

Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger

Didier Orange

Hydrologue

Gil Mahé

Hydrologue

Lamine Dembélé

Géographe

Cheik Hamalla Diakité

Géographe

Marcel Kuper

Hydraulicien

Jean-Claude Olivry

Hydrologue

Le delta intérieur du fleuve Niger au Mali est un vaste ensemble inondable au centre du Sahel, de 30 000 à 40 000 km² environ et d'un intérêt majeur tant pour l'économie du pays que pour la conservation de la biodiversité, qui dépendent très largement de la superficie annuelle inondée. Plusieurs études récentes ont montré l'importance de l'étendue annuelle de l'inondation sur la productivité du milieu (Laë, 1994 ; Kuper *et al.*, 1999) et par voie de conséquence sur la richesse des populations (Veeneklaas *et al.*, 1990 ; Quensière, 1994). Or depuis les années 70, le continent africain est soumis à une sécheresse sans précédent (Mahé et Olivry, 1995, 1999 ; Paturel *et al.*, 1997 ; Mahé *et al.*, 2001), qui a occasionné une baisse importante du niveau des eaux de surface et souterraines, notamment au Mali (Bricquet *et al.*, 1996 ; Mahé

et al., 2000). Cette baisse des écoulements a provoqué une réduction des surfaces inondées dans le delta intérieur du Niger, entraînant des problèmes graves d'exploitation pour les populations de la zone qui vivent au rythme de son remplissage et de sa vidange (Quensière, 1994 ; Marie, 2000). Devant cette situation de crise induite par vingt ans de déficit hydrologique, la lutte contre la pauvreté et pour le développement économique de cette région aux capacités de production exceptionnelles pour une région sahélienne passe par une gestion efficace des eaux de surface. La connaissance de la dynamique spatio-temporelle du cycle de l'eau mais surtout des potentialités annuelles d'inondation prévisible est donc une nécessité.

Dans cette étude, nous reprenons un modèle d'extension maximale annuelle d'inondation du delta intérieur construit à partir d'un découpage agro-écologique (Cissé et Gosseye, 1990) que nous testons à partir de données hydrologiques récentes. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par un modèle d'inondation basé uniquement sur une approche hydrologique (Olivry, 1995 ; Mahé *et al.*, sous-presse). Notre propos est de préciser le fonctionnement hydrologique des plaines d'inondation du sud, de l'erg inondé du nord et des lacs périphériques en confrontant ces deux approches indépendantes, afin de déterminer les superficies d'inondation de ces grandes composantes géographiques du delta en fonction des volumes d'eau provenant du bassin amont.

I Cadre physique de l'étude

La « cuvette lacustre » du delta intérieur du Niger s'étend à l'aval des stations hydrologiques de Ké-Macina sur le fleuve Niger et de Douna sur le Bani, jusqu'à Diré au nord (figure I, hors texte). Ses limites correspondent à l'impluvium fonctionnel du delta ; sa superficie totale entre ces trois stations est d'environ 73 000 km², qui peut schématiquement être subdivisée en deux cuvettes, une au sud de 58 000 km² et une au nord de 15 000 km², de part et d'autre de lacs centraux (respectivement d'ouest en est : le Wallado, le Débo et le Korientzé). Le sud-est de la cuvette sud est occupé par des petits bassins descendant des plateaux dogons (d'une superficie de 25 000 km²) dont les réseaux hydrologiques inférieurs

participent à la plaine d'inondation (figure I, hors texte); cependant leur contribution à l'écoulement reste modeste, environ $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en module annuel (Auvray, 1960); $20\,000 \text{ km}^2$ parmi ces $25\,000$ ne sont pas des surfaces deltaïques (Mahé *et al.*, ce volume¹). De plus, les contours des cuvettes sud et nord ne comprennent pas les surfaces des lacs latéraux, qui occupent sur les marges de la cuvette nord de vastes superficies. Ils sont alimentés par le fleuve au fur et à mesure de la montée des eaux. L'existence de seuils à des niveaux variables à l'entrée de ces lacs provoque la retenue permanente de gros volumes d'eau lentement évaporés (Arfi *et al.*, 1999; Orange, 2000). Le système de lacs de la région de Goundam au nord-ouest de Diré (lacs Télé et Faguibine) n'est pas compris non plus dans le système hydrologique défini pour cette étude, car il est alimenté en aval de Diré, peu avant la « réelle » sortie du delta à Koryoumé (près de Tombouctou), à 60 km au nord-est de Diré (figure I, hors texte).

La cuvette lacustre ainsi définie englobe complètement la surface d'inondation maximale décrite par Poncet (1994) à partir de photographies aériennes, à l'exception du cône de sortie entre Diré et Tombouctou (figure I, hors texte), fonctionnel uniquement lors des années à forte hydraulité. Cette superficie maximale d'inondation est estimée à $30\,000 \text{ km}^2$.

I Fonctionnement hydrologique

Données hydrologiques

Les débits mensuels pour les stations des lacs centraux (Aka sur le cours principal, Awoye sur le cours secondaire et Korientzé sur le cours tertiaire, respectivement d'ouest en est à la sortie des lacs centraux) sont disponibles sur la période commune 1955-1996 en valeurs observées ou reconstituées par corrélations mensuelles entre stations proches (Marieu *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, ce volume). Aux stations amont et aval de la cuvette, les données

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*.

mensuelles de débit sont disponibles à Ké-Macina depuis 1953 (reconstitution de 1924 à 1952 par corrélations mensuelles avec Koulikoro), à Douna depuis 1922 (1937 à 1950 reconstitués par corrélation pluie/débit) et à Diré depuis 1924 (Bamba *et al.*, 1996).

Sur la période 1955-1996, le débit moyen entrant dans le delta est de $1\,490\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, le débit sortant à Diré est de $900\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (tableau 1). La perte totale moyenne en eau est de 40 % du débit entrant moyen, soit un volume d'eau perdu de $18,7\text{ km}^3\text{ an}^{-1}$, variant sur la période entre 4 et $39\text{ km}^3\text{ an}^{-1}$, soit respectivement 24 et 48 % (Mahé *et al.*, sous-presse). Les pluies sur la région varient entre 356 et 682 mm an^{-1} , pour une moyenne interannuelle de 545 mm an^{-1} . En négligeant l'infiltration, qui pourrait être compensée par les précipitations d'après les travaux de Guiguen (1985), de Brunet-Moret *et al.* (1986) et nos observations de terrain (Mariou, 2000), le total évaporé au-dessus du delta est estimé en moyenne à 800 mm an^{-1} , avec une variation annuelle de 400 à $1\,300\text{ mm an}^{-1}$ pour les cycles 1984/85 et 1924/25 respectivement.

■ Tableau 1

Données hydrologiques moyennes du delta intérieur du Niger.

Delta amont : implusium entre les entrées de Ké-Macina et Douna et les sorties des lacs centraux ;

Delta aval : implusium entre les lacs centraux et la sortie de Diré.

	Surface (km^2)	Période	Volume entrant ($\text{km}^3\text{ an}^{-1}$)	Volume sortant ($\text{km}^3\text{ an}^{-1}$)	Perte ($\text{km}^3\text{ an}^{-1}$)	Perte spécifique ($\text{m}^3\text{ an}^{-1}\text{ m}^{-2}$)
Delta amont (au sud)	58 000	1955 - 1996	47,1	38,9	8,2	0,14
		1955 - 1971	66,3	55,3	11,0	0,19
		1972 - 1996	34,0	27,6	6,4	0,11
Delta aval (au nord)	15 000	1955 - 1996	38,9	28,4	10,5	0,70
		1955 - 1971	55,3	36,8	18,5	1,23
		1972 - 1996	27,6	22,6	5,0	0,33

Variabilité interannuelle des pertes en eau

Les pertes annuelles moyennes en eau dans la cuvette sont de $29,5\text{ km}^3\text{ an}^{-1}$ de 1955 à 1971, puis de seulement $11,4\text{ km}^3\text{ an}^{-1}$ durant la période 1972-1996, soit près de trois fois moins. Cette différence de volume d'eau perdue (principalement par

évaporation, l'infiltration étant négligeable) sur l'ensemble du delta est proportionnelle à la quantité d'eau entrant dans le delta (tableau 1) : en effet, il existe une relation linéaire entre les pertes totales en eau à la sortie du delta et les débits entrants, aussi bien pour les périodes avant ou après sécheresse (fig. 1). A l'échelle du delta, il ne semble donc pas y avoir eu de changement de fonctionnement hydrologique suite à la sécheresse des années 1970. Mais qu'en est-il au niveau des sous-régions du delta ?

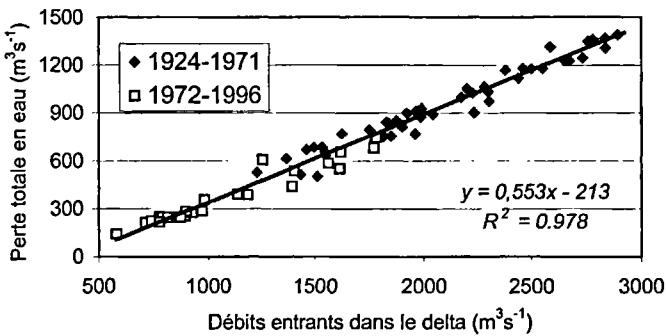


Figure 1

Relation entre pertes totales en eau dans le delta intérieur du Niger et les débits entrants du fleuve Niger (somme des débits de Ké-Macina sur le Niger et de Douna sur le Bani), pour la période avant sécheresse (1924-1971) et la période après sécheresse (1972-1996) (d'après Mahé *et al.*, sous presse).

Les pertes annuelles sont en moyenne depuis 1972 plus fortes dans la cuvette nord que dans la cuvette sud (tableau 1), cette dernière étant pourtant 4 fois plus grande en surface (ou 2,5 fois si l'on ne considère que les surfaces « deltaïques »), ce qui se traduit par des pertes spécifiques en eau plus importantes au nord qu'au sud. Les tests statistiques de rupture sur les séries hydrologiques du delta montrent en effet une différence de comportement entre la cuvette sud et la cuvette nord (Mahé *et al.*, ce volume). En fait, ce sont les relations entre pertes en eau et débits entrants qui changent (fig. 2). Si cette relation n'a pas changé dans la cuvette sud de 1960 à nos jours (enveloppe en pointillée sur la figure 2), elle a très largement évolué dans la cuvette nord depuis le début de la période de déficit

pluviométrique, où on identifie très clairement deux populations de points, avant et après 1970. Les cuvettes sud et nord ont donc un fonctionnement hydrologique différent. Dans la cuvette sud, les pertes en eau augmentent linéairement avec les débits d'entrée jusqu'à $1\,700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, puis pour des débits supérieurs les pertes augmentent peu jusqu'à $2\,500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ puis les valeurs se dispersent (fig. 2). Le schéma est plus complexe pour la cuvette nord, où les pertes en eau sont plus faibles que dans le sud pour des débits entrants inférieurs à $1\,500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$; puis les pertes augmentent fortement pour devenir très largement supérieures aux pertes de la cuvette sud pour des débits entrants supérieurs à $1\,700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, ce qui correspond à des débits de la période 1955-70.

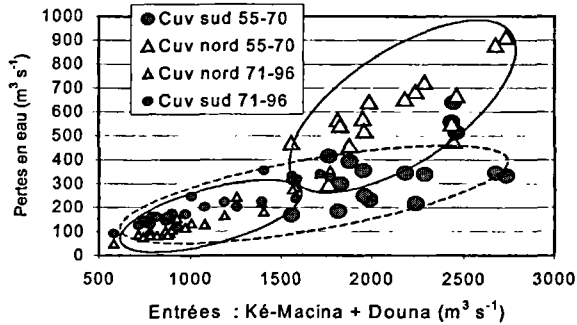


Figure 2

Pertes annuelles en eau (en $\text{m}^3\text{ s}^{-1}$) dans les cuvettes sud et nord du delta intérieur du Niger pour les périodes avant et après sécheresse (respectivement 1955-1970 et 1970-1996). Enveloppe en pointillés pour la cuvette sud ; enveloppes en trait plein pour la cuvette nord (d'après Mahé *et al.*, sous-presse).

Dans le sud, le pourcentage de perte annuelle en eau n'évolue pas significativement avec les forts débits des années 60, ce qui semble indiquer une limitation des surfaces inondables au sud ; par contre, dans le nord, les pertes annuelles en eau augmentent très fortement avec les entrées : les surfaces potentiellement inondables dans la cuvette nord augmentent donc brusquement pour des niveaux d'eau plus élevés (au contraire de la cuvette sud), ce qui favorise d'autant le pourcentage de pertes en eau par évaporation sur surface d'eaux libres, où le potentiel d'évaporation est plus fort.

■ Un modèle agro-écologique d'inondation

Suite aux travaux cartographiques du Pirt (1983), publiés par le ministère de l'Environnement et de l'Élevage de l'État malien, un modèle d'inondation basé sur la cartographie d'unités taxonomiques inondables dans les zones agro-écologiques constituant le delta a été réalisé par Cissé et Gosseye (1990). Nous en proposons ici, d'après les travaux de Dembélé (1999), une version ajustée aux nouvelles conditions hydrologiques prévalant aujourd'hui, à la suite des deux dernières décennies de déficit pluviométrique.

Les principes du modèle agro-écologique

L'approche utilisée par Cissé et Gosseye (1990) repose sur la cartographie des unités taxonomiques inondables associée à l'identification de leur fonctionnement hydrologique, par zone agro-écologique du delta. Le modèle aboutit à une relation entre la hauteur maximale de crue du fleuve Niger lue à l'échelle limnimétrique de Mopti et la superficie inondée maximale dans son delta intérieur par zone agro-écologique. Une zone agro-écologique est définie comme étant une entité géographique homogène du point de vue géologique, géomorphologique, pédologique, climatique et hydrologique. Six zones agro-écologiques recourent la zone d'impluvium du delta définie comme étant la cuvette lacustre (figure I, hors texte), à savoir respectivement du sud au nord : « Delta central », « Plateau », « Méma Dioura », « Gourma », « Zone lacustre » et « Bodara », représentant une superficie totale de 57 000 km². La différence de superficie avec l'impluvium (73 000 km²) est expliquée par la non prise en compte des plateaux dogons d'environ 25 000 km² et dont la contribution à l'écoulement est négligeable. Enfin, on note que la cuvette nord de l'impluvium correspond à la somme des zones agro-écologiques « Zone lacustre » et « Bodara ».

Sur cet ensemble géographique, six unités taxonomiques inondables sont identifiées à partir des travaux du Pirt (Hiernaux, 1980 ; Hiernaux *et al.*, 1983 ; Hiernaux et Diarra, 1986). L'unité

taxonomique inondable est une association de formations végétales, spécifique du delta, caractérisée par sa cote de début d'inondation et l'épaisseur maximale d'eau autorisée. En effet, à une association végétale donnée correspond une hauteur d'eau maximale possible de vie. Les six unités taxonomiques retenues sont, de bas en haut dans le paysage :

- X₆ : surfaces permanentes d'eau libre, correspondant donc au lit mineur du fleuve et des rivières ;
- TI₇ : zone à bourgou (ou bourgoutières), correspondant aux chenaux d'alimentation et aux fonds de lacs pouvant devenir sec (à limons fins) ;
- TI₁ : bourgoutières, orizeraies, vétiveraies basses et éragrostaies basses, correspondant aux formations végétales basses à moyennes (à argiles limoneuses) ;
- TI₂ : les rizières hors-casiers ou non (à limons argileux et fertilité haute) ;
- TI₃ : andropogonaies, éragrostaies, vétiveraies moyennes, correspondant aux formations végétales hautes (à argiles limoneuses et fertilité basse) ;
- TI₄ : vétiveraies hautes, correspondant aux bourrelets de berge (à limons).

Les hypothèses du modèle agro-écologique

Comme première hypothèse, il est admis d'utiliser la hauteur du maximum de crue lue sur l'échelle limnimétrique de la station hydrologique de Mopti comme étant représentative du niveau d'inondation de l'année considérée, et donc de son extension. En effet, Mopti est située à la confluence du Bani et du Niger, et on peut supposer que la variation interannuelle du niveau d'eau à cette station est directement liée à l'étendue maximale inondée.

La deuxième hypothèse sous-entend que le seuil d'entrée d'eau des casiers rizicoles de l'Office Riz Mopti est représentatif du début de l'inondation de la zone deltaïque, qui correspond à la cote 263 cm lue à Mopti. Il est donc admis que la cote du début d'inondation de la base des unités TI₁ et TI₇ (les plus basses dans le paysage) est de 263 cm lue à Mopti.

En troisième hypothèse, on note que les vétiveraies hautes (TI₄) et les andropogonaies (TI₃), supportant la lame d'eau d'inondation la plus faible (de 0 à 60 cm), matérialisent les points hauts du

paysage ; à l'inverse, les espèces végétales de TI₁ et TI₇ matérialisent les points bas. On obtient ainsi par unité taxonomique inondable des encadrements d'épaisseur de lame de submersion possible, comme indiqué dans le tableau 2. La reconstitution de l'inondation se fera donc par remplissage successif de ces compartiments taxonomiques en allant de bas en haut du paysage : on remplit donc successivement TI₇, TI₁, TI₂, TI₃ et TI₄.

Pour cela, on formule la quatrième hypothèse suivante : le processus d'inondation est linéaire entre deux seuils. Au-delà du seuil maximum, c'est-à-dire une fois que l'unité taxonomique la plus haute est inondée (soit les bourrelets de berge ou TI₄), on assume que les superficies supplémentaires inondées sont une extrapolation linéaire du remplissage de ce dernier compartiment. Bien sûr, ces superficies supplémentaires inondées ne sont pas des unités taxonomiques inondables (ou reconnues comme telles) mais sont d'autres unités « normalement² » non inondables, qui peuvent l'être parfois du fait de leurs relations topographiques et hydrologiques directes avec la zone deltaïque. Ce fut par exemple le cas lors de la crue de 1994.

Tableau 2

Equivalence entre les unités taxonomiques inondables (décrites par le Pirt, 1983), les formations végétales (décrites par Hiernaux, 1980), leurs hauteurs d'eau supportées et les cotes d'inondation lues à l'échelle de Mopti (H en cm).

Type de formations végétales	Unités taxonomiques	Associations végétales	Epaisseur de la lame de submersion	Cotes d'inondation (H)	
				Climax 1944-1968 (1)	Climax 1969-1978 (2)
Végétation haute	TI ₃ , TI ₄	andropogon, vétiver	0 à 60 cm	600<H<660	550<H<610
Rizières	TI ₂	riz	30 à 180 cm	480<H<630	430<H<580
Végétation basse	TI ₁ , TI ₇	bourgou, riz, vétiver	150 à 400 cm 60 à 150 cm	263<H<600	263<H<550

(1) Cissé et Gosseye, 1990 ; (2) cette étude.

² « Normalement » pris dans le sens de « répondant à une répartition de loi normale ».

Enfin, la cinquième hypothèse suppose que les formations végétales pérennes sont en situation d'équilibre avec le milieu et qu'elles représentent donc un témoin de l'importance de l'inondation. Cet équilibre entre formations végétales et crues moyennes traduit l'existence d'une situation de type « climax ». Pour Cissé et Gosseye (1990), cette situation climax correspond au maximum décadaire moyen moins l'écart-type de la crue lue à Mopti entre 1944 et 1968, soit $686 \text{ cm} \pm 26 \text{ cm}$. Cette valeur est donc supposée être représentative des crues moyennes les plus fréquentes ; la valeur 0 cm de submersion (pour la formation végétale la plus élevée en altitude) correspond donc alors à la cote de 660 cm à Mopti. Mais suite aux sécheresses successives des années 70 puis 80, et considérant que les formations végétales sont en perpétuel ajustement suite aux fluctuations interannuelles de l'inondation (ce qui n'est pas en contradiction avec l'hypothèse soulignée juste avant), nous avons préféré choisir l'état moyen de la crue le plus fréquemment représenté sur la période 1969-1978. On obtient alors la cote de 610 cm comme maximum décadaire moyen minimum de la crue à Mopti, au lieu de 660 cm pour Cissé et Gosseye (1990) (fig. 3).

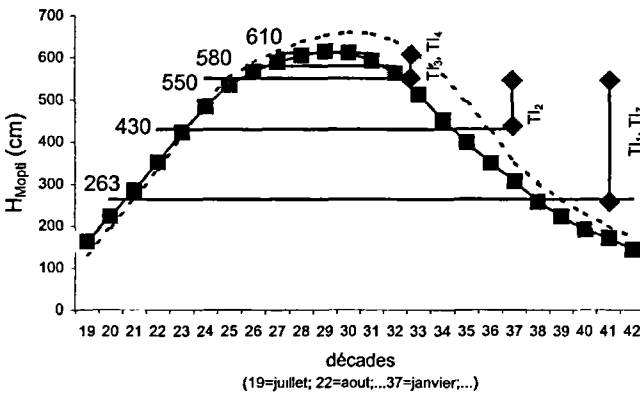


Figure 3

Courbe limnimétrique d'une crue moyenne à Mopti sur la période de référence 1969-1978, avec indication des seuils d'inondation des unités taxonomiques inondables du delta intérieur du Niger (T_1 et T_7 , T_2 , T_3 et T_4). En pointillé est indiquée la courbe limnimétrique moyenne sur la période 1944-1968 choisie par Cissé et Gosseye (1990).

Abaques de superficies inondées

La borne supérieure du modèle agro-écologique d'inondation est par définition la cote à laquelle l'eau recouvre le sommet de TI_4 . On a admis que cette cote est fonction du climax d'équilibre de l'association végétation/inondation représentée par le maximum décadaire de crue le plus fréquent enregistré à Mopti entre 1969 et 1978, soit 610 cm. Ensuite le choix des seuils d'inondation des unités taxonomiques se fait en commençant le raisonnement par la borne supérieure, comme indiqué en figure 3. Par exemple, les unités TI_4 et TI_3 ne supportant que 60 cm d'eau, la borne inférieure d'inondation pour le climax 1969-1978 est donc de 550 cm, etc. (tabl. 2). Notons enfin que le seuil 263 cm est un seul seuil absolu : il dépend uniquement du seuil d'entrée d'eau dans la plaine. A partir de ces cotes remarquables d'inondation, caractéristiques des bornes représentatives des unités taxonomiques, on construit un abaque donnant la correspondance entre la hauteur limnimétrique du maximum de crue lue à Mopti et la superficie inondée maximale (fig. 4). Attention, cet abaque ne peut être utilisé que pour estimer la superficie maximale d'inondation de la crue d'un cycle hydrologique donné, et non pour suivre l'évolution de la superficie inondée en fonction de la cote lue à l'échelle de Mopti.

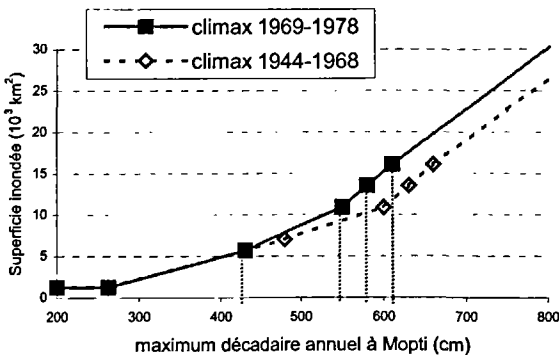


Figure 4

Abaque d'inondation du delta intérieur du Niger par un modèle agro-écologique donnant la superficie annuelle inondée en fonction du maximum décadaire annuel lue à Mopti. « Climax 1969-1978 » en trait plein (cette étude) ; « Climax 1944-1968 » en pointillé (Cissé et Gosseye, 1990).

Comme mentionné dans les hypothèses de construction du modèle, l'inondation fonctionne par seuil avec un remplissage linéaire entre deux seuils consécutifs pour chaque zone agro-écologique. L'abaque est donc constitué d'un ensemble de segments de droite ; le détail des calculs est consultable dans Dembélé (1999).

L'abaque construit à partir du climax 1969-1978 donne des estimations de superficie inondée supérieures à celles données par l'abaque de Cissé et Gosseye (1990), de 3 000 à 4 000 km² de plus pour des cotes supérieures à 580 cm (fig. 4). Pour la cote maximale observée à Mopti depuis le début du siècle, soit 731 cm le 4 novembre 1955, on obtient une superficie inondée de 25 100 km², ce qui est de l'ordre de grandeur de l'enveloppe des 30 000 km² estimée par photo-interprétation (Poncet, 1994), qui correspond à la limite extérieure des zones inondées et contient donc les points hauts du paysage non inondables et donc non comptés dans l'estimation donnée par notre modèle.

Critique du modèle agro-écologique

La période 1955-1996 comprend des décennies humides (les années 50 et 60) et des décennies sèches (les années 70 et 80). On peut donc considérer qu'à l'échelle du siècle, cette période d'observation est significative de l'état moyen de l'hydrologie de la région.

Le modèle agro-écologique selon le climax 1979-1986 donne une moyenne de superficie inondée de 17 000 km² an⁻¹, avec un maximum de 25 000 km² en 1955 et un minimum de 6 000 km² en 1984. Avec le climax 1944-1968, Cissé et Gosseye (1990) obtenaient une valeur moyenne de 14 000 km² an⁻¹, ce qui semble fortement sous-estimé d'après les observations de terrain de Poncet (1994), donnant une superficie d'inondation moyenne de 19 000 km² an⁻¹. De même, le Pirt (1983) lors de l'élaboration de son programme d'inventaire des ressources terrestres au Mali estimait la surface d'inondation à 22 340 km². Le climax 1969-1978 retenu pour cette étude semble donc être mieux adapté à la détermination des superficies inondées à partir des relevés taxonomiques de Hiernaux (1980). Cette estimation d'une superficie moyenne inondable de 17 000 km² sur l'ensemble du delta correspond également à l'estimation effectuée récemment par Marie (2000 et ce volume).

La superficie inondée maximale a également été calculée par Olivry (1994) à partir de l'équation du bilan hydrologique, en faisant intervenir la différence entre les volumes d'eau entrant et sortant du delta, et une estimation graphique de l'évaporation réelle ; la méthode est décrite dans Olivry (1995). La superficie inondée maximale annuelle, entre Ké-Macina et Diré, est estimée à 26 000 km² en moyenne, ce qui semble cette fois très largement surestimée. En effet, le modèle hydrologique donne une superficie annuelle inondée toujours supérieure à celle des modèles agro-écologiques (fig. 5), surtout lors des décennies humides où les superficies obtenues sont supérieures à 30 000 km², ce qui est supérieur à la superficie de l'enveloppe extérieure des inondations maximales observée par photographie aérienne. Ceci tend bien à prouver que ce modèle hydrologique surestime l'inondation. Par contre, on retrouve la même variabilité interannuelle, ce qui semble confirmer la validité des deux approches indépendantes utilisées, à savoir agro-écologique ou hydrologique. Enfin, cela confirme aussi le bien-fondé de la représentativité de la hauteur de crue lue à Mopti comme image de la superficie maximale inondée dans l'ensemble du delta intérieur du Niger.

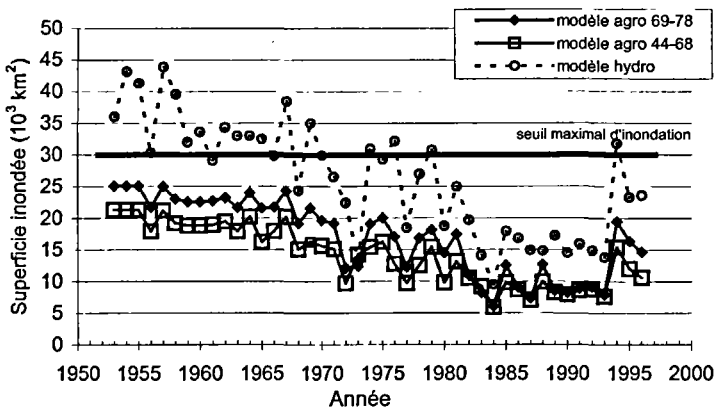


Figure 5

Comparaison des modèles d'inondation concernant le delta intérieur du Niger.

En traits pleins, les modèles agro-écologiques selon le climat 1944-1968 (Cissé et Gosseye, 1990) et le climat 1969-1978 (cette étude) ; en pointillé, le modèle hydrologique (selon Olivry, 1995).

I Dynamiques hydrologique et superficies d'inondation

Rôle de la cuvette sud et de la cuvette nord

A partir du découpage en zones agro-écologiques du delta, le modèle agro-écologique a pu être appliqué pour la détermination des superficies inondées annuelles maximales dans les cuvettes sud et nord. Les résultats sont donnés *in extenso* dans le tableau 3. La superficie d'inondation moyenne est de 14 000 km² pour la cuvette sud et de 3 000 km² pour la cuvette nord. Ces évaluations correspondent aux estimations données par Poncet (1994) d'après ses relevés de terrain. En effet, cet auteur retient la superficie d'inondation de 14 500 km² pour la cuvette sud et 4 600 km² pour la cuvette nord³. Par ailleurs, à partir de l'approche hydrologique, le volume de perte en eau annuel moyen pour la cuvette sud est estimé à 8,2 km³, augmenté d'environ 1,5 km³ provenant de la zone de plateau du pays dogon (Mahé *et al.*, sous-presse), ce qui donne une surface inondée de 14 000 km², pour une évaporation en 4 mois de 175 mm par mois.

Les extrêmes sont représentés par l'année 1954 pour le maximum d'inondation et l'année 1984 pour le minimum, avec respectivement 21 500 et 3 600 km² au sud, et 4 300 et 1 700 km² au nord. La valeur de 21 500 km² pour la cuvette sud en 1954 semble surestimée et fait probablement intervenir des débordements dans la zone agro-écologique du « plateau » située à l'est de Mopti (figure I, hors texte) ; en effet, Gallais (1967) donne une surface inondée d'environ 19 000 km² pour la cuvette sud dans

³ D'après Poncet (1994), on peut distinguer 4 unités hydrographiques qui sont : (1) le haut delta s'étendant de Ké-Macina (entrée) à une ligne schématique Ténenkou-Kouakourou-Sofara avec une surface inondée moyenne de 6 516 km² ; (2) le delta moyen en aval du précédant entre la courbe Ténenkou-Kouakourou et approximativement une ligne droite joignant Konna sur le Niger à Toguéré Koumbé sur le Diaka avec une superficie inondée de 7 930 km² ; (3) le bas delta qui est la zone des dépôts alluviaux et des colmatages à proximité des lacs centraux Wallado, Débo et Korientzé, constituant de vastes bassins de décantation de 3 758 km² ; (4) enfin, le nord dunaire, aussi dénommé « erg de Niafunké » et « erg inondé » avec une superficie de 800 km². Plus au Nord, le système des lacs Télé, Gourber et Faguibine et du marigot de Bourem couvre une superficie inondée de 1 200 km².

les années 50 très humides. Pour la période sèche des années 70, il évalue la superficie d'inondation de la cuvette sud à environ 8 000 km² (Gallais, 1984). Tous ces chiffres tendent donc à confirmer la validité de l'utilisation de notre modèle agro-écologique à l'échelle des cuvettes du delta.

De 1953 à 1972, le rapport entre la superficie inondée de la cuvette nord sur la cuvette sud est de 18 %, ce rapport augmente légèrement lors de la décennie 70 et double presque lors de la décennie 80 avec une valeur de 36 % (fig. 6).

On constate aussi sur cette figure 6 que certaines années de cette décennie sèche (1985, 1988 et 1994) montrent un rapport proche de celui des années 70, et que ce rapport est à nouveau inférieur à 20 % depuis 1994 (année correspondant à une reprise d'écoulements équivalents à ceux des années 60). Nous pouvons en conclure que le delta n'a pas changé de fonctionnement hydrologique suite à ces vingt dernières années de sécheresse ; il fonctionne différemment depuis 1973 du fait d'un niveau de seuil hydrologique non atteint, ce seuil se situant aux alentours de 540 cm de hauteur de crue maximum annuelle lue à Mopti.

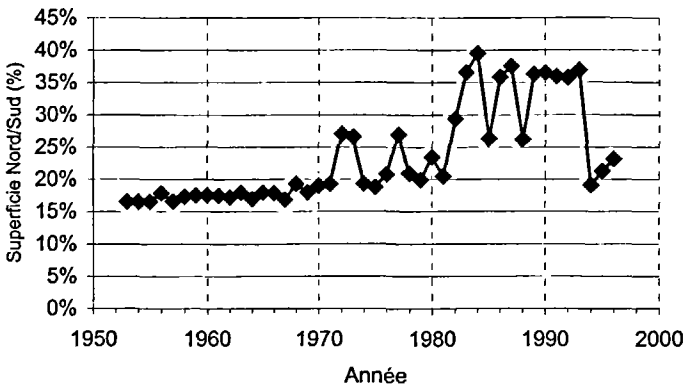


Figure 6

Evolution interannuelle du rapport (en pourcentage) des superficies inondées maximales annuelles de la cuvette nord sur la cuvette sud dans le delta intérieur du Niger (estimée à partir du modèle agro-écologique de cette étude).

Rôle des lacs périphériques et apports annuels du delta à leur superficie

Dans Mahé *et al.* (sous-presse), la superficie inondée moyenne annuelle de la cuvette nord est estimée par différence de la superficie totale inondée moins la superficie inondée de la cuvette sud. On obtient alors une superficie moyenne de 10 000 km², ce qui est largement supérieur à l'estimation de notre modèle agro-écologique et aux estimations cartographiques des différents géographes spécialistes de la zone, qui évaluent cette différence entre 4 000 et 5 000 km². Qu'en est-il ?

Le tracé des pertes annuelles en eau en fonction des surfaces inondées maximales (fig. 7) montre qu'il n'y a pas d'évolution significative dans la cuvette sud en fonction de la superficie annuelle de l'inondation : les pertes sont toujours du même ordre de pourcentage. Par contre, dans la cuvette nord, on identifie bien deux populations de points distinctes traduisant un fonctionnement différent de cette cuvette en fonction de la superficie inondée vis-à-vis du pourcentage de pertes en eau. En effet, à partir d'une superficie inondée de l'ordre de 25 000 km², la proportion d'eau perdue par la cuvette nord augmente brusquement. Cette modification est attribuée au remplissage des lacs périphériques de la cuvette nord à partir d'un certain niveau d'eau, correspondant au seuil de 630 cm à l'échelle de Mopti (pour 25 000 km² inondés).

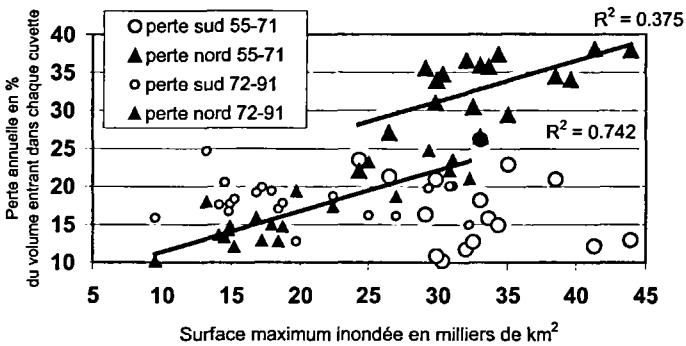
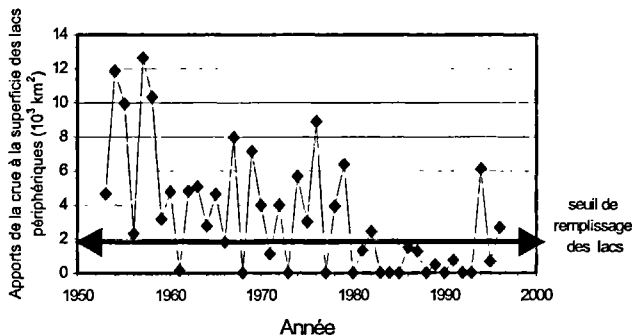


Figure 7

Pourcentages de pertes dans les cuvettes nord et sud jusqu'à et après 1971 (par rapport aux entrées dans chaque cuvette), en fonction des surfaces inondées maximales obtenues par le modèle hydrologique.

On a déjà vu que les deux chroniques interannuelles de superficies inondées reconstituées à partir du modèle agro-écologique et du modèle hydrologique ont une évolution similaire, même si les valeurs données par le modèle hydrologique semblent surestimées (fig. 5). Or ces deux modèles sont construits à partir de deux approches indépendantes ; on peut donc considérer qu'ils sont bien l'image de l'évolution réelle de la superficie inondée depuis les années 50. D'après ce qui précède (fig. 7), on attribue la surestimation donnée par le modèle hydrologique aux pertes en eau liées aux remplissages des lacs périphériques. De plus suite à nos observations de terrain de 1980 à nos jours, on sait que les années les plus sèches entre 1983 et 1993 n'ont pas alimenté les lacs périphériques ; à partir de ce constat, on cale la courbe d'évolution donnée par le modèle hydrologique sur la courbe obtenue par le modèle agro-écologique. Puis on attribue la différence entre ces deux estimations à la contribution des eaux d'inondation du delta aux remplissages des lacs périphériques – et donc de leur superficie (fig. 8).



■ Figure 8
Evolution interannuelle des apports de la crue du delta aux remplissages des lacs périphériques de la cuvette nord (estimation à 2 000 km² près).

Or lors des importants débordements dans la zone nord, les terrains rencontrés par les eaux d'inondation, au-delà des fonds de mares et des berges, sont essentiellement constitués de sols très sableux, voire de dunes vives ; l'infiltration n'est alors plus négligeable. Par ailleurs, nos observations de terrain nous confirment que seules les

années 1994 et 1996 ont participé aux remplissages des lacs périphériques depuis le début des années 80, ce qui (d'après la figure 9) donnerait un seuil de remplissage des lacs périphériques de 2 000 km² (correspondant aux volumes d'eau perdus par infiltration). La figure 8 donne donc une visualisation de l'évolution interannuelle du remplissage des lacs périphériques par les eaux d'inondation du delta.

La contribution de la crue du delta à la superficie des lacs périphériques de la cuvette nord serait en moyenne de 3 000 km², atteignant jusqu'à 10 000 km² lors de la décennie humide des années 50. Au-delà de ces chiffres, la figure 8 permet de visualiser les années de non remplissage des lacs lors de la deuxième moitié du vingtième siècle. De 1950 à 1969 (correspondant à la période dite « humide »), seules deux années (1961 et 1968) n'ont pas participé au remplissage des lacs périphériques. Par contre depuis 1980 (soit sur 17 ans d'observations), seulement 3 années (1982, 1994, 1996) ont au contraire contribué au remplissage. Cette figure montre encore une fois, le caractère exceptionnellement sévère de la sécheresse des années 80, qui fut de loin une décennie catastrophique pour la productivité en ressources naturelles du delta intérieur du Niger.

Conclusion

Deux approches indépendantes ont permis de montrer la forte variabilité des superficies inondées dans le delta en fonction des apports en eau des bassins amont, les apports par la pluie jouant un rôle très faible. Le raisonnement sur les pertes en eau reconstituées à partir des mesures hydrologiques ont mis en évidence que les cuvettes sud et nord fonctionnaient différemment : la cuvette sud a un seuil de remplissage vite atteint, d'où un fonctionnement identique hors et durant sécheresse, alors que la cuvette nord possède un réseau ancien d'épandage et de drainage de la crue, hérité de périodes plus humides passées, qui se remet en fonction dès lors que le niveau de la crue est suffisamment élevé. En effet, il apparaît que le fonctionnement hydrologique du delta intérieur du Niger n'a pas changé malgré ces vingt dernières années de sécheresse. Pendant les années de crue basse, la crue inonde très

peu et l'eau reste dans le lit mineur, les lacs périphériques ne sont pas alimentés : on est en phase de seuil minimum (tel 1984). Pour les années de crue moyenne (comme 1992), la crue contribue à l'inondation des plaines par phénomène de débordements successifs de seuils après sortie du lit mineur. Pour les années humides (à partir de 1994), les seuils maximums sont à nouveau dépassés, les lacs périphériques se trouvent largement alimentés en eau par la crue et forment des zones évaporatoires supplémentaires (de grande étendue du fait de leur déclivité extrêmement faible). On note aussi que les pertes en eau par infiltration ne sont alors plus négligeables. L'exemplarité de la péjoration hydrologique subie par le delta intérieur du Niger de 1983 à 1993 s'est traduite par un arrêt du remplissage des lacs périphériques durant ces onze années, ce qui n'était jamais arrivé depuis le début des observations en 1953.

La superficie inondée chaque année est environ de 20 000 km², se répartissant entre 14 000 km² pour la cuvette sud, 3 000 km² pour la cuvette nord et 3 000 km² pour les lacs périphériques. La superficie inondée dans la cuvette nord ne s'est réduite que de moitié lors de l'année la plus sèche en 1984, elle fut réduite des 5/6 dans la cuvette sud cette année-là, soit seulement 3 600 km². Quand on sait que la productivité de ce milieu inondable est directement proportionnelle à la superficie inondée, ces chiffres montrent d'eux-mêmes toute la précarité des systèmes d'exploitation du delta intérieur du Niger. Une augmentation de 60 cm du niveau du pic de crue lu à Mopti entraîne une augmentation d'environ un tiers de la superficie inondée, soit en moyenne 5 000 km² de plus. Aussi les surfaces inondées annuellement ont varié dans un rapport de 1 à 5 depuis 1950.

Cette étude confirme donc que la gestion de la ressource en eau à l'échelle de la région naturelle du delta intérieur du Niger passe obligatoirement par une connaissance de la dynamique spatio-temporelle de l'inondation de cet écosystème sahélien en fonction d'une prévision à partir des apports amont. Une étude dans ce sens est en cours pour prévoir les surfaces inondées à l'aide de l'imagerie satellitaire NOAA (Mariko *et al.*, ce volume⁴).

⁴ Mariko A., Mahé G., Orange D., Royer A., Nonguierma A., Amani A., Servat E., ce volume – « Suivi des zones d'inondation du delta intérieur du Niger : perspectives avec les données basse résolution NOAA/AVHRR ». In : *partie 2*.

Bibliographie

- Arfi R., Audollet M., Kuper M., Mahieux A., Mariou B., Ouattara A. K., Sidibé I., 1999 – *Delta intérieur du Niger : les lacs périphériques (26 octobre - 14 nov. 1999)*. Rapport de mission Gihrex, RM15, IRD, Bamako, Mali, 59 p.
- Auvray C., 1960 – *Monographie du Niger, B : la cuvette lacustre*. Paris, Orstom, 116 p.
- 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 : *actes des XI^{es} Journées hydrologiques de l'Orstom*, paru, Orstom : 00-00.
- Bricquet J.-P., Mahé G., Bamba F., Olivry J.-C., 1996 – « Changements climatiques récents et modifications du fleuve Niger et 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 – *Cuvette lacustre et Niger moyen*. Paris, Orstom, coll. Monographies hydrologiques, 8, tome 2, 506 p.
- Cissé S., Gosseye P. A., 1990 – *Compétition pour des ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali, rapport 1*. Centre des recherches agrobiologiques (Cabo), Wageningen, Pays-Bas, 170 p.
- Dembélé L., 1999 – *Synthèse analytique des modèles d'inondation dans le delta intérieur du Niger au Mali*. Mémoires Gihrex, M33, IRD, Bamako, 58 p.
- Gallais J., 1967 – *Le delta intérieur du Niger, étude de géographie régionale*. Dakar, Mémoire Ifan, 79 , 2 vol. : 621 p.
- Gallais J., 1984 – *Hommes du Sahel, espaces-temps et pouvoirs, le delta intérieur du Niger, 1960-1980*. Paris, Flammarion, 289 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.
- Hiemaux P., 1980 – *La carte des ressources fourragères des parcours du delta intérieur du Niger*. Notice, Cipéa-Odem, Bamako, Mali, 98 p.
- Hiemaux P., Cissé M. I., Diarra L., Coulibaly M., 1983 – *Recherche d'une solution aux problèmes de l'élevage dans le delta intérieur du Niger au Mali ; volume 1 : les pâturages de la zone d'étude*. Cipéa-Odem, Bamako, Mali, 132 p.
- Hiemaux P., Diarra L., 1986 – *Bilan de cinq années de recherches (sept. 1979 - sept. 1984) sur la production végétale des parcours des plaines d'inondation du fleuve Niger au Mali central*. Cipéa-Odem, Bamako, Mali, 66 p.
- Kuper M., Orange D., Mullen C., Poncet Y., Morand P., 1999 – « Modélisation intégrée d'un écosystème inondé et gestion des eaux : le cas du delta Intérieur du Niger au Mali ». In : *Ressources en eau de l'Afrique occidentale et centrale*, actes du colloque Friend-AOC, Yaoundé, 30 nov.- 2 déc. 1999), Unesco-PHI : 00-00.
- Laë R., 1994 – « Modifications des apports en eau et impact sur les captures de poisson ». In Quensièrre J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 255-265.

- 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., 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.
- Marie J., 2000 – *Delmasig : hommes, milieux, enjeux spatiaux et fonciers dans le delta intérieur du Niger (Mali)*. Mém. HDR, univ. Paris-X, Nanterre, 291 p.
- Mariou 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.
- Mariou B., 2000 – *Etude hydrologique de la mare de Batamani*. Etudes et rapports Gihrex, ER46, IRD, Bamako, Mali, 28 p.
- Olivry J.-C., 1994 – « Le contexte hydroclimatique de la cuvette lacustre ». In Quensière J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 39-58.
- Olivry J.-C., 1995 – « Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du Delta intérieur ». In : *Grands bassins fluviaux périalantiques : Congo, Niger, Amazone*, Paris, IRD, coll. Colloques et séminaires : 267-280.
- Orange D., 2000 – *Protocoles et règles pour l'évaluation de la dynamique de sédimentation dans les lacs, plaines et grands chenaux du delta intérieur du Niger*. Etudes et rapports Gihrex, ER61, IRD, Bamako, Mali, 45 p.
- Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Lubes H., Ouedraogo M., Masson J. M., 1997 – Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: An integrated regional approach. *J. Hydrol.*, 191 : 16-36.
- Pirt, 1983 – *Les ressources terrestres au Mali, atlas*. Mali, Usaid.
- Poncet Y., 1994 – « Les milieux du delta central ». In Quensière J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 58-66.
- Quensière J. (éd.), 1994 – *La pêche dans le Delta Central du Niger*. Paris, IER-Orstom-Karthala, 2 volumes, 495 p.
- Veeneklaas F. R., Cissé S., Gosseye P. A., van Duivenbooden N., van Keulen H., 1990 – *Compétition pour des ressources limitées : le cas de la cinquième région du Mali, rapport 4*. Centre des recherches agrobiologiques (Cabo), Wageningen, Pays-Bas, 182 p.