

Modélisation intégrée d'un écosystème exploité

Le delta intérieur du Niger au Mali

Fonds Documentaire IRD
Cote : B* 25931 Ex : 1

Marcel KUPER*, Christian MULLON**, Yvelyne PONCET**, Pierre MORAND**,
Didier ORANGE**, Elisabeth BENGAT**

*Cirad-Tera, TA 60/15 73, avenue Jean-François Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France

** Ird, Institut de recherche pour le développement, Montpellier, France

*** Esp, Ecole supérieure polytechnique, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Résumé — Modélisation intégrée d'un écosystème exploité : le delta intérieur du Niger au Mali.

On présente ici un modèle intégré de l'écosystème du delta intérieur du Niger au Mali ; ce modèle représente conjointement les systèmes physiques, biologiques et anthropiques de manière à anticiper leur dynamique ; il vise à expliciter, à discuter des stratégies de gestion du delta à partir d'hypothèses diverses sur la régénération des ressources naturelles et sur leur exploitation. Il a été développé dans le cadre d'un projet de recherche de l'institut de recherche pour le développement (Ird), dès son début, et a été utilisé pour orienter les recherches thématiques, intégrer des connaissances pluridisciplinaires, obtenir une meilleure cohésion de l'équipe et amorcer un dialogue autour de la gestion intégrée du delta intérieur du Niger. Les utilisations possibles de ce modèle sont illustrées avec une analyse de l'impact des aménagements hydrauliques et agricoles, actuellement en projet en Guinée et au Mali, sur les systèmes de production du delta, et avec une analyse des effets d'un changement des techniques de pêche sur l'activité et les revenus des pêcheurs. Enfin, la question de la validité des résultats d'une modélisation intégrée est discutée et quelques propositions de recherche future sont envisagées.

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. Ce système est intermédiaire entre des systèmes quasi-naturels (bassin de l'Amazonie) 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 tout 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 (Mdre, 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 t/ha selon les services nationaux. La production de pêche dépasse 100 000 t les années de bonne crue (Breuil et Quensièrre, 1995).



L'Ird conduit un programme de recherche intitulé Gihrex dont l'objectif est la compréhension de la dynamique naturelle du delta, la connaissance de ses modes d'exploitation par l'homme et l'analyse de leur durabilité. En fait, il s'agit de faire reconnaître le delta dans son ensemble comme une unité de gestion en essayant d'anticiper ses évolutions futures : 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 ;
- l'administration communale ?

La modélisation est, dans ce programme, 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 objectifs de l'opération de modélisation sont, tout à la fois, la description du système, l'analyse et la compréhension de son fonctionnement, la simulation de son évolution.

Modélisation intégrée

Le développement du modèle d'un écosystème exploité, compte tenu de la diversité des processus à représenter, de la multiplicité des échelles et des niveaux d'organisation, demande un effort de recherche spécifique ; il faut utiliser et développer les outils existants ; il faut en développer de spécifiques ; il faut conjointement réfléchir à une méthodologie de leur intégration.

Pour illustrer les principes méthodologiques suivis ici, rappelons qu'il s'agit principalement de savoir comment formaliser des systèmes physiques, biologiques et anthropiques de manière à anticiper leur dynamique pour aborder cette question, nous proposons un cheminement en cinq étapes (Kuper, 1997 ; Strosser, 1997) :

- définir les mécanismes en interaction dans l'écosystème considéré ;
- définir les relations d'échelle de temps et d'espace, inter et intra (Blöschl et Sivapalan, 1995) ;
- faire les choix de construction pour chaque mécanisme ;
- tester la stabilité numérique de la somme des constructions ;
- effectuer les calages, les validations, les tests de robustesse.

Lors de chacune de ces cinq étapes, nous insistons sur la nécessité de garder en tête que la faisabilité de l'opération n'est pas résolue d'avance : peut-on vraiment représenter (formaliser, modéliser) l'écosystème ? quelle sera la validité des résultats obtenus ?

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 dû :

- à la bonne connaissance antérieure de ce système (Brunet-Moret et al., 1986 ; Gallais, 1984 ; Quensièrre, 1994 ; Olivry, 1995) ;
- à l'échelle large retenue : celle de tout le delta ;
- à la perspective de gestion ;
- 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 ou d'une analyse intégrée dont le caractère est itératif : le modèle doit permettre de mieux expliciter et détailler les questions pertinentes de gestion (Dzeakou et al., 1998 ; 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 en mai 1999, juillet 1999, février 1999 (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 (figure 1).

Elle joue un rôle fédérateur et stimulateur des différentes disciplines scientifiques. Impliqués ensemble dans la construction du modèle intégré, modélisateurs et thématiciens ont besoin d'informations au fur et à mesure de leurs avancées, ce qui a pour conséquence d'orienter les recherches.

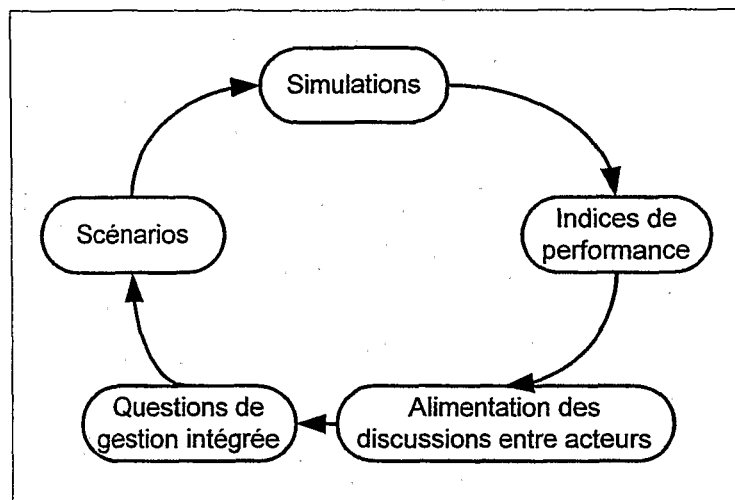


Figure 1. Rôle moteur de circulation de l'information d'une maquette de modélisation intégrée.

Echelles, entités, principes de modélisation

La structure du modèle a été conçue en fonction de la nécessité d'intégrer des connaissances en provenance des disciplines suivantes : hydrologie, climatologie, hydrobiologie, hydrochimie, géographie, agronomie et sciences de l'information.

Echelles

Il a été décidé de choisir une extension et une échelle spatiale communes à tous les processus, puis, dans cet espace, de représenter 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 sont les unités hydrologiques (plaines, lacs ou chenaux), les groupes de pêcheurs, d'agriculteurs et d'agro-pêcheurs, les troupeaux, les 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 3 ans.

Entités hydrologiques

Trois types d'entités spatiales ont été définies, qui sont à la fois hydrologiques, géographiques et géométriques (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, 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 (figure 2). Ce sont au sens propre les clés de l'organisation des données et de l'application des mécanismes qui nourrissent le modèle.

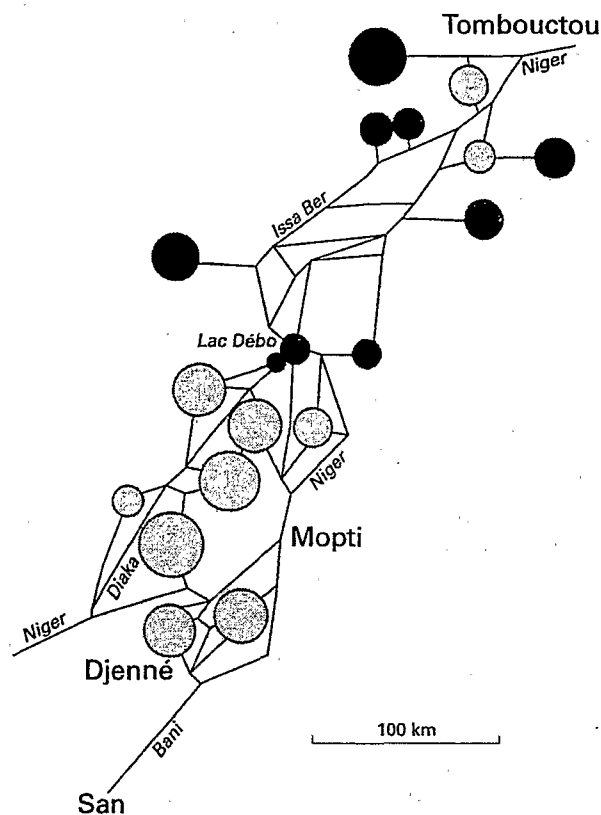


Figure 2. Les entités hydrologiques : chenaux, connexions, plaines et lacs.

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.

Entités spatiales

Les entités spatiales sont des zones d'exploitation :

- zones agricoles ;
- zones de pêche ;
- zones d'élevage.

Chacune est rattachée à un objet hydrologique.

Unités d'exploitations

Les autres entités représentées dans le modèle sont des groupes d'exploitants¹ (pêcheurs, agriculteurs, éleveurs) qui sont rattachés à leur zone d'origine, mais qui peuvent également aller dans d'autres zones d'exploitation (principe de mobilité). Cette exploitation est déterminée dans le delta par des conventions traditionnelles (cf. Baumann *et al.*, 1994), par exemple des liens de parenté (principe de connectivité).

Un modèle spatial

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 intérieur comme région naturelle a été défini géographiquement par le périmètre de l'inondation fluviale

1. Dans le delta, il existe environ 200 000 ménages, qui participent souvent à plusieurs activités professionnelles (pêche, agriculture, élevage). Ces ménages prennent des décisions concernant le choix d'activité (agriculture, pêche, élevage ou autre), 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.

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 ;
- hydrologique ;
- 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 bon 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 restitution des résultats sous la forme de cartes et de données localisées.

Un modèle de comportement

Ce ne sont pas les stratégies, 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. Le modèle représente 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 et stable, peut 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 impliquent forcément des évolutions dans les comportements.

Mécanismes

Les mécanismes représentés dans la modélisation du delta intérieur du Niger au Mali sont détaillés dans le tableau I.

Tableau I. Mécanismes représentés dans la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali.

Champ	Mécanisme	Paramètres de contrôle
Hydrologie	Crue, inondations	Hauteur de crue Aménagement en amont Aménagement en aval
Hydrobiologie	Génération et diffusion des poissons	Fertilité Diffusion
Systèmes de production	Activités halieutiques	Comportement migratoire Comportement capitalistique
	Activités agricoles	Comportement migratoire Comportement capitalistique
	Activités pastorales ²	Comportement migratoire
	Production halieutique	Capturabilité Prix du poisson
	Production agricole	Productivité Prix du riz
	Production bovine	Disponibilité en semences Qualité de pâturage
		Importance de l'état sanitaire
		Tendance à la vente

2. Un comportement capitalistique n'est pas envisageable dans le modèle actuel du fait que les éleveurs ne sont (pas encore) représentés.

Hydrologie

Les hauteurs d'eau sont données ; elles ont été calculées pour tous les objets hydrologiques à tous les pas de temps à partir des observations hydrologiques pendant les années 1993-1994-1995 (Auvray, 1960 ; Brunet-Moret et al., 1986 ; Boyer et al., 1994 ; Marieu et al., 1998 ; Kuper et al., 2000b). En utilisant un modèle de réservoir, la connaissance des hauteurs d'eau permet de calculer les surfaces inondées à chaque pas de temps. Les simulations sont basées sur la crue de 1993-1994 (qualifiée de mauvaise crue), celle de 1994-1995 (qualifiée de bonne crue), et celle de 1995-1996 qui est qualifiée de crue moyenne.

Hydrobiologie

Ce module est basé sur le travail de Morand et Bousquet (1994) et représente la dynamique de génération et de diffusion de la quantité de poisson dans le temps et dans l'espace.

Systèmes de production

Le système de production est représenté 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 3). 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 des liens avec de nombreuses zones exploitables. 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 (cf. module hydrobiologique). Les mécanismes représentés sont les suivants :

- calcul des besoins en main-d'œuvre des zones de pêche. Les capacités de pêche ont été estimées à partir des résultats de l'enquête de cadrage du programme Dcn (Quensière, 1994).
- calcul de la disponibilité de la main-d'œuvre de pêcheurs
- répartition ou déplacement des pêcheurs dans les zones de pêche.

Pour chaque zone de pêche, l'activité de pêche aboutit à des captures, en fonction de la capturabilité (Laurec et Le Guen, 1981). Les captures sont ensuite multipliées par le prix du poisson pour obtenir les revenus des pêcheurs

Mécanismes de la production agricole

Les acteurs du module d'agriculture sont les agriculteurs et les agro-pêcheurs, et la ressource est la terre 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 les opportunités de culture (fonction de la fertilité et de la surface inondée) dans leurs zones d'intervention. 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 (Viguié, 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 du degré de connectivité des zones (liens traditionnels entre agriculteurs et les zones de production). Les

mécanismes sont les suivants :

- calcul des besoins en main-d'œuvre dans les zones agricoles. Le calendrier des activités et la charge de travail sont basés sur les travaux de Gallais (1984) et Kelly *et al.* (1998) ;
- calcul de la disponibilité de la main-d'œuvre des groupes d'agriculteurs et d'agro-pêcheurs ;
- répartition de la main-d'œuvre agricole ;
- répartition ou déplacement des pêcheurs dans les zones de pêche.

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 en fonction du prix du riz.

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*, (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.

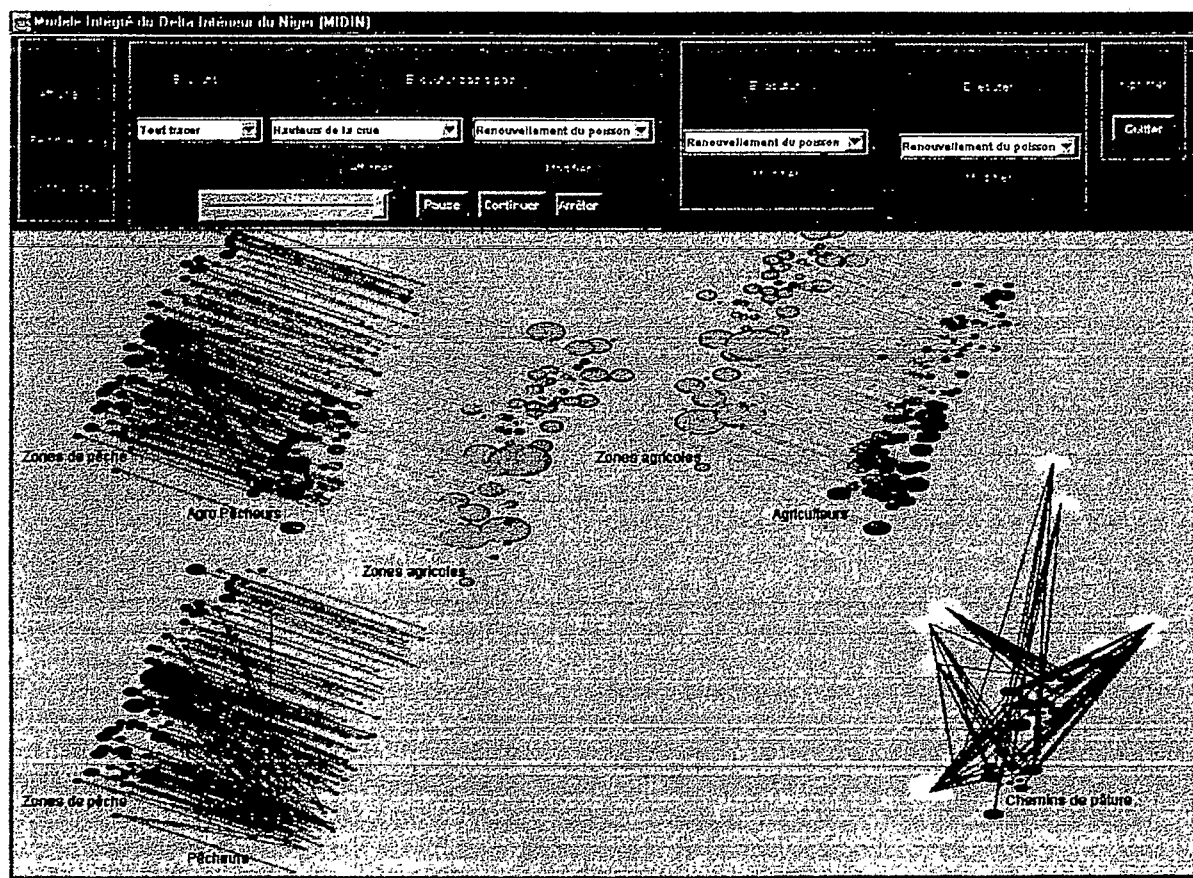


Figure 3. Connexions entre les groupes de producteurs et les zones exploitables dans le delta intérieur du Niger.

Mécanismes de l'activité d'élevage

Dans ce module, l'élevage est un système de production où la ressource est le pâturage et dont les acteurs sont les troupeaux de bœufs (élevage bovin exclusivement). On considère que les troupeaux entrent dans le delta pendant la première décrue (de novembre à décembre) puis, que pendant les périodes de montée des eaux et de hautes eaux (de juillet à août, puis de septembre à octobre), ils se retirent des zones inondées vers les zones extérieures au delta.

Le déplacement des troupeaux à l'intérieur du delta se fait en fonction de la disponibilité en pâturage (capacité de charge de fourrage), de la qualité de l'accueil de la zone de pâturage (capacité d'accueil maximale, disponibilité en eau), mais aussi en fonction du type des troupeaux ; on distingue les troupeaux « propriétaires » et « étrangers ». En cas d'insuffisance en eau et en pâturage, les troupeaux propriétaires partent les premiers vers une nouvelle zone de pâturage. Les troupeaux étrangers suivent après. L'insuffisance en pâturage et en eau pour le bétail peut détériorer l'état sanitaire du bétail, ce qui conduit à la vente. Les mécanismes sont les suivants :

- calcul de la capacité de charge pour chaque zone d'élevage ; la disponibilité de ces pâtures dépend de la hauteur maximale de la crue de l'année (Hiernaux et al., 1983 ; Breman et de Ridder, 1991 ; Wuillot, 1994) ;
- répartition du troupeau 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 ;
- calcul de la démographie du bétail, en fonction de l'état sanitaire des troupeaux.

Expériences de simulation

Aménagements

Le modèle³ permet de simuler l'impact d'aménagements hydroagricoles sur les écoulements et les systèmes de production dans le delta (option comparaison). Il s'agit de deux projets d'aménagement différents (figure 4) :

- implantation d'un aménagement hydroagricole à l'amont du delta, par exemple les barrages (en projet) de Fomi (Guinée) et Talo (Mali) ;
- implantation d'un aménagement hydroagricole à l'aval du delta, par exemple le 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.

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 mètres cubes, il soutient les étiages au-dessus de 100 m³/s à Koulikoro (Kuper et al., 2000a). Un rehaussement du barrage de Sélingué et un barrage supplémentaire à l'amont de Bamako sur le Niger ou sur un de ses tributaires 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, Orm/Ors), qui s'élèvent à 3 milliards de mètres cubes (Kuper et al., 2000a), nous avons fait l'hypothèse que ce projet se traduira par un stockage entre juillet et décembre pendant la période de crue et un soutien de l'étiage de janvier à juin. Il s'agit donc d'un écrêtage de la crue, que l'on a quantifié selon les modalités présentées sur le tableau II. On a déterminé l'impact de ces interventions sur les hauteurs d'eau en quelques points clés, coïncidant avec des stations limnimétriques, sur le Niger supérieur (Banankoro, Sélingué, Koulikoro) et dans le delta intérieur du Niger (Ké-Macina, Tilembeya/Kara, Mopti, Aka, Awoye, Korientzé, Diré, Goundam) à partir de relations établies par régression multiple (Auvray, 1960 ; Brunet-Moret, 1986 ; Hassane et al., 2000 ; Marieu et al., 1998 ; Soumaguel, 1995 ; Kuper et al., 2000b). Une fois ces relations établies, on a rattaché tous les objets hydrologiques aux points clés cités. Cela permet de calculer cet écrêtage.

3. Le modèle intégré du delta intérieur du Niger est accessible via Internet à l'adresse suivante : <http://www.orleans.ird.fr/~benga/MIDIN.html>.

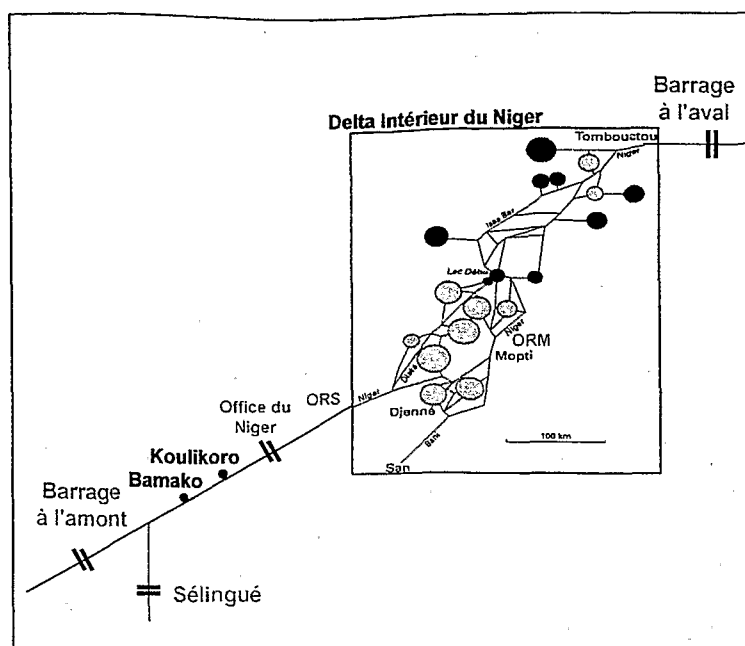


Figure 4. Schématisation des aménagements à l'amont et à l'aval du delta intérieur du Niger au Mali (échelle non respectée). Les deux traits indiquent les barrages (existants et en projet) et les surfaces grisées les périmètres agricoles qui prélèvent 3 milliards de mètres cubes par an.

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

Aménagements	Capacité de stockage milliards de mètres cubes
Sans Sélingué	0
Sélingué actuel	2,17
Sélingué rehaussé	5
Sélingué actuel + construction barrage à l'amont de Bamako sur le Niger	10
Sélingué rehaussé + construction barrage à l'amont de Bamako sur le Niger	15

Résultats

En jouant sur le paramètre Barrage à l'amont, nous pouvons simuler le comportement du delta avec et sans barrage à Sélingué et comparer les résultats des deux simulations présentées sur la figure 5.

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) de la figure 5 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 donc légèrement décalés dans le temps (colonne de gauche, première courbe et colonne de droite, quatrième courbe). L'effet de Sélingué sur les captures semble donc limité : Laë (1994) estime que pour l'ensemble du delta, la perte de la production halieutique à cause de Sélingué s'élève à 2 000 tonnes, soit seulement 2 à 5 % des captures annuelles. L'agriculture est encore moins concernée que la pêche. A 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). La figure 6 montre les résultats d'une simulation de la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger avec un barrage de 10 milliards de mètres cubes (en plus de Sélingué).

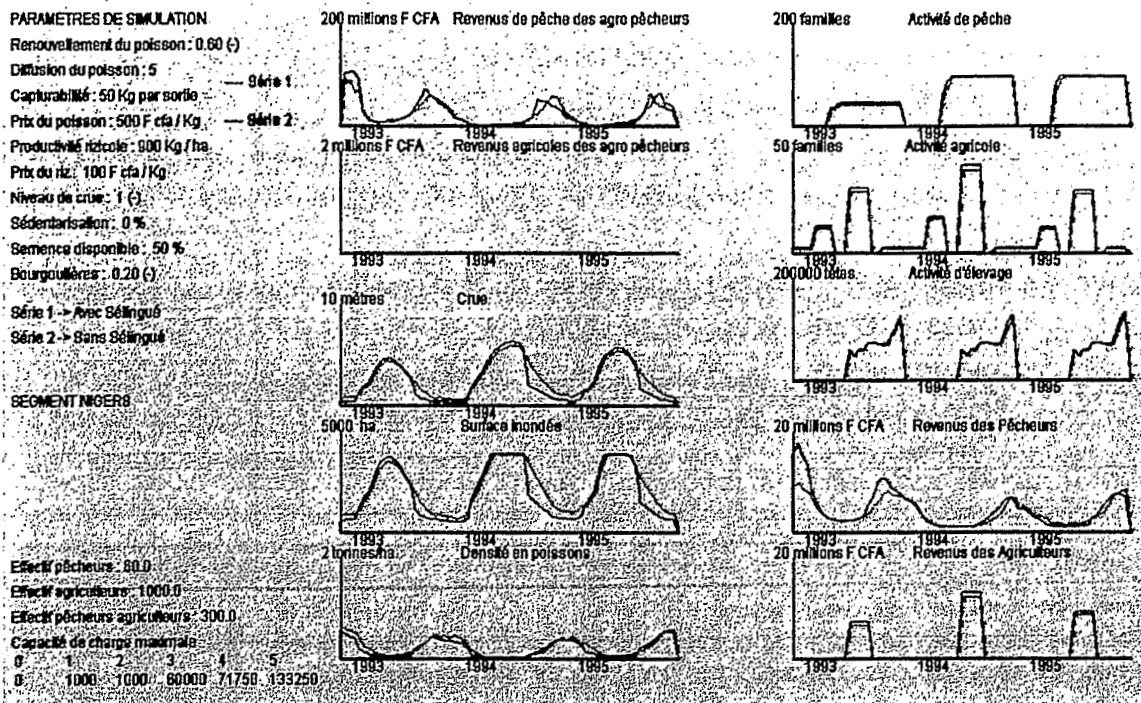


Figure 5. Simulation des écoulements dans le delta intérieur du Niger sans et avec Sélingué et l'impact sur les activités de pêche et d'agriculture, et sur les revenus des producteurs.

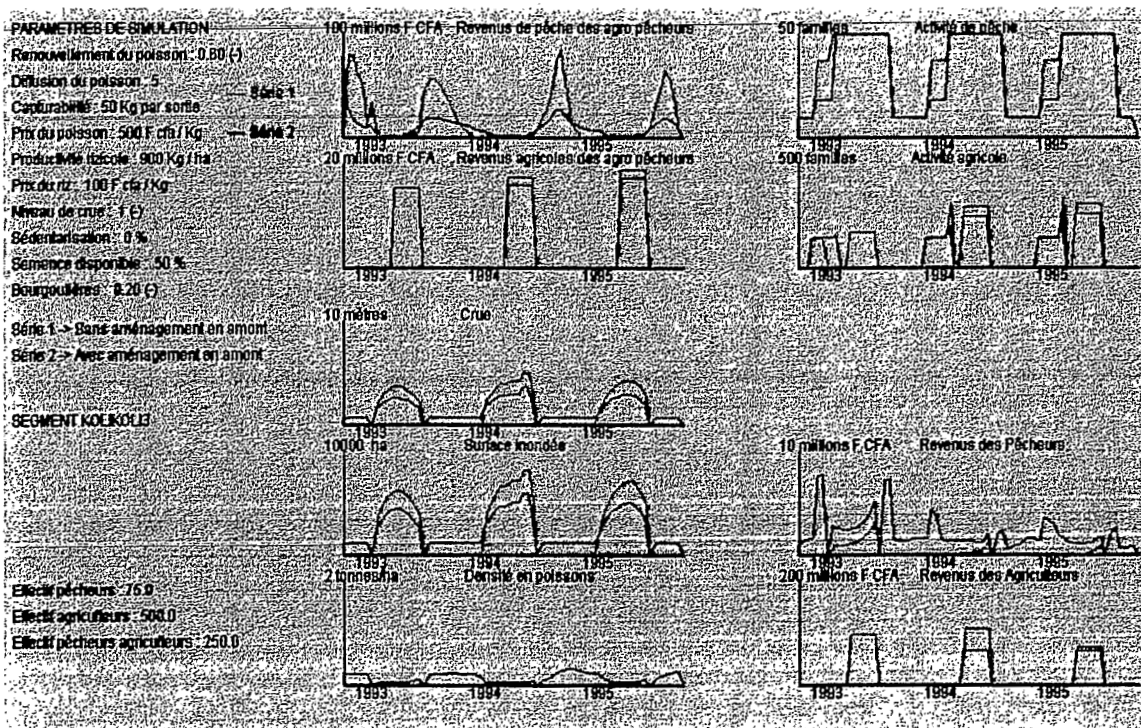


Figure 6. Impact de l'installation d'un barrage à l'amont du delta avec une capacité de stockage de 10 milliards de mètres cubes par rapport à la situation actuelle. Exemple du Koli Koli.

La colonne de gauche (troisième courbe) de la figure 6 montre l'écrtage de la crue ainsi qu'un soutien en étiage attribuable à la régulation du barrage. Cette écrétage réduit considérablement la surface inondée des plaines et des chenaux (quatrième courbe, colonne à gauche), 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 (colonne à droite, deuxième courbe) et une baisse de revenus (colonne à gauche, deuxième courbe et colonne à droite, quatrième courbe). 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 (colonne à droite, troisième courbe).

Impact du niveau de la crue

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. Dans la figure 7 les résultats d'une analyse de sensibilité sont présentés. On a fait varier l'indice de capturabilité entre 0 et 400 kg/sortie de pêche. L'augmentation de la valeur de cet indice peut être attribué à une amélioration des engins de pêche.

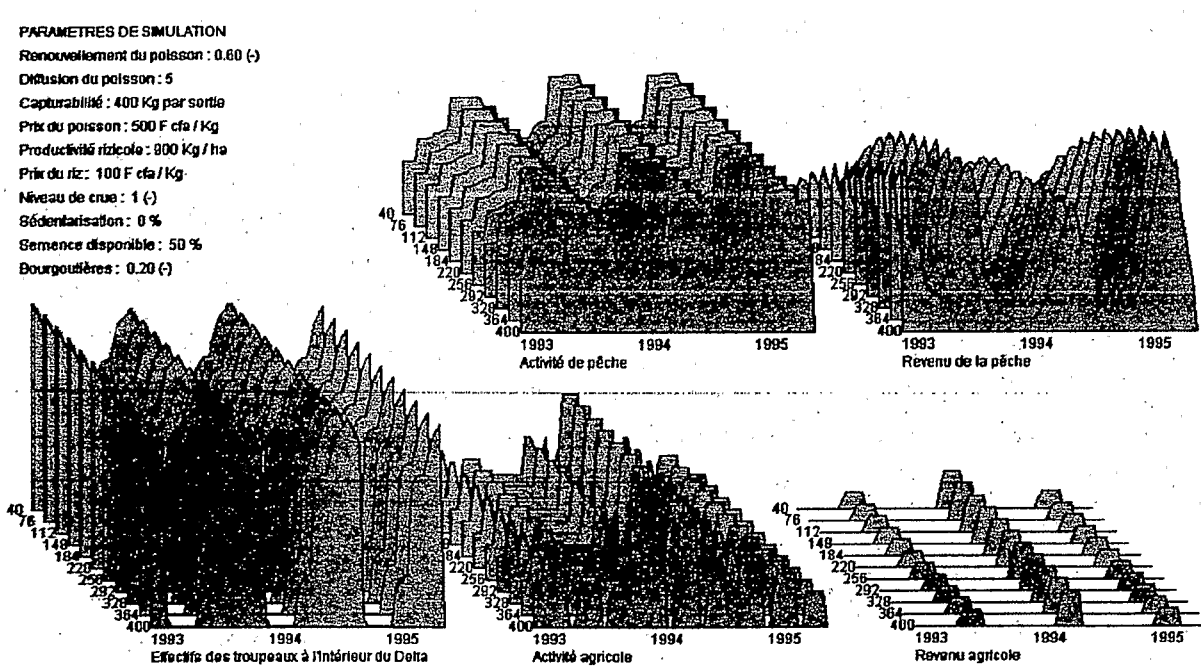


Figure 7. Résultats de simulation d'une analyse de sensibilité de la capturabilité sur les activités et les revenus de pêche.

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 pour cette capturabilité, 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 nul du fait que cet indice n'intervient pas dans la disponibilité et la répartition des pêcheurs dans le delta. Les pêcheurs continuent à pêcher même si leur rendement diminue.

Dans l'état actuel du modèle, un changement de la valeur d'un paramètre de contrôle tel que le niveau de la crue ne modifie pas la valeur d'autres paramètres de contrôle tels que la capturabilité. Une prochaine étape dans le développement de la modélisation intégrée sera d'étudier l'interdépendance des différents mécanismes et de formaliser et modéliser cette transivité.

Justification

Quelle est la validité de ces simulations ? Nous préférons parler de justification. Le terme de validation ayant un sens bien défini en matière de modélisation et qui ne s'applique pas ici.

La réponse à ces questions peut être évaluée par trois critères (Kuper, 1997).

- La plausibilité du modèle en termes de représentation spatio-temporelle des processus physiques et de comportement des acteurs du delta. Cette plausibilité a été testée par des représentants des services techniques, des ministères, des universités et des Ong, pendant une formation de modélisation intégrée du delta intérieur du Niger (de Noray, 2000), et de façon plus informelle tout le long du développement du modèle par des scientifiques et des représentants des services techniques. 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 dans le développement du modèle consistera à formaliser les relations d'interdépendance entre les différents mécanismes.
- La reproduction d'un événement du passé et la vérification des résultats de simulation par rapport à la réalité. En simulant les écoulements dans le delta avant l'installation du barrage de Sélingué, on a pu comparer l'impact sur les activités et les revenus agricoles et de pêche avec la situation actuelle. On a vérifié l'impact hydrologique par des analyses hydrologiques de la hauteur d'eau (Hassane et al., 2000). Cependant, il reste à comparer des données d'inondation et des productions de pêche, d'agriculture et d'élevage avec des données réelles (e.g. par télédétection) ou des résultats de modèles thématiques (Laë, 1994 ; Olivry, 1995).

La modélisation intégrée du delta intérieur du Niger a pu répondre à ces questions grâce aux connaissances disponibles concernant le fonctionnement du delta, au choix de l'échelle du système (l'ensemble du delta), à la perspective de gestion, et aux choix d'architecture informatique, basée sur l'imbrication de couches correspondant aux niveaux d'organisation et à des objets réels.

Perspectives

Cependant, il reste du chemin à faire dans le développement, l'utilisation et la validation de la modélisation intégrée pour lesquels on peut dégager un certain nombre de pistes.

- Développement : 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.
- Utilisation : il est envisagé de développer un module d'enseignement « modélisation intégrée » avec comme cas d'étude l'écosystème du delta intérieur du Niger. Lors du séminaire international sur la « Gestion des ressources naturelles en zones inondables » en juin 2000 à Bamako, l'Unesco a d'ailleurs annoncé la création d'une chaire en Environnement, avec comme objet d'étude le delta intérieur du Niger, pour valoriser les travaux de recherche menés. Le module « modélisation intégrée » en fera partie. Dans un autre registre, il est intéressant également de tester la contribution de la modélisation intégrée dans le cadre d'un des grands projets d'aménagements du fleuve Niger (extension de l'Office du Niger, barrages de Fomi, Talo, Tossaye).
- Validation : il est impératif d'aller plus loin dans la vérification de la modélisation intégrée du delta intérieur du Niger selon les trois critères proposés ci-dessus.

Bibliographie

- AUVRAY C., 1960. Monographie du Niger, tome B – La cuvette lacustre. Paris, France, Orstom.
- BAUMANN E., FAY C., et KASSIBO B., 1994. Systèmes de production et d'activité : trois études régionales. In : Quensièrre J. (éd.). La pêche dans le delta central du Niger. Volume 1.
- BLÖSCHL G., SIVAPALAN M., 1995. Scale issues in hydrological modeling : a review. J. of Hydrological Processes, Vol. 9, Issues 3-4.
- BOYER J.F., COCHONNEAU G., DIEULIN-PICART C., 1994. HYDROM 3.1, Gestion et traitement de données hydrométriques. ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, Montpellier, France.
- BREMAN H., DE RIDDER N., 1991. Manuel sur les pâturages des pays sahéliens. Wageningen, Pays-Bas, Karthala, Acct, Cabo-Dlo, Cta.
- BREUIL C., QUENSIÈRE J., 1995. Eléments d'une politique de développement durable des pêches et de la pisciculture au Mali. Rome, Italie, Onu.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986. Monographie du Niger. 2 tomes. Paris, France, Orstom.
- DZEAKOU P., KUPER M., MORAND P., MULLON C., PONCET Y., 1998. Modélisation intégrée du delta intérieur du Niger: Développement d'une maquette du modèle intégré. Bamako, Mali, Ird.
- GALLAIS J., 1984. Hommes du Sahel, espaces-temps et pouvoirs, le delta intérieur du Niger, 1960-1980. Paris, France, 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 n° 4.
- 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 I. Les pâturages de la zone d'étude. Addis Abeba, Ethiopie, Cipea.
- KELLY S., KUPER M., MARIEU B., 1998. Delta intérieur du Niger. Rapport de mission du 10 au 23 novembre 1998. Bamako, Mali, Ird/Ier.
- KUPER M., 1997. Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control. Thèse de doctorat. Pays-Bas, Université agronomique de Wageningen.
- KUPER M., MULLON C., PONCET Y., ORANGE D., MORAND P., 1999. Modélisation intégrée d'un écosystème inondé et gestion des eaux : le cas du delta intérieur du Niger au Mali. Actes des journées scientifiques Friend-Aoc – Zth – Aah. (Séminaire sur les Ressources en eau de l'Afrique Occidentale et centrale). Yaoundé, Cameroun, 30 novembre – 2 décembre 1999. Edn Unesco.
- KUPER M., MAÏGA H., 2000. Commercialisation du riz traditionnel dans le delta intérieur du Niger au Mali. Rapports techniques et scientifiques, Etudes n°13. Laboratoire des eaux continentales. Bamako, Mali, Ird.
- KUPER M., HASSANE A., ORANGE D., CHOHIN-KUPER A., SOW M., 2000a. Régulation, utilisation et partage des eaux du fleuve Niger : l'impact de la gestion des aménagements hydrauliques sur l'Office du Niger et le delta intérieur du Niger au Mali. Séminaire international sur la « Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales », Bamako, Mali.
- KUPER M., MULLON C., PONCET Y., MORAND P., ORANGE D., ARFI R., MAHÉ G., BENGHA E., 2000b. Modélisation intégrée d'un écosystème inondable : le delta intérieur du Niger au Mali. Séminaire international sur la « Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales », Bamako, Mali.
- LAË R., 1994. Modification des apports en eau et impact sur les captures de poisson. In : Quensièrre J. (ed.). 1994. La pêche dans le delta central du Niger. Volume 1 et 2. Paris, France, Ier-Orstom-Karthala.
- LAUREC A., LE GUEN J.C., 1981. Dynamique des populations marines exploitées. Rapports Scientifiques et Techniques n° 45. France, Centre océanologique de Bretagne.

MARIE J., 1983. Recherche d'une solution aux problèmes de l'élevage dans le delta intérieur du Niger au Mali. Volume V, rapport de synthèse. Addis Abeba, Ethiopie, Cipea.

MARIEU B., BAMBA F., BRIQUET J., 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. Bamako, Mali, Orstom/Dnhe.

MDRE., 1992. Recensement du cheptel national. Bamako, Mali, Ministère du développement rural et de l'environnement.

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* Quensièrre J. (éd.). 1994. La pêche dans le delta central du Niger. Volume 1. Paris, France, Ier-Orstom-Karthala. Paris. 495 p.

NORAY DE M.-L., 2000. Session d'échange et de formation autour de la maquette du Modèle Intégré du Delta Intérieur du Niger. Rapports techniques et scientifiques, Etudes n°18. Laboratoire des Eaux Continentales. Bamako, Mali, Ird.

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 périatlantiques : Congo, Niger, Amazone, Olivry J.C., Boulègue J.(éds.). Paris, France, Orstom.

PONCET Y., KUPER M., MULLON C., MORAND P., ORANGE D., 2000. Représenter l'espace pour structurer le temps : La modélisation intégrée du delta intérieur du Niger au Mali. *In* Modèles spatiaux pour le développement territorial. S. Lardon et C. Claramont (eds.). Paris, France, éditions Hermès.

QUENSIÈRE J. (éd.), 1994. La pêche dans le delta central du Niger. Volume 1 et 2. Paris, France, Ier-Orstom-Karthala. Paris. 495 p.

SOUMAGUEL A., 1995. Influence du barrage de Sélingué sur le régime hydrologique du Niger. Mémoire de fin d'études présenté au Centre Agrhymet. Niamey, Niger.

STROSSER P., 1997. Analyzing alternative policy instruments for the irrigation sector. Thèse de doctorat, Université Agronomique de Wageningen, Pays-Bas.

VIGUIER P., 1937. Riziculture indigène au Soudan français. 3 tomes.

WUILLOT J., 1994. Les phytocénoses aquatiques. *In* Quensièrre J. (éd.). La pêche dans le delta central du Niger. Volume 1. Paris, France, Ier-Orstom-Karthala.

Aménagement du territoire et systèmes d'information



Cirad

Actes du séminaire
5 septembre 2000
Montpellier, France

Aménagement du territoire et systèmes d'information

Jean-Philippe TONNEAU

André TEYSSIER

Editeurs scientifiques

Actes de l'atelier

5 septembre 2000

Montpellier, France

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Sommaire

Introduction	
Jean-Philippe TONNEAU	5
Gestion des terroirs. Historique et perspectives	
Yves CLOUET	9
Du terroir au territoire : l'évolution d'un projet de développement rural au Nord-Cameroun	
André TEYSSIER	15
Implementing micro-projects in Dande Communal Land (northern Zimbabwe)	
A chronicle and sociological perspective	
Xavier RICARD, Chris MUZEZA	31
Quelles recherches en appui au processus de décentralisation pour l'aménagement du territoire ? Quelques éléments concernant le Sénégal	
Patrick d'AQUINO, Sidi Mohamed SECK, Seydou CAMARA	55
Contrats territoriaux d'exploitation et système d'information locale	
Marc PIRAUX, Dominique GUILLUY	71
Système d'informations et suivi - évaluation. Application au suivi de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal	
Michel PASSOUANT	79
Modélisation intégrée d'un écosystème exploité : le delta intérieur du Niger au Mali	
Marcel KUPER, C. MULLON, Y. PONCET, P. MORAND, D. ORANGE, E. BENGHA	89