelle des résultats du calcul de la lame d'eau annuelle précipitée sur le delta intérieur du Niger montre que six des sept premières décennies du siècle (de 1907 à 1969), à l'exception de la décennie 1911-1920, ont une pluviométrie supérieure ou égale à la moyenne du siècle qui est de 555 mm an^{-1} , les trois dernières décennies du siècle ayant une pluviométrie inférieure (tableau 1). Cette rupture pluviométrique à l'échelle du siècle a été décrite par Mahé *et al.* (2001). Elle confirme l'ampleur sous-continentale de la sécheresse au Sahel, dont le début se situe le plus souvent entre 1969 et 1971. La période étudiée 1907-1995 se partage donc en deux périodes : une première humide allant de 1907 à 1969 et une seconde sèche de 1970 à 1995. La figure 2 illustre le glissement de l'ensemble des isohyètes du nord vers le sud entre ces deux périodes hydroclimatiques bien marquées. Ainsi

Diré situé au niveau de l'isohyète 300 mm en période humide se trouve aujourd'hui en-dessous de l'isohyète 200 mm (fig. 2). Cependant cette péjoration pluviométrique ne change pas l'orientation des isohyètes. Il ne semble donc pas y avoir de changement relatif dans l'abondance pluviométrique entre les différentes régions constitutives du delta.

La lame d'eau précipitée moyenne était de 587 mm an^{-1} lors de la période humide contre 478 mm an^{-1} actuellement, ce qui représente pour ces dernières années un déficit pluviométrique de 19 % par rapport à la période précédente.

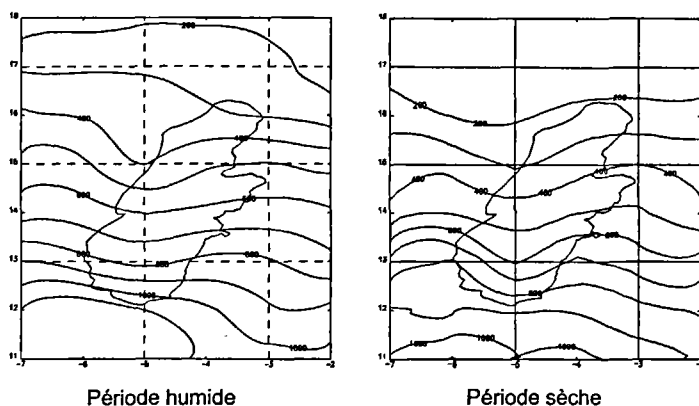


Figure 2

Comparaison des isohyètes annuelles sur le delta intérieur du fleuve Niger au Mali entre la période humide (1907-1969) et la période sèche (1970-1995).

Reconstitution des écoulements du delta depuis le début du siècle

L'écoulement entrant est constitué par les apports du Niger à Ké-Macina et du Bani à Douna. L'écoulement sortant est celui du Niger à Diré. Les données de débits existent dès 1922 pour Douna, 1924 pour Diré et 1951 pour Ké-Macina (Marieu *et al.*, 1998). Afin de présenter une chronique de débits annuels aussi longue que la chronique de pluies, nous avons reconstitué les modules annuels manquants du début du siècle en recherchant des régressions

linéaires entre les modules hydrologiques de stations amont et aval du fleuve. Notons que les écoulements entrants dans le delta présentent une mauvaise corrélation avec la variabilité pluviométrique sur le delta.

Il existe une très bonne corrélation ($r^2 = 0,95$) sur la période 1951-1969 entre les modules du Niger à Ké-Macina et ceux du Niger à Koulikoro, station hydrologique de référence du bassin amont du fleuve Niger située environ 300 km avant Ké-Macina, dont les observations débutent en 1907 (Bricquet *et al.*, 1996 ; Lamagat *et al.*, 1996). Les modules annuels du Niger à Ké-Macina avant 1951 sont donc reconstitués à partir des débits observés du Niger à Koulikoro. Les débits à Diré sont estimés à partir de ceux de Koulikoro ($r^2 = 0,95$ pour 66 ans) pour les deux premières décennies du siècle. Puis l'écoulement du Bani à Douna est reconstitué à partir des débits de Diré ($r^2 = 0,82$ pour 46 ans).

Bilan hydrologique moyen

L'apport en eau est double : il provient de la pluie et des écoulements de surface amont, ici les apports du Niger et du Bani. Ainsi, à partir des écoulements entrants, de l'écoulement sortant et de la hauteur de pluie tombée, on peut calculer le bilan d'écoulement sur le delta (tableau 1). Sur la période 1907-1995, la lame écoulee entrant dans le delta est de 787 mm an⁻¹ tandis que la lame précipitée est de 555 mm an⁻¹. L'apport total théorique en eau au delta est donc de 1 340 mm par an. Mais le coefficient de ruissellement de la pluie est très faible dans cette région du fait d'une très forte évaporation et des pentes très faibles où le ruissellement est piégé dans de très nombreuses petites dépressions évaporatoires. Aussi la lame ruisselée contributive à l'écoulement est de seulement 5 %, l'infiltration étant négligeable (Marieu, 2000). La quantité d'eau participant réellement à l'écoulement de surface dans le delta est donc de 815 mm par an (tableau 1).

A Diré, la lame écoulee sortante est de 452 mm an⁻¹, ce qui fait une perte en eau dans le delta de 335 mm (ou 363 mm si l'on considère l'apport supplémentaire par la pluie ruisselée). Si l'on considère la somme des pluies tombées sur le delta avec les écoulements entrants, soit une moyenne de 1 340 mm an⁻¹, il est remarquable de constater que la perte totale en eau, qui correspond à l'eau évaporée – ou dans une très faible partie, infiltrée – est

relativement constante au cours du siècle. Que ce soit en période sèche ou humide, le delta intérieur du Niger perd toujours les deux tiers de l'eau qui lui sont apportés.

Tableau 1

Eléments du bilan hydrologique du delta intérieur du Niger et moyennes interannuelles caractéristiques, de 1907 à 1995.
 PCE : pluie annuelle contributive aux écoulements du delta, elle correspond à 5 % de la pluie annuelle ;
 Le : écoulement annuel entrant dans le delta ;
 Ls : écoulement annuel sortant du delta.
 La perte d'écoulement est la différence Le-Ls ;
 la perte réelle en eau prend en compte les écoulements entrants et la pluie contributive.
 La surface totale de l'impluvium correspondant au fonctionnement hydrologique du delta intérieur est de 73 000 km².

| | Pluie annuelle | PCE | Le | Ls | Perte d'écoulement | | PCE / Le | PCE + Le | Perte réelle en eau |
|-----------------------|----------------|-----|------|-----|--------------------|------|----------|----------|---------------------|
| Années | mm | mm | Mm | mm | mm | % | % | mm | % |
| 1907-1910 | 577 | 29 | 856 | 530 | 326 | 38,1 | 3.4 | 885 | 40,1 |
| 1911-1920 | 540 | 27 | 813 | 514 | 299 | 36,8 | 3.3 | 840 | 38,8 |
| 1921-1930 | 566 | 28 | 1035 | 566 | 469 | 45,3 | 2.7 | 1063 | 46,8 |
| 1931-1940 | 594 | 30 | 882 | 470 | 412 | 46,7 | 3.4 | 912 | 48,5 |
| 1941-1950 | 573 | 29 | 753 | 398 | 355 | 47,1 | 3.9 | 782 | 49,1 |
| 1951-1960 | 658 | 33 | 1057 | 577 | 480 | 45,4 | 3.1 | 1090 | 47,1 |
| 1961-1970 | 587 | 29 | 911 | 498 | 413 | 45,3 | 3.2 | 940 | 47,0 |
| 1971-1980 | 499 | 25 | 605 | 378 | 227 | 37,5 | 4.1 | 630 | 40,0 |
| 1981-1990 | 432 | 22 | 361 | 251 | 110 | 30,5 | 6.1 | 383 | 34,5 |
| 1991-1995 | 522 | 26 | 485 | 310 | 175 | 36,1 | 5.4 | 511 | 39,3 |
| Le siècle | | | | | | | | | |
| 1907-1995 | 555 | 28 | 787 | 452 | 335 | 42,6 | 3.6 | 815 | 44,5 |
| Période humide | | | | | | | | | |
| 1907-1969 | 587 | 29 | 908 | 506 | 402 | 44,3 | 3.2 | 937 | 46,0 |
| Période sèche | | | | | | | | | |
| 1970-1995 | 478 | 24 | 492 | 321 | 171 | 34,8 | 4.9 | 516 | 37,8 |

Durant la période humide (1907-1969), le delta a reçu en moyenne 587 mm an⁻¹ de pluie et 908 mm an⁻¹ de lame d'eau écoulee (tableau 1). Pendant la période sèche (1970-1995), les apports fluviaux ont chuté de 46 % pour une baisse des précipitations de

19 % seulement. La rupture nette observée en 1970 sur la courbe d'évolution interannuelle des écoulements entrants dans le delta depuis 1907 est aussi observable sur celle de la lame d'eau précipitée (fig. 3).

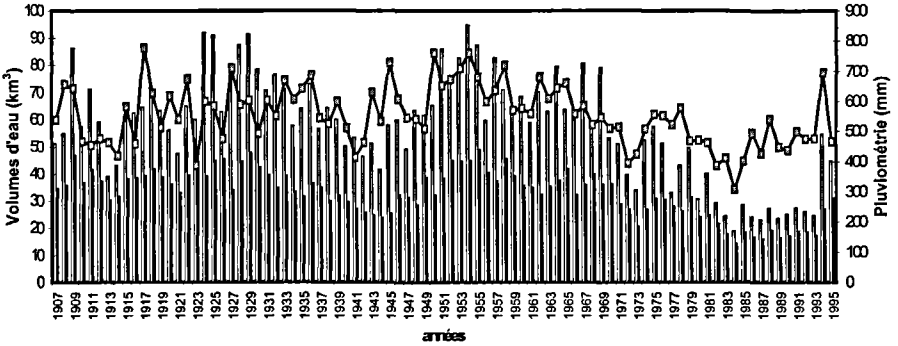


Figure 3
Evolution interannuelle de 1907 à 1995 des volumes d'eau en entrée et en sortie du delta (histogramme, en km^3 par an) et de la pluviométrie (courbe, en mm).

La cause majeure de la diminution des ressources en eau dans le delta intérieur du Niger est en premier lieu la réduction des apports des bassins versants amont du delta. Ceci se traduit par un changement dans le rapport entre écoulement entrant et écoulement sortant. En période humide, les écoulements sortant représentent 54 % des écoulements entrants alors qu'ils constituent 65 % des écoulements entrants en période sèche. Les volumes écoulés sont en moyenne de $57,5 \text{ km}^3$, variant pour les extrêmes annuels de 1 à 5 : 19 km^3 en 1984 et 95 km^3 en 1954. La moyenne de la période humide est de 66 km^3 pour 36 km^3 en période sèche. La lame d'eau écoulee perdue varie de 402 mm par an (29 km^3) en période humide à 171 mm an^{-1} (12 km^3) en période sèche (fig. 3), soit une diminution de plus de 57 %. L'apport moyen de la pluie aux écoulements sortant à Diré serait de seulement 6,5 %, soit 2 km^3 , fluctuant de 3 % à 11 % pour respectivement les périodes sèches et humides (de $1,4$ à $2,8 \text{ km}^3$).

I Variabilité hydrologique nord-sud dans le delta

Les débits mensuels pour les stations des lacs centraux (Aka sur le cours principal du fleuve Niger, Awoye sur son cours secondaire et Korientzé sur son cours tertiaire – respectivement d'ouest en est à la sortie des lacs centraux) sont disponibles sur la période commune de 1955 à 1996 en valeurs soit observées, soit reconstituées par corrélations mensuelles entre stations proches (Marieu *et al.*, 1998 ; Mahé *et al.*, sous-pression).

Les pertes annuelles en eau (différence entre écoulement entrant et écoulement sortant) sont en moyenne plus fortes dans la cuvette nord ($10,5 \text{ km}^3$) que dans la cuvette sud ($8,2 \text{ km}^3$), cette dernière étant pourtant 4 fois plus grande en surface totale – ou 2,5 fois en surface « deltaïque ». La perte spécifique (c'est-à-dire le volume annuel d'eau perdu par le système hydrologique et rapporté à la surface) est donc de 3,5 ou 5 fois plus importante au Nord qu'au Sud selon les limites de bassin utilisées, soit 700 mm an^{-1} au Nord et 145 ou 225 mm an^{-1} au Sud respectivement. Cela signifie que la cuvette nord prélève au réseau hydrographique trois ou cinq fois plus d'eau par unité de surface que la cuvette sud.

La cuvette sud fonctionne en plaine de transit, où la crue arrive sur un terrain recouvert d'une végétation déjà dense du fait de la pluie arrivée un mois plus tôt. Cette végétation limite les surfaces d'eau libre et donc l'évaporation. Dans la cuvette nord, l'inondation alimente de très nombreuses dépressions latérales où l'eau est piégée, formant alors d'immenses lacs périphériques (Mahé *et al.*, sous-pression ; Picouet *et al.*, ce volume) : les surfaces d'eau libre y sont importantes, la température de l'air plus élevée et la couverture nuageuse plus faible, le potentiel évaporatoire y est donc beaucoup plus fort. De plus, lors d'importants débordements dans la zone nord, l'infiltration peut être également plus élevée, car les terrains rencontrés au-delà des fonds de mares et des berges sont alors essentiellement constitués de sols très sableux, voire de dunes vives. Cette différence géomorphologique se traduit par une évolution interannuelle très différente des pertes en eau des deux cuvettes (fig. 4). Si les pertes en eau de la cuvette nord suivent l'évolution des pertes sur l'ensemble du delta, les pertes en eau de

la cuvette sud sont relativement stables, entre 15 % et 20 %. En effet, il n'apparaît pas – contrairement à la partie nord – de rupture dans le fonctionnement de cette partie du delta en 1971, date du début de la période de sécheresse. Par contre, les tests de rupture sur la série chronologique de la cuvette nord font apparaître 1971 comme point temporel de changement dans le fonctionnement hydrologique de cette zone géographique. Ce résultat est confirmé par des observations de terrain qui mettent en évidence des changements d'équilibre hydraulique entre les années 60 et 70 sur de nombreuses stations hydrologiques (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Cette brusque diminution des pertes en eau de la cuvette nord entre la période humide et la période sèche, non enregistrée sur la cuvette sud, confirme l'importance du remplissage des lacs périphériques par effet de seuil dans le fonctionnement hydrologique de la cuvette nord. Ainsi durant les années 50, les pertes en eau dans la cuvette nord étaient 3,5 fois supérieures à celles de la cuvette sud : la remise en eau de nombreux lacs de rive gauche témoigne d'une extension importante de l'inondation durant cette période (Auvray, 1960). A partir de 1972, les pertes en eau de la cuvette nord ne sont plus que de 10 à 15 % (fig. 4). Sur l'ensemble du delta, les pertes en eau, qui se situaient entre 40 et 45 % de l'écoulement entrant avant 1971, sont aujourd'hui de l'ordre de 30 %.

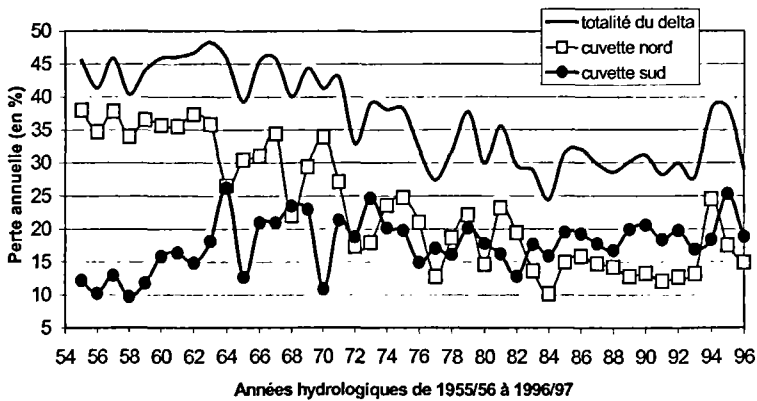


Figure 4

Comparaison des pertes annuelles en eau entre l'entrée et la sortie du delta avec les pertes de la « cuvette sud » et de la « cuvette nord », les pertes en eau étant entendues comme la différence entre les volumes écoulés entrants et sortants.

Conclusion

Comme l'ensemble du continent ouest-africain, le delta intérieur du Niger a subi très fortement les conséquences de la sécheresse durant ces trente dernières années. Entre les deux périodes 1907-1969 et 1970-1995, la réduction des apports fluviaux au delta est d'environ 48 %, pour un déficit pluviométrique de 19 %. La diminution de la superficie inondée de ces dernières années est donc principalement due à la forte baisse des écoulements du Niger et du Bani. Cette lame d'eau écoulée entrante est passée de 908 mm an^{-1} en période humide (moyenne sur 1907-1969) à 492 mm an^{-1} en période sèche (moyenne sur 1970-1995), pour une lame d'eau précipitée variant entre 587 et 478 mm an^{-1} ; la lame d'eau précipitée peut être supérieure à la lame d'eau écoulée entrante. Mais le faible coefficient de ruissellement (de 5 % environ) confère à la lame de pluie ruisselée un caractère marginal dans la contribution à l'inondation. Aussi même en période sèche, la lame écoulée entrante représente la quasi totalité de l'eau écoulée dans le delta (de 89 à 97 %).

La situation récente de sécheresse a apporté une modification importante dans les pertes en eau du delta. En période humide, la lame d'eau écoulée perdue est de 402 mm an^{-1} pour seulement 171 mm an^{-1} en période sèche, la lame d'eau précipitée évaporée ou infiltrée étant réduite de 100 mm environ (de 558 à 454 mm par an). Ainsi, entre la période humide et la période sèche, la perte en eau par évaporation est passée de 40 % à 50 % du volume d'eau total apporté au delta. L'ensemble des paramètres climatiques étudiés (pluviométrie, température de l'air, évaporation potentielle et nébulosité) montre un gradient nord-sud, positif ou négatif selon le paramètre envisagé ; et seules la pluviométrie et la nébulosité montrent un gradient secondaire positif est-ouest. Cette variabilité spatiale nord-sud se surimpose à la différence géomorphologique entre une plaine d'inondation, au sud des lacs centraux du delta, et un erg inondable au nord. En effet, la cuvette nord prélève cinq fois plus d'eau que la cuvette sud du fait des effets cumulés de l'alimentation en eau de lacs périphériques, de paramètres climatiques plus favorables à l'évaporation, de l'existence de surfaces d'eau libre plus importantes et d'une possibilité d'infiltration sur les bordures dunaires. Le fonctionnement

hydrologique de la cuvette sud ne semble pas subir de modification importante suite à la sécheresse, au contraire de la cuvette nord qui perd sa capacité à remplir les lacs périphériques. Le changement homogène de la répartition spatiale des pluies entre la période humide et la période sèche semble indiquer que ce sont uniquement les caractéristiques géomorphologiques du delta qui ont accentué l'opposition Nord-Sud dans le delta.

Remerciements

Nous tenons à remercier les directions nationales et régionales maliennes de la météorologie et de l'hydrologie. Cette étude a été co-financée par le Gip-Hydrosystèmes (ministère de la Recherche, Paris) dans le cadre du projet de recherche Gihrex de l'IRD.

Bibliographie

- Auvray C., 1960 –
Monographie du Niger, B : la cuvette lacustre. Paris, Orstom : 12-45.
- Bamba F., Mahé G., Bricquet J.-P., Olivry J.-C., 1996 –
« Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la cuvette lacustre ». In : *XI^{es} Journées hydro.* Orstom, Paris, IRD.
- Bamba F., Fofana M. L., Mahé G., 1999 –
Spatialisation des données météorologiques dans le delta intérieur du Niger. Etudes et rapports Gihrex, ER41, IRD, Bamako, 61 p.
- Bricquet J.-P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.-C., 1996 –
« Changements climatiques récents et modifications du fleuve Niger à Koulikoro (Mali) ». In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, IAHS Publ., 238 : 157-166.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.-P., Molinier M., 1986 –
Monographie hydrologique du fleuve Niger. Paris, Orstom, coll. Monographies hydrologiques, 2 tomes, 902 p.
- Guiguen N., 1985 –
Etudes hydrologiques complémentaires de la cuvette lacustre du Niger, rapport final. Autorité du bassin du Niger, projet Hydroniger, Orstom, Bamako, 71 p.
- Lamagat J.-P., Sambou S., Albergel J., 1996 –
« Analyse statistique de l'écoulement d'un fleuve dans une plaine d'inondation : application aux côtes maximales du fleuve Niger dans la cuvette lacustre ». In : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, IAHS Publ., 238 : 367-379.

- Mahé G., Delclaux F., Crespy A., 1994 – Elaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrologie Continentale*, 9 (2) : 169-180.
- Mahé G., Olivry J.-C., 1995 – Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6 (1) : 109-117.
- Mahé G., Olivry J.-C., 1999 – Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, série II a, 328 : 621-626.
- 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.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.-C., Wotling G., 2001 – Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa, 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2) : 211-226.
- Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.-C., in-press – Water losses in the Niger river inner delta : water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes J.*
- Marieu B., Bamba F., Bricquet J.-P., Cissé N., Gréard M., Henry des Tureaux T., Mahé G., Mahieux A., Olivry J.-C., Orange D., Picouet C., Sidibé M., Touré M., 1998 – Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour Equanis. Etudes et rapports Gihrex, ER32, IRD, Bamako, Mali, 81 p.
- Marieu B., 2000 – Etude hydrologique de la mare de Batamani. Etudes et rapports Gihrex, ER46, IRD, Bamako, Mali, 28 p.
- Olivry J.-C., 1993 – « Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale ». In Griselin M. (éd.) : *L'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frecaut*, Presses universitaires de Nancy : 181-190.
- Olivry J.-C., 1995 – « Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du Delta intérieur ». In Olivry J.-C., Boulègue J. (éd.) : *Grands bassins fluviaux périalantiques : Congo, Niger, Amazone*, Paris, IRD, coll. Colloques et séminaires : 267-280.
- Orange D., Wesselink A. J., Mahé G., Feizouré C. T., 1997 – "The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa". In: *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*, IAHS Publ., 240 : 113-123.
- 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.
- Pouyaud B., 1987 – « Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques ». In : *The influence of climate change and climate variability on the hydrologic regime and water resources*, IAHS Publ., 168.

Quensière J.(éd.), 1994 –
*La pêche dans le delta central
du Niger.* Paris, IER-Orstom-Karthala,
2 volumes, 495 p.

Soumaguel A., 1996 –
*Elaboration des fichiers
opérationnels pour le calcul
régionalisé des pluies par
la méthode du vecteur régional
(MVR) sur le bassin du Niger.*
Etudes et rapports Gihrex, ER1,
IRD, Bamako, Mali, 34 p.

Wotling G., Mahé G., L'hote Y. ,
Le Barbe L., 1995 –
*Analyse par les vecteurs régionaux
de la variabilité spatio-temporelle
des précipitations annuelles
liées à la mousson africaine.*
Veille Climatique Satellitaire,
52 : 58-73.