

La modélisation intégrée d'un écosystème inondable

Le cas du delta intérieur du Niger

Marcel Kuper
Hydraulicien

Christian Mullon
Modélisateur

Yveline Poncet
Géographe

Elisabeth Benga
Informaticienne

Pierre Morand
Halieute

Didier Orange
Hydrochimiste

Gil Mahé
Hydrologue

Robert Arfi
Hydrobiologiste

Fantagoma Bamba
Hydrologue

La modélisation des écosystèmes exploités demande un effort de recherche spécifique compte tenu de la diversité des processus à représenter, de la multiplicité des échelles et des niveaux d'organisation. Plus qu'utiliser ou adapter les outils existants, il est nécessaire conjointement en développer des spécifiques et réfléchir à une méthodologie de leur emploi. Le questionnement principal reste à savoir comment formaliser les systèmes physiques, biologiques et anthropiques de manière à anticiper leur dynamique.

Ce questionnement scientifique passe par cinq étapes de réflexion structurant la démarche de recherche : (1) définition des sous-systèmes en interaction ; (2) définition des relations d'échelle temps - espace, inter et intra (*e.g.* Blöschl et Sivapalan, 1995) ; (3) choix des modalités de construction pour chaque sous-système ; (4) tests de stabilité numérique de la somme des constructions ; (5) et enfin calage, validation, robustesse.

Lors de chacune de ces cinq étapes, il est primordial de garder en tête que la faisabilité de l'opération n'est pas résolue d'avance. C'est seulement la réalisation de ces cinq étapes qui permettra d'envisager s'il est possible de représenter (formaliser, modéliser) un tel système et avec quelle validité.

En raison de sa complexité et des enjeux en cours, la modélisation de l'écosystème exploité du delta intérieur du Niger constitue un cas exemplaire pour l'élaboration des outils spécifiques et à l'émergence de la méthodologie recherchée. Cela s'est concrétisé dans la définition des processus à retenir, des niveaux d'organisation à considérer, des scénarios de modélisation à mettre en œuvre. Cela est lié à la bonne connaissance antérieure de ce système (*e.g.* Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; Gallais, 1984 ; Quensière, 1994 ; Olivry, 1995), à l'échelle géographique large retenue (celle de tout le delta), à la perspective de gestion recherchée, et aux premiers choix en matière d'architecture informatique basée sur l'imbrication de couches correspondant aux niveaux d'organisation.

En nourrissant les discussions entre acteurs, en quantifiant l'impact des événements et des interventions sur le fonctionnement du delta, un modèle intégré devient un élément d'une approche intégrée dont le caractère est itératif : le modèle doit permettre de mieux expliciter et détailler les questions pertinentes de gestion (Kuper *et al.*, 1999). Le cheminement suivi a consisté dans le développement dès le début du projet d'une maquette du modèle intégré, puis dans l'organisation de séances de restitution et de discussion (de Noray, 2000). Cette démarche itérative a permis un développement progressif de la maquette, et surtout une prise de conscience par les acteurs de la nécessité d'intégration des actions de développement à mener. L'opération de modélisation intégrée, tient donc une place centrale dans le développement du projet de recherche. Elle joue un rôle fédérateur et stimulateur des différentes disciplines depuis les sciences de la nature jusqu'aux sciences humaines.

Le delta intérieur du Niger

Dans l'écosystème du delta intérieur du fleuve Niger au Mali, régime hydrologique, dynamique de l'environnement naturel et activités humaines (pêche, agriculture, élevage) sont étroitement associés (Gallais, 1984 ; Poncet et Orange, 1999). Ce système est intermédiaire entre des systèmes naturels (bassin de l'Amazone) et des systèmes fluviaux fortement modifiés par l'homme (aménagements sur le Sénégal). La question de la durabilité des modes d'exploitation par l'homme d'un tel milieu est cruciale: un enjeu important du développement du delta est d'assurer la transition entre une situation d'intensification de l'exploitation et une situation de gestion des ressources en tenant compte à la fois de la dynamique à long terme des systèmes physiques, biologiques et anthropiques et des besoins et des usages des populations.

Le delta intérieur malien constitue la plus vaste zone humide d'un pays soumis à un climat sec. Le delta regroupe un dixième de la population du Mali (975 000 habitants recensés en 1998) sur une étendue de 30 000 km² environ, et produit un dixième du produit intérieur brut rural. Il est fréquenté chaque année par un peu moins de 2 millions de têtes de bovins et autant d'ovins et caprins selon le recensement du ministère du Développement rural et de l'Eau en 1992. Les rizières non-aménagées (à submersion libre) couvrent une superficie variant chaque année entre 50 000 et 130 000 ha avec un rendement moyen inférieur à une tonne par hectare selon le ministère du Développement rural et de l'Eau en 1999. La production de pêche dépasse 100 000 tonnes les années de bonne crue (Breuil et Quensière, 1995).

Le programme de recherche Gihrex (*Gestion intégrée, hydrologie, ressources et systèmes d'exploitation*) conduit par l'IRD a eu pour objectif la compréhension de la dynamique naturelle du delta, la connaissance de ses modes d'exploitation et l'analyse de leur durabilité. En fait, il s'agissait de faire reconnaître le delta dans son ensemble comme une unité de gestion en essayant d'anticiper ses évolutions futures (Kuper *et al.*, 1999). Comment ce système naturel va-t-il se transformer sous : la pression foncière et démographique, les changements climatiques, l'évolution technique, l'impact d'aménagements hydrauliques, l'impact d'aménagements agricoles, la décentralisation administrative ?

La modélisation est utilisée comme un outil permettant de combiner une approche écologique de la dynamique des ressources et une approche socio-économique des activités humaines, de formaliser des interactions spatiales dans une dynamique temporelle, et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement d'un écosystème exploité. Ainsi les attendus de la modélisation sont tout à la fois la description du système, l'analyse et la compréhension de son fonctionnement, la simulation de son évolution.

Le logiciel

La configuration du modèle intégrée du delta intérieur du Niger est modulaire, les modules sont thématiques. Chaque module correspond à un type de processus. Le concept informatique de couche permet de bien marquer que chaque module représente une dynamique spatiale. L'avantage d'une telle configuration est qu'elle permet de développer et d'améliorer ces modules indépendamment, et qu'elle permet des calculs thématiques, qui peuvent être vérifiées et analysées. Les articulations entre les modules thématiques sont commandées par une horloge. Dans l'état actuel de la conception, le modèle a trois fonctions principales :

- *simulation et animation graphique* de l'ensemble des processus modélisés ou d'un seul processus ;
- *analyses de sensibilité* de certains paramètres influents ;
- *comparaison de scénarios* en accordant des valeurs différentes aux paramètres de simulation.

Le modèle assure les sorties suivantes : visualisations des données ou de la connectivité du système (figure VII-a, hors texte), animation du déroulement d'une simulation, cartographies des résultats d'une simulation, comparaisons des résultats de deux simulations différentes (figures VII-b et VIII-a, hors texte), analyses de sensibilité (figure VIII-b, hors texte). Enfin, le modèle *Midin* est accessible *via* Internet¹. Il s'exécute dans un environnement compatible Java2 pour deux types de version du logiciel : l'une peut être exécutée *via* Internet à partir d'un navigateur web ; l'autre peut être exécutée de façon autonome sur un micro-ordinateur. Un manuel d'utilisation est consultable sur le web *via* le même site.

¹ <http://www.orleans.ird.fr/midin.html>

■ Echelles, entités, principes de modélisation

Echelles et entités

Il a été décidé de choisir une extension et une échelle spatiale communes à tous les processus, puis de représenter dans cet espace la dynamique du système en considérant l'évolution d'entités représentatives. L'extension spatiale du modèle est celle du delta inondable tout entier, de Ké-Macina à Tombouctou. Les entités correspondent aux unités hydrologiques (plaines, lacs ou chenaux), aux groupes de pêcheurs, d'agriculteurs et d'agro-pêcheurs, aux troupeaux, aux zones de pêche, d'agriculture et d'élevage. L'échelle temporelle qui a été retenue est la quinzaine de jours. Les simulations portent sur une durée de trois ans.

Les entités hydrologiques sont définies à partir de leur fonctionnalité hydrologique et de leurs caractéristiques géographiques et géométriques. On distingue (Poncet *et al.*, 2000) :

- les chenaux, par lesquels transitent les flux d'eau, schématisés par des segments de droite ;
- les connexions, points de contact sur lesquels se divisent ou se rejoignent les flux d'eau ;
- les plaines inondables et les lacs, aires de stockage permanent ou temporaire de l'eau, schématisés par des cercles.

L'hydrosystème est donc représenté par des traits (chenaux, rivières, fleuve), des cônes (lacs, plaines) et des nœuds (défluences, confluences). La représentation des objets hydro-géographiques du delta fait intervenir 109 objets répartis comme suit : 7 lacs, 12 plaines et 90 segments (fig. 1). Ces objets constituent la matrice de l'organisation des données et de l'application des mécanismes qui nourrissent le modèle. En effet, la disponibilité en eau intervient dans tout le système, ce qui fait de l'eau la variable explicative principale. La couche thématique d'hydrologie est donc structurée à un niveau supérieur par rapport à toutes les autres couches.

Les autres entités spatiales sont les zones agricoles (68 zones), les zones de pêche (101 zones), les zones d'élevage (74 zones, dont 60 à l'intérieur du delta). Chacune est rattachée à un objet

hydrologique. La différence en nombre d'entités spatiales pour les systèmes de production est liée à la morphologie du milieu : par exemple, un lac permanent ne se prête pas à l'agriculture.

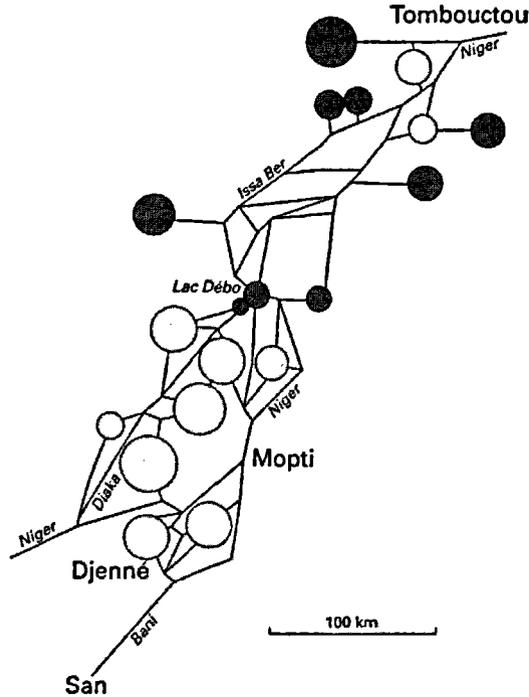


Figure 1
Les entités hydrologiques : chenaux, connexions, plaines et lacs.

Enfin, d'autres entités représentent les groupes d'exploitants²; elles sont rattachées à leur zone d'origine, mais peuvent également aller dans d'autres zones d'exploitation (*principe de mobilité*). Cette exploitation est déterminée dans le delta par des conventions traditionnelles (Marie, 1983; Gallais, 1984; Baumann *et al.*, 1994), par exemple des liens de parenté (*principe de connectivité*).

² 200 000 ménages participent souvent à plusieurs activités professionnelles (pêche, agriculture, élevage). Leurs décisions concernent l'engagement dans ces activités professionnelles, la durée de l'activité, le choix des lieux (parcelles, sites de pêche, trajet dans l'espace et dans le temps pour l'élevage) et l'utilisation de leur effectif.

Un modèle spatial et de comportements

La notion d'espace géographique est utilisée comme une interface pour comprendre, saisir et représenter les processus de la production naturelle de ressources et les processus de leur exploitation. Le delta comme région naturelle a été défini géographiquement par le périmètre de l'inondation fluviale et fonctionnellement comme un réseau orienté et ouvert. Les entités retenues :

- ont un sens géographique précis puisqu'elles sont référencées à leur place exacte et que leurs positions relatives sont respectées ;
- ont un sens hydrologique ;
- ont un sens socio-économique puisqu'elles correspondent aux secteurs de renouvellement naturel, de prélèvement et de production par l'homme des ressources naturelles de l'aire inondable.

La géographie de la région naturelle est donc un moyen de restituer la complexité de l'écosystème et de comprendre la signification de chaque élément dans l'ensemble. La connectivité du système, en fait les connexions hydrographiques, les itinéraires de migration, les droits de pêche, en constitue une composante essentielle. L'une des conséquences de ce choix spatial est la présentation des résultats sous la forme de cartes et de données localisées.

Par contre, ce ne sont pas les stratégies ni les modes de décision des agents économiques qui sont représentées dans le modèle. Ce sont les comportements – et en particulier les comportements spatiaux – de groupes homogènes d'individus, tels qu'ils ont été décrits dans différents travaux de recherche portant sur le delta (Quensière, 1994). Le modèle ne représente pas une unité de production avec un objectif de revenus et des règles de gestion, dont elle déduit un comportement de production. Le modèle représente un groupe d'unités de production résidant dans un village avec un comportement donné en matière de production et de migration. L'hypothèse est donc que le comportement spatial des agents est fortement structuré, et qu'à court terme, la structuration induite est stable. Elle peut donc être quantifiée et servir de base à des extrapolations. C'est une des raisons qui ont conduit à retenir une extension temporelle de trois ans pour les simulations. A plus long terme, cette hypothèse n'est plus tenable, les changements des conditions impliquant forcément des évolutions dans les comportements.

I Mécanismes

Hydrologie : un modèle de réservoir

Les hauteurs d'eau ont été estimées pour tous les objets hydrologiques à tous les pas de temps à partir des observations pendant la période 1993-1996. A chaque pas de temps, la connaissance des hauteurs d'eau permet de calculer les surfaces inondées des plaines et des lacs. Représenté sous forme de cône, le rayon réel est fonction de la hauteur d'eau réelle et de la géométrie de l'objet : altitude du fond, profondeur maximale et rayon de l'objet (respectivement le rayon minimal en étiage et le rayon maximal en crue) :

$$R(t) = r_{\min} + (r_{\max} - r_{\min}) \frac{h(t)}{P} \quad \text{Equation 1}$$

avec :

- R(t) rayon réel (km) au temps t,
- r_{\max} rayon à inondation maximale (km),
- r_{\min} rayon à inondation minimale (km), égale souvent 0,
- h(t) hauteur d'eau (m) au temps t,
- P profondeur de l'objet à inondation maximale (m) ; le rayon réel égale donc le grand rayon à cette hauteur d'eau.

La surface inondée à l'étape t est ensuite calculée en fonction du rayon réel. La surface inondée des segments est calculée en fonction de la longueur du segment qui est fixe et de sa largeur qui varie entre largeur lit mineur et largeur lit majeur.

Données hydrologiques

Pour les entités hydrologiques, on dispose de leurs caractéristiques hydrographiques (rayon à vide, rayon à plein, hauteur maxima, cote IGN) et des hauteurs d'eau observées pendant 3 années, de 1993 à 1995. En effet, les simulations sont basées sur la crue de 1993/94 (qualifiée de mauvaise crue), celle de 1994/95 (bonne crue) et celle de 1995/96 (crue moyenne). Les hauteurs d'eau ont été calculées à partir des observations journalières par la Direction nationale de l'hydraulique (DNH) pour les 18 stations limnimétriques. Ces données ont été critiquées et analysées dans la base de données Hydrom (Boyer *et al.*, 1994) et interpolées sur

l'ensemble des objets hydrologiques. L'interpolation est basée sur des corrélations stochastiques (Auvray, 1960 ; Brunet-Moret *et al.*, 1986 ; Marieu *et al.*, 1998).

Données pour intégrer des hypothèses d'aménagement

Midin a été conçu pour permettre de simuler l'impact d'aménagements hydrauliques ou hydroagricoles sur les écoulements et les systèmes de production du delta. Deux projets d'aménagement différents ont été pris en compte :

- la construction éventuelle d'un aménagement à l'amont du delta (les barrages en projet de Fomi en Guinée et de Talo au Mali) ;
- la construction éventuelle d'un aménagement hydroagricole à l'aval du delta (le projet du barrage de Tossaye).

Ces aménagements sont prévus par les gouvernements concernés (la Guinée, le Mali) et ont des impacts considérables sur les écoulements dans le delta.

Aménagement en amont

Un barrage à l'amont du delta, tel que le barrage de Sélingué, constitue en quelque sorte un château d'eau. Pendant la crue, il y a stockage et donc un écrêtage de la crue ; pendant l'étiage, il y a des lâchers d'eau pour générer de l'électricité et parvenir aux besoins en eau potable et en eau d'irrigation. Nous avons quantifié cet écrêtage de la façon suivante :

$$h(t) = h_1(t) - f * s * (o(t) - a) \quad \text{Equation 2}$$

avec :

- $h(t)$ hauteur d'eau à l'instant t après aménagement
- $h_1(t)$ hauteur d'eau à l'instant t sans aménagement
- a altitude du fond du lit
- f paramètre de contrôle
- s paramètre de contrôle liée a un aménagement à l'amont

Aménagement en aval

Les courbes de remous³ sous l'impact du barrage à l'aval provoquent une augmentation des hauteurs d'eau dans le delta. Ce

³ La courbe de remous est un phénomène de relèvement de la ligne d'eau superficielle en raison d'un ralentissement de l'écoulement à l'amont d'un rétrécissement ou d'un seuil dans le lit d'une rivière (Jaccon, 1986).

phénomène a été étudié par HydroConsult (1996) pour le barrage de Tossaye en projet. Dans le modèle, nous tenons compte de l'impact du barrage aval sur les hauteurs d'eau en délimitant les objets hydrologiques qui seront touchés par la gestion du barrage pour les quatre scénarios. L'algorithme que nous avons établi pour corriger les hauteurs d'eau pendant l'étiage est le suivant :

$$h(t) = \max(a + h(t) - a) * f, a + i \quad \text{Equation 3}$$

f est un paramètre de contrôle qui fait monter la hauteur d'eau au temps t . La valeur de f varie au cours de l'année et n'est pas la même pour tous les objets. On distingue cinq groupes : les objets qui ne sont pas influencés, les objets qui subissent un impact à la cote 254 m, ceux qui sont touchés quand la cote de la retenue s'élève à 258,75 m, 259,75 et au-dessus de 260 m.

Hydrobiologie

Ressources halieutiques

Ce module représente la dynamique de génération et de diffusion des poissons dans le temps et dans l'espace. La reproduction du poisson a lieu dans les plaines inondables : lorsque le poisson s'y trouve, son abondance suit une évolution logistique dans laquelle la capacité de charge dépend de la surface inondée (Morand et Bousquet, 1994):

$$A_i(t+1) = A_i(t) + rA_i(t)\left(1 - \frac{A_i(t)}{K_i(t)}\right) \quad \text{Equation 4}$$

avec :

- A_i abondance
- K_i capacité de charge
- r taux de croissance naturel

La diffusion de poissons s'effectue dans toutes les entités (segments, plaines, lacs) et suit une équation de mélange dépendant de la connectivité du système entre deux entités i et j :

$$A_i(t+1) = A_i(t) + \sum_j \beta_{ij} \frac{A_j(t)S_i(t) - A_i(t)S_j(t)}{S_i(t) + S_j(t)} \quad \text{Equation 5}$$

avec :

A_i abondance
 B_{ij} connectivité ($B_{ij} = B_{ji}$)
 S_i surface

Dans les segments, l'abondance du poisson ne croît pas, mais ne peut que diminuer du fait du prélèvement exercé par la pêche. Cependant, un paramètre #*Fertilité* représente le taux de croissance naturel de la population de poissons ; c'est le paramètre r de l'équation 4 ; il permet de simuler l'introduction des espèces plus ou moins prolifiques. r peut varier entre 0 et 2 et est fixé par défaut à 0,6. Un paramètre #*Diffusion* quantifie la vitesse de diffusion des populations de poissons ; il représente le nombre de fois que l'on appliquera une transformation homogénéisant les concentrations de poissons entre deux entités hydrologiques adjacentes ; ce paramètre est employé pour simuler des situations où des aménagements hydroagricoles (micro-coupures) transforment la connectivité du système.

Systèmes de production

Les systèmes de production sont représentés par un modèle de type « *marché de l'emploi* » en distinguant les activités halieutiques et agricoles représentées par un modèle *pulling* et les activités pastorales représentées par un modèle *pushing*.

Les activités halieutiques et agricoles : un modèle « *pulling* »

Les populations du delta sont représentées par des groupes de pêcheurs, d'agriculteurs, d'agro-pêcheurs. Ces groupes se déplacent vers des zones exploitables lorsque les ressources de ces zones sont suffisantes. Ces déplacements se font d'une zone à une autre en fonction de liens sociaux traditionnels et en fonction de l'inondation dans la zone (figure VII a, hors texte). Ce mécanisme souligne l'importance de la *mobilité* des groupes d'exploitants dans le delta. Profitant de la diversité morphologique et la variabilité temporelle, les exploitants se déplacent pour mieux exploiter des ressources naturelles sur des espaces déformables du delta.

Un groupe d'exploitants peut avoir de liens avec de nombreuses zones exploitables. Par exemple, les pêcheurs de la partie sud du delta (Diaka, Mopti) quittent en étiage leurs zones d'habitat et se

déplacent vers le complexe lacustre Débo/Walado. Cette mobilité s'applique également aux agriculteurs. Les agriculteurs des zones céréalières déficitaires (région de Tombouctou), par exemple, se déplacent pendant la saison de culture vers les grandes plaines en amont du complexe lacustre Débo/Walado pour y cultiver du riz (Kuper et Maïga, 2000).

Mécanismes de la production halieutique

Dans le module « pêche » les acteurs sont des groupes de pêcheurs ou d'agro-pêcheurs, et la ressource est le poisson. Les besoins en main-d'œuvre dans les zones de pêche dépendent de la saison de pêche en cours⁴ et de la capacité de pêche de la zone, qui correspond en fait au nombre maximal de pêcheurs pouvant être supporté dans la zone considérée. La répartition des pêcheurs dans les zones de pêche s'ajuste donc aux besoins – ou aux surplus – de main-d'œuvre. En cas de besoin, il s'agit de faire venir de la main-d'œuvre ; en cas de surplus, la main-d'œuvre qui n'est pas dans sa zone de pêche repart. En cas de renvoi de groupes de pêcheurs, le choix se porte sur les groupes les plus proches de la zone de pêche et en fonction du degré de sédentarisation de ces groupes.

Pour chaque zone de pêche, l'activité de pêche aboutit à des captures. Les captures sont fonction de la capturabilité q , selon la formule suivante (Laurec et Le Guen, 1981) :

$$Y(t) = qA_i(t)E \quad \text{Equation 6}$$

avec :

A_i	abondance
E	effort de pêche
Q	capturabilité
$Y(t)$	captures

L'effort de pêche est exprimé en nombre de sorties de pêche. Les captures sont ensuite multipliées par le prix de poisson pour obtenir les revenus des pêcheurs. La capacité maximale d'accueil des pêcheurs pour chacune des zones de pêche et pour chaque saison hydrologique, de même que les effectifs et droits d'accès de chacun des groupes de pêcheurs ou d'agro-pêcheurs, sont établis

⁴ L'année hydrologique est découpée en six périodes : basses eaux saison sèche, basses eaux saison des pluies, montée des eaux, hautes eaux, décrue, décrue fin de saison.

d'après les résultats d'enquête du programme de recherche « Pêche dans le delta central du Niger » (Quensière, 1994).

Le coefficient de capturabilité représente la proportion de la biomasse présente qui va être capturée par chaque unité d'effort. Ce coefficient peut varier en fonction des milieux et des saisons : il est plus fort en étiage, quand les poissons sont plus accessibles pour les pêcheurs. Ce coefficient peut varier entre 40 et 400 kg par sortie avec une valeur de 40 par défaut. Une augmentation de la capturabilité peut signifier une modernisation dans les moyens de pêche (motorisations des pirogues, filets plus solides...).

Le prix de poisson est un paramètre de contrôle que l'on peut faire varier entre 100 et 1 000 F CFA par kg, la valeur de défaut étant fixée à 500 F CFA par kg.

Mécanismes de la production agricole

Les acteurs du module d'agriculture sont les agriculteurs et les agro-pêcheurs ; la ressource est la superficie de terre agricole inondée et sa fertilité. Les agro-pêcheurs sont à la fois liés à des zones de pêche et des zones d'agriculture. Leur choix d'activité dépend de l'abondance des poissons et des opportunités de culture dans leurs zones d'intervention. En raison de leur tradition de pêche, les agro-pêcheurs marquent une préférence pour l'activité de pêche. Dans le modèle, sont uniquement pris en compte les cultures de riz traditionnel (riz à submersion libre, riz de décrue), qui dépendent de la qualité de la crue (Viguière, 1937 ; Kuper et Maïga, 2000). Les agriculteurs se déplacent d'une zone agricole à une autre en fonction de la disponibilité en semences, de la surface inondée et des liens traditionnels avec les zones de production.

Calcul des besoins en main-d'œuvre dans les zones agricoles

Pour chaque zone agricole et à chaque quinzaine, les besoins en main-d'œuvre sont calculés en fonction de la saison agricole : (1) labour et semis, (2) entretien (désherbage, traitement), (3) récolte et battage. Le calendrier des activités et la charge de travail sont basés sur les travaux de Gallais (1984).

La surface de riz semée dans une zone dépend de la surface agricole de cette zone, de la quantité de main-d'œuvre disponible, et de la disponibilité en semences. Elle ne dépend pas de la crue, car le semis se fait largement avant l'arrivée de la crue. La surface

de riz entretenue pendant la saison de culture dépend de la surface semée, de la surface inondée et donc de la qualité de la crue, de la morphologie des plaines et de la disponibilité de main-d'œuvre.

La récolte est fonction de la surface de riz entretenue, et donc des conditions de culture dans les étapes précédentes (importance de la crue, disponibilité de main-d'œuvre), et de la main-d'œuvre disponible pour la récolte et le battage. Elle dépend également du rendement soumis à nombre de contraintes tout le long de la saison de culture et qui est contrôlé par un indice de productivité.

*Calcul de la disponibilité de la main-d'œuvre
des groupes d'agriculteurs et d'agro-pêcheurs*

A chaque pas de temps, les besoins en main-d'œuvre sont recalculés. La répartition de la main-d'œuvre de groupes d'agriculteurs est effectuée selon le même schéma que celui des groupes de pêcheurs. Les groupes d'agriculteurs se déplacent, selon les besoins de main-d'œuvre des zones et selon leur disponibilité. Cette disponibilité dépend des autres opportunités (pêche, agriculture dans une autre zone) et de l'indice de sédentarisation, qui par défaut égale 0 % – *i.e.* pas de contrainte pour la mobilité des producteurs –, mais qui peut varier entre 0 et 100 %. Pendant la saison des récoltes, on calcule la quantité de riz récoltée par zone, par personne et par groupes d'agriculteurs, ce qui permet de calculer les revenus agricoles du groupe.

La superficie cultivable de chaque zone agricole a été calculée d'après les données de 1999 du ministère du Développement rural et de l'Eau. L'effectif et les zones agricoles dans lesquelles il est usuel ou possible que chaque groupe de producteurs aille travailler, sont établis d'après Quensièrre (1994).

La fertilité est indiquée par l'indice de productivité qui varie entre 200 et 2 000 kg ha⁻¹. La valeur par défaut est 900 kg ha⁻¹. L'indice de la disponibilité en semences peut varier entre 0 et 100 %, et est par défaut fixé à 100 %. Le prix du riz paddy peut varier entre 50 et 200 F CFA le kg, la valeur par défaut étant de 100 F CFA le kg.

Les activités pastorales : un modèle « pushing »

Les troupeaux de bovins se déplacent suivant des pistes (*burti*) et sont reçus dans des zones de pâturage selon des droits fonciers traditionnels (les *leyde*, *cf.* Gallais, 1984 ; Marie, 1983). Les troupeaux se déplacent d'une zone vers une autre selon la saison et

quand le nombre de bovins dépasse leur capacité d'accueil, « les zones chassent les groupes ». Cette notion de capacité d'accueil des zones gouverne donc les déplacements des troupeaux.

Mécanismes de l'activité d'élevage

Dans ce module, la ressource est le pâturage et les acteurs sont les troupeaux de bœufs (élevage bovin exclusivement). Les troupeaux entrent dans le delta pendant la première décrue (de novembre à décembre) ; puis pendant les périodes de montée des eaux (de juillet à août), ils se retirent vers les zones extérieures au delta. Le déplacement des troupeaux à l'intérieur du delta se fait en fonction de la capacité de charge, mais dépend aussi du type de troupeaux ; on distingue les troupeaux « propriétaires » et « étrangers » (Marie, 1983 ; Gallais, 1984). En cas d'insuffisance en pâturage, les troupeaux propriétaires partent les premiers vers une nouvelle zone de pâturage. Les troupeaux étrangers suivent.

La capacité de charge est le nombre maximal de têtes de bétail qu'une zone peut accueillir et est calculée à chaque pas de temps pour chaque zone. Le pâturage se développe à la fois sur les surfaces exondées et inondées. La végétation de la surface inondée est constituée de trois types (Hiernaux *et al.*, 1983 ; Breman et de Ridder, 1991) : les vétiveraies, les oryzaies et les bourgoutières (*Echinochloa stagnina*, *Vossia cuspidata*). La disponibilité de ces pâtures dépend du maximum de la crue de l'année (fig. 2).

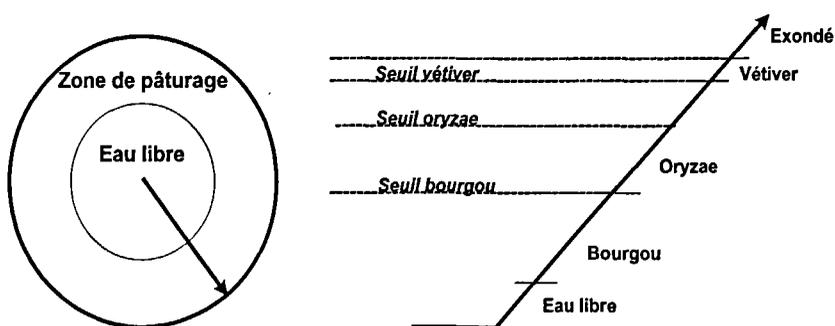


Figure 2
Seuils de pâtures dans un milieu hydrologique
en fonction de la hauteur d'eau.

La production des différents types de pâtures dépend du franchissement de la hauteur d'eau maximale des seuils de végétation. Les valeurs des différents seuils sont les suivantes : 3 m pour le bourgou, 1,5 m pour le riz et 0,6 m pour le vétiver (Wuillot, 1994). Si, par exemple, la hauteur d'eau maximale dépasse le seuil « oryzae », la production de bourgou et d'oryzae est assurée, tandis que la surface de vétiver se transforme en végétation de type exondé. Les interventions de l'homme dans la végétation naturelle (repiquage de bourgou, remplacement des bourgoutières par rizières) sont représentées par un indice « bourgoutières ». La capacité d'accueil est différente suivant le type de végétation (Bremner et de Ridder, 1991). Les espèces végétales des bourgoutières, par exemple, ont une capacité d'accueil presque cinq fois supérieures à la végétation de l'espace exondé.

La répartition du troupeau consiste à déplacer les troupeaux vers les zones d'accueil, en fonction de l'avancement des saisons, lorsque la qualité d'accueil de la zone se dégrade (moins de pâturage) ou lorsqu'il y a changement de saison. Les troupeaux sont déplacés d'une zone à une autre lorsque la capacité de charge de bétail calculée est inférieure à l'effectif des troupeaux présents. Pour chaque troupeau présent dans une zone, on choisit comme zone destination la zone parmi les zones d'accueil de la saison ayant la capacité de charge en bétail la plus grande.

L'étape de démographie consiste en une mise à jour des effectifs de troupeaux dans les zones d'élevage et dans les troupeaux en fonction du taux de croissance, et une mise à jour du coefficient de l'état sanitaire des troupeaux. Si la capacité d'accueil est supérieure au nombre de têtes présentes dans une zone, l'état sanitaire des troupeaux diminue de 30 %. Dans le cas inverse, l'abondance du pâturage assure une augmentation de l'état sanitaire de 40 %. A cette étape, une proportion de bétail (1 %) est vendue lorsque l'état sanitaire se dégrade (coefficient < 0,4).

Données sur l'élevage

Il y a 60 zones d'élevage à l'intérieur du delta. Pour chaque zone d'élevage, les proportions de type de végétation sont connues (Hiernaux *et al.*, 1983 ; Marie, 1983). Il y a 14 troupeaux dont la taille a été établie d'après le recensement du ministère du Développement rural et de l'Eau en 1992. L'indice *bourgoutière* fait varier la surface relative du bourgou par rapport aux autres types de végétation ; sa valeur varie entre 0,2 et 0,4 (valeur par

défaut de 0,2). L'indice *état sanitaire* est par défaut égale 1, une proportion du troupeau est vendue lorsque l'état sanitaire se dégrade ($< 0,4$). Enfin, l'indice *tendance à la vente* représente la proportion du troupeau vendue lorsque l'état sanitaire se dégrade.

Paramètres de comportement

Le paramètre « *comportement migratoire* » permet de simuler des restrictions aux migrations des différents groupes ; il représente la distance maximale qui peut exister entre l'endroit de rattachement d'un groupe et les zones où il peut aller travailler. Le paramètre « *comportement capitalistique* » sert à distinguer une situation dans laquelle la relation entre propension à travailler des groupes et le capital qu'ils ont accumulé, est négative (économie de subsistance) et une situation où elle serait positive (économie d'investissement).

Expériences de simulation

Impact d'un barrage à l'amont du delta

Développement des scénarios et hypothèses

Le barrage de Sélingué, mis en service en 1981, sur le Sankarani au Mali est actuellement le seul ouvrage capable de participer à la régulation des eaux. Avec une capacité de stockage de 2,17 milliards de m^3 , il soutient les étiages au-dessus de $100 m^3 s^{-1}$ à Koulikoro (Hassane *et al.*, 2000). Des barrages supplémentaires sur le haut bassin du fleuve Niger sont en projet.

En tenant compte de l'évaporation sur la retenue et en maintenant les prélèvements actuels des périmètres irrigués (Sélingué, Baguinéda, Office du Niger...), qui s'élèvent à 3 milliards de m^3 (Hassane *et al.*, 2000), nous avons fait l'hypothèse que ces projets se traduiront par un stockage entre juillet et décembre pendant la période de crue et donc un écrêtage de la crue, et un soutien de l'étiage de janvier à juin. L'impact de ces projets sur les hauteurs d'eau a été déterminé à partir de relations établies par régression multiple (Auvray, 1960 ; Brunet-Moret, 1986 ; Hassane *et al.*, 2000 ; Marieu *et al.*, 1998 ; Soumaguel, 1995).

Le tableau 1 spécifie les capacités de stockage retenues pour la réalisation des simulations. La valeur de l'indice de l'écrêtage est de 0,1 pour une capacité de stockage de 5 milliards de m³, 0,3 pour une capacité de stockage de 10 milliards de m³, et 0,4 pour une capacité de stockage de 15 milliards de m³, ce qui correspond respectivement à des variations de hauteur d'eau de 0,35 à 0,5 m pour une capacité de stockage de 5 milliards de m³, de 0,65 à 1,25 m pour une capacité de stockage de 10 milliards de m³, et de 0,8 à 2 m pour une capacité de stockage de 15 milliards de m³. Dans tous les cas, l'importance de la crue diminue. Les valeurs sont différentes pour le lac Débo, qui est un lac central toujours en eau, et le complexe Télé-Faguibine, qui est relativement éloigné du fleuve Niger. En effet, l'impact n'est pas identique pour chaque objet hydrologique : il dépend de sa localisation et de sa géométrie. Ainsi, nous avons divisé le delta en quatre parties :

- la zone Bani : pas d'impact ;
- la zone du Diaka et du Niger allant de Ké-Macina au lac Débo ;
- la zone de l'Issa Ber après le lac Débo ;
- la zone du Bara Issa allant de Awoye à Diré.

Tableau 1

Capacité du réservoir du barrage à l'amont du delta, définition du scénario 1.

Aménagements	Capacité de stockage milliards de m ³
sans Sélingué	0
Sélingué actuel	2,17
Sélingué rehaussé	5
Sélingué actuel + barrage à l'amont de Bamako sur le Niger	10
Sélingué rehaussé + barrage à l'amont de Bamako sur le Niger	15

Résultats

Le fonctionnement hydrologique antérieur à la construction du barrage de Sélingué a été simulé et comparé avec la situation actuelle (avec barrage, figure VII b, hors texte). On peut ainsi visualiser l'impact d'un aménagement sur les écoulements, mais également sur les systèmes de production. La colonne de gauche

(troisième courbe) montre l'écrtage de la crue ainsi qu'un soutien en étiage attribuable à la régulation du barrage de Sélingué (Hassane *et al.*, 2000). Dans la situation « avant Sélingué », la crue est plus précoce avec un impact direct sur la reproduction des poissons et les captures. Les revenus des pêcheurs et des agro-pêcheurs sont alors légèrement décalés dans le temps (colonne de gauche, première courbe et colonne de droite, quatrième courbe). L'agriculture semble moins concernée que la pêche : à cause d'une diminution de la surface inondée, la surface cultivée est légèrement supérieure dans la situation avant Sélingué avec des répercussions sur les revenus (colonne de droite, cinquième courbe).

Les résultats d'une simulation Midin avec un barrage de 10 milliards de m³ (en plus de Sélingué) montre l'écrtage de la crue ainsi qu'un soutien en étiage attribuable à la régulation du barrage. Cette écrtage réduit considérablement la surface inondée des plaines et des chenaux, comme le montre l'exemple la rivière de Koli Koli. L'agriculture est directement affectée avec une diminution de la surface cultivée, une diminution du nombre de familles travaillant dans l'agriculture et une baisse de revenus. En revanche, une atténuation de la crue et le soutien de l'étiage augmentent la disponibilité de poissons durant l'année et on voit une hausse de revenus des pêcheurs.

Impact d'un barrage à l'aval du delta

Développement des scénarios et hypothèses

Le barrage de Tossaye est actuellement en projet conçu pour la génération d'électricité, la promotion de la navigation et la mise en valeur des zones du Lac Faguibine, de la dépression du Gourma et de la vallée fossile du Tilemsi (Coyne et Bellier, 1997). Nous analysons ici uniquement son impact sur le delta intérieur du Niger en amont de Koryoumé, le port de Tombouctou. Contrairement à l'aménagement à l'amont du delta, la capacité de stockage du barrage à l'aval n'est pas un paramètre pertinent. La hauteur d'eau de la retenue influe sur les courbes de remous, qui ont pour effet d'augmenter les hauteurs d'eau dans le delta.

Nous avons retenu les quatre hypothèses suivantes pour la hauteur d'eau du réservoir (dite cote de « restitution ») : 254 m, 258,75 m, 259,75 m, 260 m (plus hautes-eaux). La cote 254 m est la cote minimale de la retenue – et il est d'ailleurs prévu dans la gestion

du barrage de Tossaye de rabattre le niveau de la retenue à ce niveau pendant la contre-saison sèche pour des raisons environnementales (Coyne et Bellier, 1997). Les cotes 258,75 m et 259,75 m sont des niveaux d'exploitation qui sont proposés et en discussion. La cote de 260 m n'est atteinte qu'en situation exceptionnelle (cote des plus hautes-eaux). Nous avons alors déterminé l'évolution du plan d'eau de la retenue en fonction de l'évaporation et de la pluie, des entrées et des lâchers. L'évaporation et la précipitation ont été obtenues de Coyne et Bellier (1997) et HydroConsult (1996). Les écoulements naturels à Tossaye, constituant les entrées, sont présentés dans le tableau 2. Le débit qui doit être restitué à l'aval est de $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ce débit permet d'éviter le tarissement total du fleuve à l'aval de Tossaye (Coyne et Bellier, 1997).

Tableau 2

Écoulements mensuels (en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) du fleuve Niger à Tossaye.

Années	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1924-1996	1 349	900	447	162	66,1	1 685	122	492	1 105	1 503	1 717	1 805
1970-1995	591	238	78,8	32,8	22	1 081	78,2	403	992	1 405	1 582	1 503
1993/94	273	102	60	40	40	696	102	322	896	1 260	1 360	1 170
1994/95	1 510	723	236	123	97,3	1 930	278	697	1 240	1 580	1 770	1 930

Source : HydroConsult (1996) ; Coyne et Bellier (1997).

Les calculs d'HydroConsult (1996) montrent que l'impact du barrage n'est guère perceptible en période de crue, quand les hauteurs d'eau sont importantes et les courbes de remous coïncident presque avec la pente naturelle de l'eau. L'impact est, en revanche, considérable si une cote élevée est maintenue pendant l'étiage, ce qui est d'ailleurs déconseillé dans le rapport de factibilité du barrage (Coyne et Bellier, 1997). La période de crue à Tossaye est décalée par rapport à l'entrée du delta et elle est plus longue (fig. 3). Nous fixons donc la période de crue entre août et février inclus et l'étiage entre mars et juillet inclus.

Nous faisons l'hypothèse d'une cote maximale de la retenue à la fin de la période de crue, le premier mars, pour calculer l'évolution du plan d'eau pendant l'étiage. Nous avons pris comme exemple l'année 1993/94, qui représente une année hydrologique déficitaire

(fig. 4). Le niveau le plus bas est atteint en août, mais cette date varie d'une année à l'autre en fonction de l'hydraulicité : une reprise précoce de la crue, par exemple, a pour conséquence d'avancer la date du niveau minimal de la retenue.

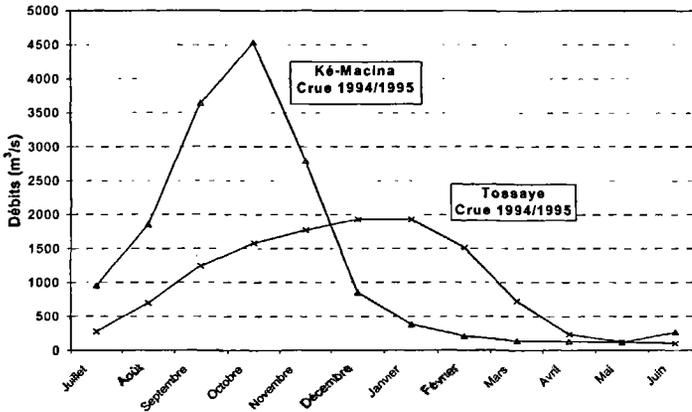


Figure 3
Les écoulements mensuels du fleuve Niger à Ké-Macina et à Tossaye, crue de 1994/95.

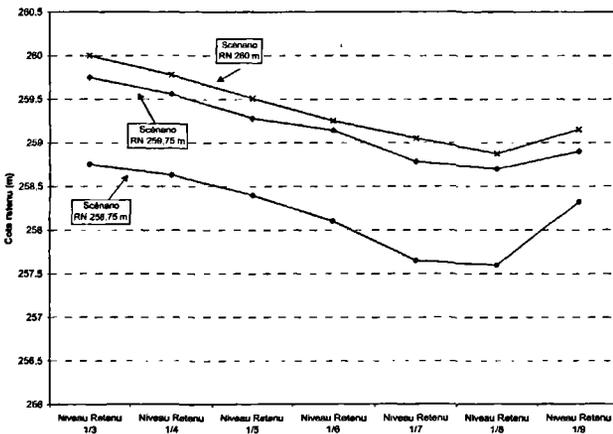


Figure 4
Simulation de l'évolution de la cote de retenue du barrage de Tossaye pendant l'étiage de 1994.

L'effet de la cote de retenue du barrage sur les hauteurs d'eau dans le delta peut être déterminé en utilisant les courbes de remous de HydroConsult (1996). Pour une cote de 254 m en étiage, il n'y a pas d'impact sur les hauteurs d'eau du delta. Une cote de 258,75 n'a guère d'impact non plus : la courbe de remous rejoint le régime naturel à l'amont de Koryoumé. En revanche, une cote de 259,75 m de la retenue aura un impact jusqu'à Diré, 400 km à l'amont du barrage, et donc sur la partie septentrionale du delta, le complexe Télé-Faguibine inclus. Une cote au-dessus de 260 m influence les hauteurs d'eau d'une façon significative à l'amont de la ville de Diré.

Résultats

Sur la base de l'analyse ci-dessus, nous avons intégré l'option d'un aménagement aval dans le module hydrologique avec l'option pour l'utilisateur de faire varier la cote de la retenue du barrage à l'amont du delta et de faire une comparaison avec la situation actuelle. Les résultats d'une simulation avec une cote de retenue de 260 m, en comparaison avec la situation actuelle sont présentés pour la plaine de Goyroum, situé dans le prolongement du Bara Issa en face de Diré, sur la figure VIII-a (hors texte).

L'impact de l'aménagement sur les hauteurs d'eau (colonne à gauche, première courbe) et, par conséquent, sur la surface inondée (colonne à gauche, deuxième courbe) en étiage est important. La durée des inondations est prolongée, modifiant l'écosystème de la partie aval du delta. En année humide (1994/95), il y a un impact négatif sur l'agriculture (colonne à droite, deuxième et quatrième courbe), car il y a simplement trop d'eau. En revanche, en année sèche, l'effet est plutôt positif. En ce qui concerne la pêche (colonne à droite, première et troisième courbe), on remarque un nivellement des captures le long de l'année avec un impact sur les revenus plutôt positif en année sèche (1993/94).

Impact de la capturabilité

Une étude plus détaillée de l'impact des paramètres de contrôle sur les systèmes de production est possible par une analyse de sensibilité, en faisant varier la valeur d'un des paramètres de contrôle. Les résultats d'une analyse de sensibilité avec l'indice de capturabilité, variant entre 40 et 400 kg par sortie de pêche, sont

présentés sur la figure VIII-b (hors texte). Cet indice augmente, par exemple, par une amélioration des engins de pêche.

L'impact d'une variation de la capturabilité sur les captures et donc sur les revenus (courbe en haut à droite) est très net, surtout en année sèche quand les captures sont plus faciles en raison d'une moindre dilution. En prenant des valeurs assez extrêmes, on montre un effet plateau des revenus de pêche : l'abondance de la ressource poisson devient un facteur limitant pour les captures. *A contrario*, l'impact sur l'activité de pêche est néant du fait que cet indice n'intervient pas dans la disponibilité et la répartition des pêcheurs dans le delta. A court terme, les pêcheurs continuent à pêcher même si leur rendement diminue.

Conclusion

La notion d'espace géographique dans la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger a été utilisée comme une interface pour comprendre, saisir et représenter la dynamique des processus de la production naturelle des ressources et les processus de leur exploitation. La géographie de la région naturelle est un bon moyen de restituer la complexité de l'écosystème, de comprendre la signification de chaque élément dans l'ensemble et de dialoguer avec les différents acteurs.

La *plausibilité* du modèle en termes de représentation spatio-temporelle des processus physiques et de comportement des acteurs du delta a été testée par des représentants des services techniques, des ministères, des universités et des ONG, pendant une « école d'hiver » (de Noray, 2000), et de façon plus informelle tout le long du développement du modèle. Les critiques émises par ces différentes personnes ont concerné l'interface du modèle, la sensibilité des paramètres et le degré de complexité des mécanismes du modèle, mais jamais la validité de la représentation spatiale (choix des objets et de leurs attributs), le choix des processus, des mécanismes, et du pas de temps (quinzaine).

Les *analyses de sensibilité* permettent d'isoler l'impact des différents paramètres de contrôle sur les productions de pêche, d'élevage et d'agriculture et d'identifier les paramètres

déterminants. L'identification de ces paramètres permet de réorienter la recherche thématique (investigation des facteurs limitants de la production) et offre la possibilité de cibler les actions de développement (enlever les contraintes de production). Une prochaine étape consistera à formaliser les relations d'interdépendance entre les différents mécanismes. La formalisation et la modélisation des interactions entre les différents mécanismes constituent un champ de recherche intéressant dans l'étude des systèmes complexes. En termes de modélisation, cette orientation entraîne des risques de multiplication d'erreurs et de robustesse des mécanismes.

Remerciements

Nous tenons à remercier les participants de l'école d'hiver, qui s'est tenue à Bamako en février 2000, pour leurs remarques critiques et constructives sur le modèle du delta intérieur du Niger.

Bibliographie

- Auvray C., 1960 – *Monographie du Niger, B : la cuvette lacustre*. Paris, Orstom, 116 p.
- Baumann E., Fay C., Kassibo B., 1994 – « Systèmes de production et d'activité : trois études régionales ». In Quensière J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 255-265.
- Blöschl G., Sivapalan M., 1995 – Scale issues in hydrological modeling : a review. *J. Hydrological Processes*, 9 (3-4) : 157-166.
- Boyer J.-F., Cochonneau G., Dieulin-Picart C. 1994 – *HYDROM 3.1, gestion et traitement de données hydrométriques*. Doc. Orstom, Laboratoire d'hydrologie, Montpellier, France : 75 p.
- Breman H., Ridder N. (de), 1991 – *Manuel sur les pâturages des pays sahéliens*. ACCT/CABO-DLO/CTA, Wageningen, Pays-Bas; Paris, Karthala, 485 p.
- Breuil C., Quensière J., 1995 – *Éléments d'une politique de développement durable des pêches et de la pisciculture au Mali*. Doc. FAO, ONU, Rome.
- 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.
- Coyne et Bellier, 1997 – *Rapport de factibilité du scénario de développement de la boucle du Niger*. Paris, Coyne et Bellier, 3 volumes : 1200 p.

- Gallais J., 1984 – *Hommes du Sahel, espaces-temps et pouvoirs, le delta intérieur du Niger, 1960-1980*. Paris, Flammarion, 289 p.
- Hassane A., Kuper M., Orange D., 2000 – Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali. *Sud Sciences et Technologies*, 5 : 16-31.
- Hiernaux 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.
- HydroConsult, 1996 – *Etude de factibilité et d'impact du barrage de Tossaye*. Doc. GIE Orstom-EDF, Paris, deux volumes.
- Jaccon G., 1986 – *Manuel d'hydrométrie, tome 5 : tracé de la courbe de tarage et calcul des débits*. Doc. Orstom, Paris : 80 p.
- Kuper M., Orange D., Mullon 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.
- Kuper M., Maïga H., 2000 – *Commercialisation du riz traditionnel dans le delta intérieur du Niger au Mali*. Etudes et rapports Gihrex, ER52, IRD, Bamako, Mali, 39 p.
- Laë R., 1994 – « Modifications des apports en eau et impact sur les captures de poisson ». In Quensière J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 255-265.
- Laurec A., Le Guen J.-C., 1981 – *Dynamique des populations marines exploitées*. Rapp. scientifiques et techniques, Centre océanologique de Bretagne, Brest, France, n° 45.
- Marie J., 1983 – *Recherche d'une solution aux problèmes de l'élevage dans le delta intérieur du Niger au Mali, rapport de synthèse*. Doc. Cipéa, Addis-Abeba, Ethiopie, vol. 5.
- 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.
- Morand P., Bousquet F., 1994 – « Modélisation de la ressource. Relations entre l'effort de pêche, la dynamique du peuplement ichtyologique et le niveau des captures dans un système fleuve-plaine ». In Quensière J. (éd.) : 267-281.
- Noray M.-L. (de), 2000 – *Rapport d'expertise pour Gihrex-IRD : session d'échange et de formation autour de la maquette MIDIN*. Etudes et rapports Gihrex, ER57, IRD, Bamako, Mali, 36 p.
- 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.
- Poncet Y., Kuper M., Mullon C., Morand P., Orange D., 2001 – « Représenter l'espace pour structurer le temps : la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger

- au Mali ». In Lardon S., Maurel P., Piveteau V. (éd.) : *Représentations spatiales et développement territorial*, Paris, Hermes, chapitre 7 : 143-162 et planches IV-V.
- 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.
- Quensière J. (éd.), 1994 – *La pêche dans le delta central du Niger*. Paris, IER-Orstom-Karthala, 2 volumes, 495 p.
- Soumaguel A., 1995 – *Influence du barrage de Sélingué sur le régime hydrologique du Niger*. Mémoire de fin d'études, Centre Agrhymet, Niamey, Niger.
- Viguié P., 1937 – *Riziculture indigène au Soudan français*. AOF, Paris, 3 tomes.
- Wuillot J., 1994 – « Les phytocénoses aquatiques ». In Quensière J. (éd.) : *La pêche dans le delta central du Niger*, Paris, IER-Orstom-Karthala : 85-95.