Retour au Sommaire

 © IRD éditions 2007

CHAPITRE 3

Connaissance du fleuve, évolution et indicateurs

Lassine DIARRA, Almoustapha FOFANA,
PIERRICK GIVONE Housseini MAÏGA,
Pierre MORAND, Didier ORANGE, Pierre Sibiri TRAORÉ,

Avertissement méthodologique : prévision saisonnière, couplage de modèles et gestion intégrée des bassins versants

Introduction

La modélisation procure des outils dont l'usage se généralise fortement, en particulier dans le domaine des sciences et techniques pour l'environnement. De nombreux modèles sont désormais sortis du champ historique de la résolution numérique des lois de comportement gouvernant nombre de processus physiques (modèles basés sur la résolution de systèmes d'équations différentielles partielles), en particulier dans les domaines de l'hydrologie, de l'hydraulique, du transport solide…, ceci au sens le plus large. De type encore très différent et plus globale, la modélisation stochastique et statistique, ou « individu-centré », fait également partie du quotidien (ou presque) du chercheur, de l'ingénieur et du technicien, et ceci dans les domaines les plus variés incluant, bien entendu, les sciences de l'univers et les sciences de la vie mais aussi les sciences de l'homme et de la société. Le couplage de modèles, là encore au sens le plus large et tous types confondus, se généralise, ceci pour produire des éléments

d'analyse et d'aide à la décision opérationnelle au plus près de la complexité des systèmes environnementaux.

De fait, et au-delà de l'évolution naturelle des sciences et des techniques qui transfère des « outils techniques » de modélisation pour traiter les besoins opérationnels les plus divers, les « modèles » et leurs couplages sont de plus en plus utilisés comme « outils-médiateurs » entre des communautés d'intérêt très différentes et, le plus souvent, concurrentes (au moins vis-à-vis de l'exploitation des ressources naturelles), d'abord comme « aide à l'objectivisation » des questionnements de ces communautés, puis pour analyser, prévoir, optimiser et finalement appuyer des décisions opérationnelles.

Sans prétendre rentrer ici en profondeur dans le débat de la modélisation lui-même (avec les questions d'échelle, de couplage, de type de modèle, d'accès aux données nécessaires, qui sont bien réelles mais hors de propos), nous nous focaliserons sur deux questions reliées directement aux questions de modélisation d'intérêt majeur pour le bassin versant du Niger et qui méritent un développement spécifique.

La prévision saisonnière : on distingue immédiatement l'espoir soulevé par de telles méthodes. Connaître quelques mois à l'avance (4 à 6 mois dans les procédures utilisées à ce jour) l'état de la pluviométrie sur le bassin versant du Niger doit permettre, à l'évidence, de mieux gérer l'ensemble et surtout la succession des usages de l'eau, de la navigation au pâturage et à l'agriculture en passant par la pisciculture et par la pêche.

Le couplage de modèles, en particulier au profit de la gestion intégrée du bassin versant et du fleuve sous contraintes, y compris celles du changement climatique.

Prévision climatique saisonnière : vrai paradoxe ou fausse dénomination ?

Les météorologues expliquent depuis longtemps que leur incapacité à « prévoir le temps » (nous reviendrons sur ce terme) est directement liée au caractère fondamentalement chaotique du fonctionnement de l'atmosphère qui rend ses mouvements imprévisibles au-delà d'une dizaine de jours. Face à cette vérité physique bien connue - attracteur de Lorentz, théorie du chaos… (Lorentz, 1963) -, les météorologues ont développé de nombreuses méthodes pour exploiter au maximum cet espace temporel de prévisibilité d'une vingtaine de jours et délivrent de manière désormais opérationnelle des prévisions, par exemple à échéance de 6 jours (Météo France). Sans rentrer dans les détails, on peut illustrer cette chute brutale de la prévisibilité en fonction de l'échéance en utilisant, comme le montre Déqué (Déqué, 2003), le coefficient de corrélation (entre les résultats de modèles et les mesures) du géopotentiel (champ de pression) à 500 hPa sur l'hémisphère nord. Plusieurs expériences ont toutes conduit au même résultat : une décroissance forte de coefficient de corrélation au cours des 20 premiers jours puis une zone de stabilisation autour de 0 qui caractérise une zone de non-corrélation. Toutefois, en exploitant des méthodes de chaotisation (en « rendant aléatoire » l'échantillon des prévisions par des permutations au hasard), on observe que la courbe en fonction de l'échéance du même coefficient de corrélation se trouve souvent au-dessus (et jamais en dessous) de la zone représentant l'intervalle de confiance à 95 %. Il apparaît donc que toute prévisibilité n'a pas disparu du système, même si nous sommes loin de savoir comment exploiter ce résidu. D'une

manière générale et une fois systématisé l'usage de modèles couplés « océan-atmosphère », c'est la connaissance des températures de la mer (et sa mobilisation dans les modèles utilisés), en particulier sous les tropiques, qui confirme cette prévisibilité, alors qu'elle disparaît (ou presque) si les températures de la mer ne sont pas connues. Les températures des mers génèrent un signal atmosphérique aux grandes échelles, auquel se superposent des fluctuations prévisibles, elles, à échéance d'une vingtaine de jours seulement.

Il devient ainsi possible, suite à quelques expériences de grande ampleur (ECMWF, 1998 ; Palmer *et al.*, 2000) et de manière presque opérationnelle (au moins dans un certain sens), de produire des prévisions saisonnières – sans prétendre néanmoins faire plus que de compléter une prévision climatologique – et donc mieux éclairer des décideurs face à une alternative offrant des coûts et des probabilités évaluables. Les prévisions saisonnières actuelles ne sont pas capables, par exemple, de prévoir une canicule comme celle de l'été 2003 en Europe avec une anticipation de 4 à 6 mois (classique pour ce genre de prévision).

Ce que l'on peut attendre de la prévision saisonnière est tout autre et assez loin des produits traditionnels de la prévision météorologique (températures, précipitations, pressions…). À tel point que le terme « prévision saisonnière », pour attirant qu'il soit, n'est pas approprié et plutôt source de malentendu. L'objet de la prévision saisonnière consiste à dire en quoi le climat d'une saison à venir se distingue du climat des années précédentes (à grande maille), par exemple en prédisant l'occurrence de l'anomalie climatique majeure « *El Nino* » et son basculement vers la situation symétrique dite « *El Nina* ». Dans le cadre spécifique des régions tropicales, ou la prévisibilité est plus importante que sous les latitudes tempérées, c'est au phénomène ENSO (*El Nino South Oscillation*) que l'on s'intéresse, avec le résultat intéressant de prévoir 60 % de la variance de la TSO Pacifique (Température de Surface de l'Océan) avec 1 an d'avance.

Les applications que l'on peut qualifier d'économiques (Rogel et Maisonnave, 2003) et qui intéressent plus directement le bassin du Niger existent : elles se situent toujours dans le champ de l'activité d'un utilisateur qui s'intéresse à la prévision d'un événement pouvant lui infliger une perte économique notée « L » s'il se produit (hiver plus froid que la moyenne, navigabilité plus faible d'un fleuve…). Cet utilisateur peut se prémunir de cette perte par un investissement préventif de coût noté « C ». Cet utilisateur reçoit les résultats d'une prévision saisonnière, et il doit décider, pour son propre usage, à partir de quel seuil de probabilité prévue il considère que l'événement en cause va effectivement se produire. On peut ainsi tracer une courbe qui met en regard le seuil considéré et le rapport C/L, et donc estimer une valeur économique de la prévision exprimée en pourcentage du gain occasionné par une prévision parfaite.

Il n'est pas certain, sous réserve de disposer déjà de la totalité de l'information climato/météorologique nécessaire, que ce type de prévision puisse effectivement rentrer dans une chaîne économique opérationnelle sur le basin du Niger. En tous les cas, l'exploration de ce type d'optimisation ne semble pas totalement prioritaire au stade actuel ou d'autres actions, moins consommatrices de très hautes technologies, peuvent être engagées.

Le couplage de modèle : pour une gestion intégrée des bassins versants

La construction de modèles explicitant la dynamique à long terme des systèmes environnementaux complexes est un défi posé à la recherche, mais aussi à ses applications, et qui est loin d'être gagné si l'on s'intéresse à la dynamique globale des systèmes. Par dynamique globale, on entend classiquement celle des phénomènes physiques, mais aussi écologiques, ainsi que celle des groupes sociaux actifs sur les territoires concernés. Le simple fait de concevoir un modèle pertinent intégrant dans une dynamique systémique unique le fonctionnement de ses trois composantes principales en interaction est déjà un défi en soi. Même si l'on accepte de réduire le champ de l'intégration à la thématique « eaux et territoires », c'est-à-dire de ne conserver que deux entrées : l'organisation sociale (territoires) et l'eau dans tous ses états (donc jusqu'à la production agricole et aquacole – y compris la pêche – dans le lit majeur du fleuve), on n'a *a priori* pas beaucoup plus d'exemples opérationnels auxquels se référer.

Bien entendu, des modèles sectoriels existent sur le bassin du Niger, certains disposant d'un réel niveau d'intégration – y compris en écologie (captures et activités des pêcheurs) – et d'un haut niveau scientifique et/ou technique intrinsèque. La réelle complexité du fonctionnement du « système Niger » et sa grande richesse fonctionnelle, militent d'ailleurs, autant que faire se peut, pour une approche systémique de la modélisation. Par ailleurs, la gestion intégrée du système est plus qu'un objectif ou une ambition, c'est déjà une réalité inscrite dans le fonctionnement hydroécologique du fleuve et de son delta intérieur. Le séquencement dans le temps des types d'activité mobilisant les étapes successives de la montée puis de la descente des eaux, de l'agronomie à la pêche en passant par la navigation, est un exemple de gestion intégrée sans doute plus optimisée qu'il n'y paraît.

L'écueil à éviter est celui de l'intégration sans valeur ajoutée dont le résultat ne satisfera que les techniciens en charge de l'outil final qui risque, d'ailleurs, ne n'être qu'un outil de couplage, voire une simple juxtaposition de modèles. Il n'existe pas, à ma connaissance, de modèle global qui intègre le fonctionnement hydroclimatique d'un bassin versant (de cette taille et de cette variété naturelle et anthropique), ses dynamiques sociales et économiques (en relation avec les éléments principaux caractérisant son écologie) et sa biodiversité au sens large ; ceci, à toutes les échelles spatiales et temporelles nécessaires à la gestion opérationnelle de son développement. Par ailleurs, la question de la structure institutionnelle qui fasse fonctionner cet hypothétique outil, forcément à l'échelle du bassin versant dans sa globalité, se pose et, s'agissant du fleuve Niger, implique de conforter les institutions en place pour leur donner toute leur place (et toute l'autorité nécessaire) en matière de gestion opérationnelle ; ce qui n'est pas un problème simple.

Il est plus pertinent de se concentrer plutôt sur le confortement, l'extension et la structuration d'un système d'information environnementale (SIE) plus global qui prépare à un futur pilotage plus intégré des dynamiques territoriales du bassin versant. Les prémisses de ce SIE existent déjà, en particulier dans le domaine de l'exploitation piscicole en eau douce, ainsi que dans celui de la production agricole organisée. Ce SIE, dont il convient avant tout de décrire la structure, peut s'organiser à l'échelle du bassin versant et être utile aussi bien en gestion des crues (données hydroclimatiques) qu'en appui au développement territorial. Ceci doit être une priorité de l'action avant de songer à une savante intégration de modèles qui ne saurait être opérationnelle avant des

années et qu'il faudra, de toute manière, alimenter en données et en informations de toute nature.

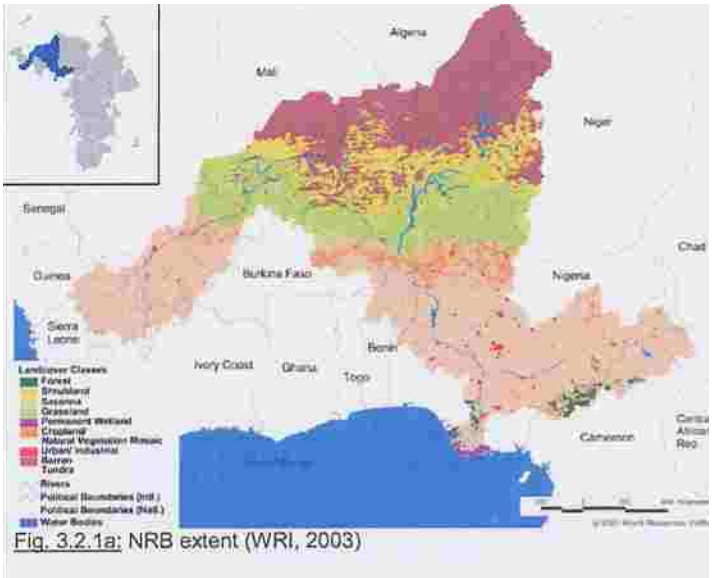
Évolution climatique : connaissances actuelles et schémas explicatifs

Les fréquentes sécheresses qu'a subies la région de Sahel en Afrique occidentale au cours des années 1970 et 1980 ont sérieusement entamé la résistance des écosystèmes et la capacité d'adaptation des sociétés humaines (IPCC, 2001). Le regain d'attention de la communauté scientifique qu'a provoqué ce phénomène s'est traduit par une forte augmentation du nombre de publications portant sur le climat ayant un rapport direct avec le bassin du Niger et permettant ainsi de mieux comprendre la complexité du climat régional et local.

Une combinaison unique de forçages externes et internes fait de l'Afrique occidentale l'une des régions les plus sensibles au monde au niveau climatique (Ning-Zeng, 2003) et probablement l'une des plus difficiles à schématiser (Jenkins *et al*., 2002). La superposition de plusieurs modes antagoniques de variabilité rend particulièrement difficile le déchiffrage et l'interprétation de l'évolution climatique**.** Cette question complexe sera traitée en quatre parties successives traitant des déterminants climatiques du bassin du Niger (connaissances actuelles), de ses modes de variabilité (observations), des schémas analytiques (outils expérimentaux) et de l'évolution des ressources en eau (prévisions).

Connaissances : les déterminants climatiques dans le bassin du Niger

Le bassin s'étend sur une grande partie du bloc continental de l'Afrique occidentale, entre le 4e et le 24e degré nord et entre le 12e degré ouest et le 16e degré est. Il occupe environ le tiers du bloc continental tropical de l'Afrique occidentale, ce qui en fait le plus grand bassin hydraulique de la région et le 4e plus grand d'Afrique (figure 1). La plupart des régimes climatiques d'Afrique occidentale sont le résultat d'interactions entre une variété unique de forçages qui rendent particulièrement difficiles l'identification et l'explication de l'évolution climatique. Une étude des mécanismes d'action s'avère nécessaire pour comprendre la variabilité et l'évolution à plus long terme du bassin. On s'attardera tout particulièrement sur les précipitations qui sont le paramètre climatique le plus important car il détermine les saisons, comme c'est le cas dans la majeure partie des régions où les températures ne sont pas restrictives (Le Barbé *et al*., 1997). D'autres variables jouant un rôle essentiel dans la présence de ressources en eau seront abordées dans les parties suivantes.



Source : World Resources Institute

Figure 1 - Bassin du fleuve Niger

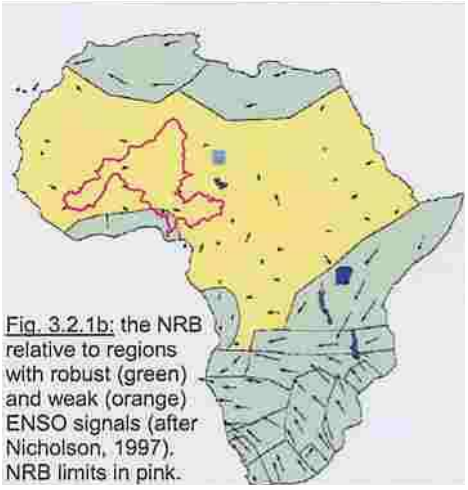
La localisation et les forçages astronomiques déterminent la saisonnalité du climat

L'immense bloc continental tropical, l'une des particularités de l'Afrique occidentale, exerce une influence unique sur le climat régional et planétaire grâce à la redistribution convective de la chaleur du soleil. Situé près d'immenses sources d'énergie (l'océan Atlantique et l'océan Indien) et de grands reliefs (les montagnes d'Afrique de l'Est et du Futa Djalon), il est propice à un transfert d'énergie en grande partie modulé par les conditions à la surface de la Terre. La chaleur saisonnière du soleil (lors de l'été, au nord) provoque la circulation de moussons, illustrée par le déplacement méridional de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) associée aux phénomènes de convection résultant de l'interaction d'une instabilité atmosphérique, de conditions à la surface de la Terre et de couches limites**.**

Des forçages océano-atmosphériques conditionnent la circulation dans la région et déterminent le potentiel saisonnier

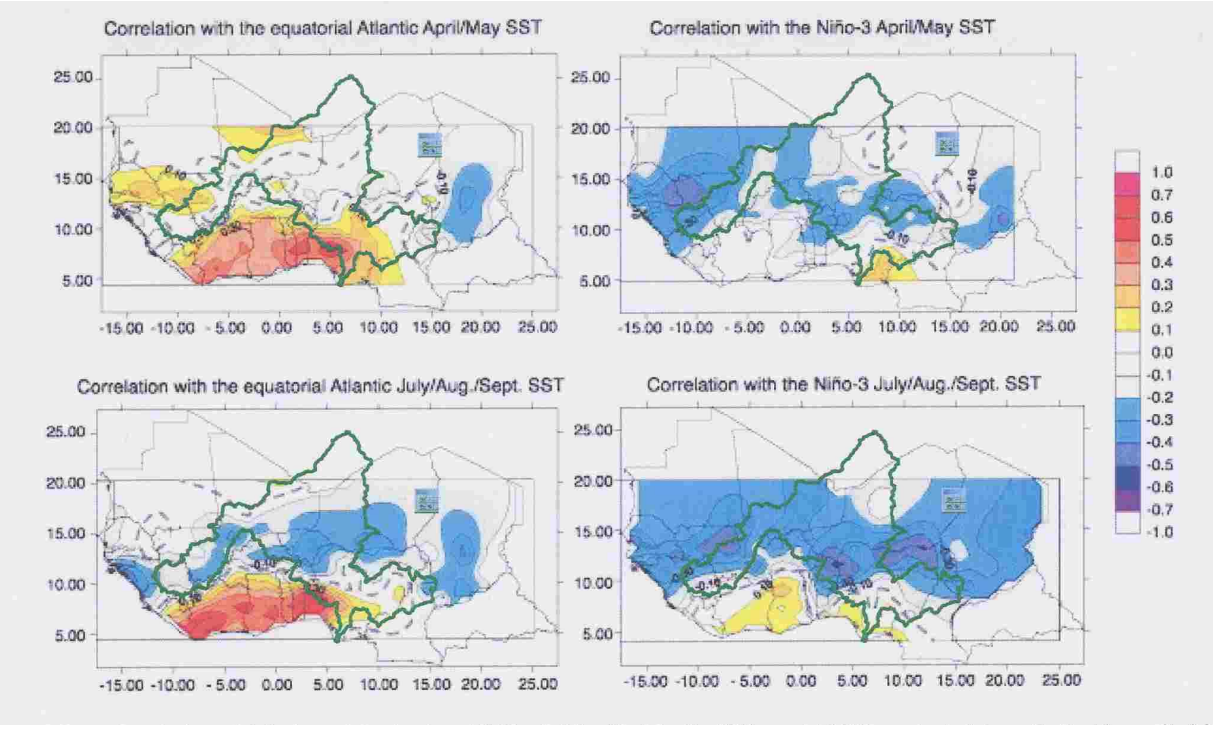
La saisonnalité du climat du bassin du Niger dépend de plusieurs signaux lointains lancés par le système océano-atmosphérique en réponse à des stimuli astronomiques. L'inertie thermique d'immenses masses d'eau ne permet pas un grand mouvement océanique ; ce qui maintient les conditions atmosphériques dans la région à travers des liens lointains (téléconnections) pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. On peut faire une distinction dialectique entre les forçages atmosphériques stochastiques sur lesquelles les océans n'auraient aucun retour dynamique et la variabilité interne des océans forcée non pas par des variations atmosphériques mais par une combinaison océano-atmosphérique (Willebrand, 1998). Le phénomène d'oscillation océano-atmosphérique le plus connu qui touche le climat du bassin du Niger est *El Niño* (ENSO) qui influence le système mondial des moussons d'été, de la Chine à l'Afrique occidentale, à travers les circulations de Walker et Hadley (Quan *et*

al., 2003). Une simple analyse harmonique a cependant montré que les téléconnections de l'ENSO avec les précipitations de l'Afrique occidentale tropicale sont moins nettes que dans d'autres régions d'Afrique (Nicholson et Kim, 1997 et figures 2 et 3). L'abondante documentation sur ce sujet révèle encore un manque de consensus sur la relative importance de l'influence de l'ENSO sur la région (pour les thèses contradictoires, voir Rowell, 2001 cité par Lister *et al*., 2001 et Mason *et al*., 2001). De nouvelles études sur le rôle modulateur de la variabilité SST de l'Atlantique (reconnue depuis longtemps comme un déterminant clé des précipitations en Afrique occidentale mais liée en partie à l'ENSO) devraient permettre de s'accorder sur des découvertes manifestement contradictoires obtenues sur différentes périodes. Camberlin (Camberlin *et al*., 2001) montre que la relative puissance de la téléconnection du Pacifique (ou de l'Atlantique) a augmenté (ou diminué) au cours des 30 dernières années. Pour la même période, Janicot (Janicot *et al*., 1998) détaille un possible mécanisme qui expliquerait l'influence lointaine de l'ENSO sur les SST de l'Atlantique (et donc les pluies en Afrique occidentale) sous la forme d'une zone de connexion atmosphérique entre deux océans (pont troposphérique).



Source : Nicholson et Kim, 1997

Figure 2 Le bassin du Niger et les régions où la présence d'El Niño est forte (en vert) ou faible (en orange) (les limites du bassin sont en rose)



Source : adapté d'après O. Baddour, Clivar 1999

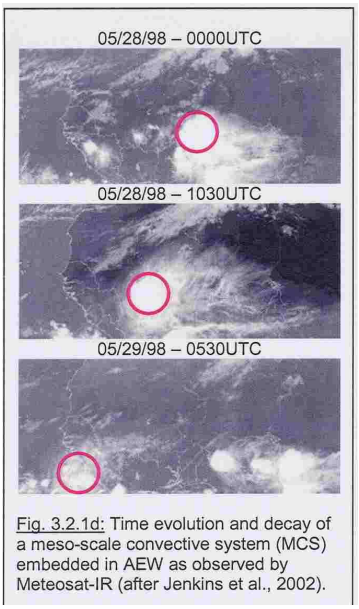
Figure 3 - Corrélations des précipitations (Juill., Août et Sept.) avec la SST Atlantique et El Niño

La figure 3 illustre la modulation du signal de l'ENSO par les SST de l'Atlantique équatoriale révélant des influences et des réponses contrastées entre deux régions climatiques adjacentes représentées dans les limites du bassin du Niger. Les régimes de précipitation de ces deux régions se sont souvent révélés en décalage (Clivar, 1999). On les schématise sous la forme d'un dipôle méridional avec des précipitations négatives (ou positives) sur le Sahel (ou sur la côte du golfe de Guinée) et des SST chaudes dans l'Atlantique sud (pour des détails sur ces mécanismes, Vizy *et al.*, 2001).

En fait, plusieurs études suggèrent que la sécheresse sahélienne n'est pas liée à un seul modèle d'anomalie des SST. Elle dépend plutôt d'influences combinées venues, d'une part, des anomalies mondiales de la SST et, de l'autre, de modèles de contributions océaniques liées (Folland *et al.*, 1986). Récemment, Giannini (Giannini *et al.*, 2003) qui s'intéresse, lui aussi, à l'influence de l'océan Indien a justifié ce point de vue. De nombreuses autres téléconnections (méditerranéennes : Raicich *et al.*, 2003) et autres forçages potentiels (des oscillations quasi biennales : Lister *et al.*, 2001) ont été proposées. Aujourd'hui encore, la multiplicité des interactions entre les signes océano-atmosphériques au niveau local ou planétaire rend très difficiles l'analyse et la compréhension des dynamiques qui en découlent ; mais la poursuite d'un ensemble de recherches commence à porter ses fruits (Giannini *et al.*, 2003).

Des éléments synoptiques et sub-synoptiques contrôlent les véritables schémas climatiques et déterminent la réalisation des saisons

En Afrique occidentale, un vent thermique mi-troposphérique d'est créé par le puissant gradient thermique situé entre l'atmosphère saharienne sèche et la mousson humide du sud-ouest fait naître une succession de vagues provoquées par le vent qui survole les montagnes d'Afrique de l'Est (Cook, 1999). Ces caractéristiques synoptiques, appelées également ondes d'Est africain, sont les suivantes : une période dominante de 3 à 5 jours (El Oussein Taleb et Bruyan, 2003), une longueur de vague de 2 000 à 4 000 km et une latitude moyenne de 11 à 12° N (Lister *et al*., 2001). Fixées dans les ondes, des cellules convectives se déplacent vers l'ouest. La présence de ces cellules, organisées sur des lignes d'orage de plusieurs centaines de km de long, s'explique par la chaleur à la surface de la Terre, la topographie et l'évaporation. L'activité des lignes d'orage est la principale responsable, au moyen de boucles de rétroaction sur des périodes météorologiques moyennes, des pluies de l'Afrique occidentale et du développement de cyclones atlantiques (Landsea *et al*., 1999). Cette dernière évolution implique souvent la transformation de lignes d'orage en complexes convectifs de mésoscale, un autre élément synoptique en Afrique occidentale ayant une forme concentrique (Jenkins *et al*., 2002). La figure 4 illustre le déplacement vers l'ouest et l'évolution dans le temps de tels systèmes convectifs mésoscales et le développement d'un autre CMC sur l'onde suivante, 2 500 km plus à l'est.



Source : observations Météosat-IR, reproduites dans Jenkins *et al*., 2002

Figure 4 - Évolution d'un système convectif mésoscale

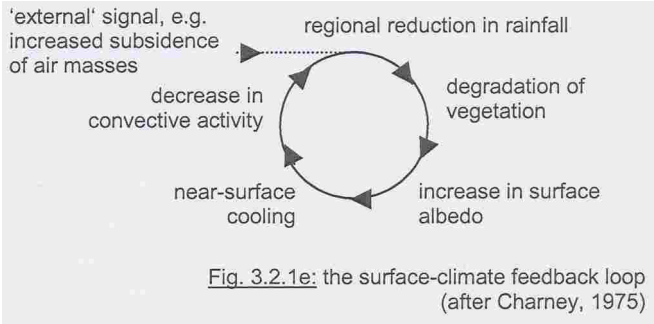
Le rapport Clivar (1999) souligne cependant que notre connaissance actuelle sur les détails synoptiques de la convection africaine est encore insuffisante en dépit de nombreux travaux en la matière (la théorie du courant d'Est africain fut proposée par Burpee en 1972). De récents travaux de Gu (Guojun Gu *et al*., 2004) désignent ces ondes comme l'un des mécanismes clefs qui déterminent les précipitations dans le Sahel (au-dessus d'une latitude de 10° N) au plus haut de la saison des pluies (juillet-août). Gu

avance également l'hypothèse que les ondes ne descendent pas plus bas que le 10° N, les moteurs de l'activité convective étant les gradients SST et les forçages thermiques. Selon les données de Taleb (El Houssein Taleb et Druyan, 2003), les perturbations associées au courant d'Est africain ne représentent qu'une partie des précipitations saisonnières. Des résultats obtenus par D'Amato (D'Amato et Lebel, 1998) et Le Barbé (Le Barbé *et al*., 1997) identifient, quant à eux, la variabilité dans le nombre – plutôt que dans la magnitude – de chaque chute de pluie comme la source principale de variabilité des précipitations au Sahel.

La nécessité de la poursuite des études se justifie par le rôle critique que les éléments synoptiques revendiquent sur les schémas climatiques et sur la variabilité climatique *in fine*. Il s'avère nécessaire de mieux comprendre les phénomènes et les processus qui lient des événements synoptiques à la circulation régionale et mondiale, comme les oscillations Madden et Julian (Matthews, 2004), et la dynamique des vents troposphériques dont le vent thermique d'est (Nicholson *et al*., 2003). Il est également utile de mieux caractériser les rétroactions entre ce vent et les conditions à la surface au moyen de la couche limite (Fontaine *et al*., 2000).

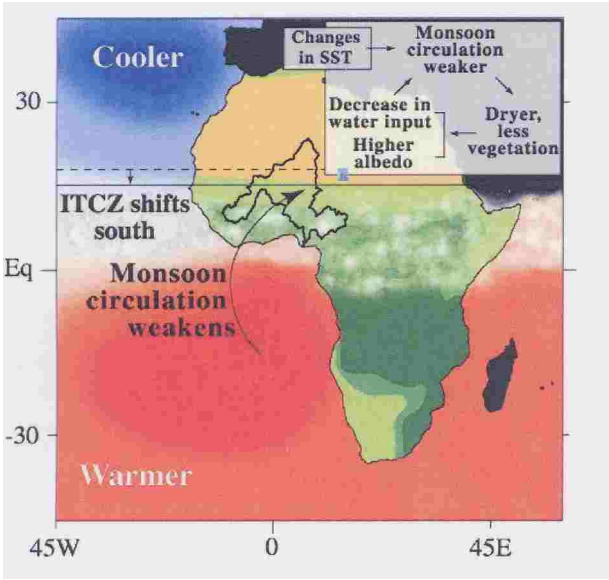
Les conditions à la surface de la Terre : les post-combustions de l'appareil climatique régional

On a longtemps suggéré que les boucles de rétroaction entre les conditions à la surface de la Terre et l'atmosphère fonctionnaient également sur des périodes climatiques plus longues avec des répercutions sur la variabilité des précipitations interdécennales et la tendance à la désertification. Charney avança en 1975 l'idée selon laquelle la dégradation de la couche végétale entraînerait une augmentation de l'évapotranspiration**,** une baisse des précipitations et enfin une dégradation supplémentaire de la couche végétale**,** créant ainsi un cycle rétroactif d'albédo-précipitations (figure 5). De nombreuses études suggèrent que la couche de végétation et l'humidité des sols sont nécessaires pour simuler le plus justement possible les variations de précipitations, notamment à des périodes interdécennales (Ning-Zeng *et al.*, 1999). Elles jouent le rôle d'amplificateurs des forçages océaniques à basse fréquence (Giannini *et al*., 2003 et figure 6) et amortissent le « bruit » à haute fréquence trop peu puissant pour perturber des cycles interdécennaux. De même, la désertification consistant bien plus en une dégradation des lieux de capacité de production au-delà des déserts de sable qu'à une inexorable avancée du sable sur la terre (IPCC, 2001), plusieurs études (Xue, 1997 ; Xinyu Zheng et Eltahir, 1998) soulignent les effets à plus long terme sur les pluies sahéliennes des changements de l'albédo, de l'humidité des sols et de la dureté de la surface dans les zones soudaniennes et guinéennes avoisinantes. Nicholson (Nicholson et Kim, 1997) souligne la rétroaction positive entre la désertification et le changement climatique provoqué par le CO_2, à travers les effets d'interaction de la dégradation végétale, de l'augmentation de l'exposition des sols, de la baisse de l'humidité des sols et de l'érosion des sols. L'érosion par le vent est notamment responsable de l'augmentation des aérosols qui modifient l'équilibre des radiations et les processus atmosphériques comme la convection ; ce qui a des conséquences sur le climat saisonnier (Clivar, 1999).



Source : Charney, 1975

Figure 5 - Cycle rétroactif d'albédo-précipitations



Source : adapté d'après Ning-Zeng *et al.*, 1999

Figure 6 - Influence rétroactive de la SST, des précipitations et de la végétation sur les précipitations de mousson sur le bassin du Niger

De nombreux documents portant sur ce sujet en Afrique occidentale ont été publiés depuis les excellents travaux de Charney au milieu des années 1970 afin de trouver, parmi les facteurs anthropogéniques et naturels responsables du changement climatique, le principal mécanisme de causalité. Les expériences Hapex-Sahel de 1991-93, motivées par cette idée, ont montré, d'une part, l'équilibre complexe entre les influences à la surface de la Terre et les schémas de flux à grande échelle et, d'autre part, la nécessité de plus de couplage terre-atmosphère pour comprendre les mécanismes impliqués dans l'interaction des processus mésoscales et les phénomènes à plus grande échelle (Dolman *et al.*, 1997).

Depuis, des progrès ont été accomplis dans ce domaine. Tout d'abord, on a couplé des schémas atmosphériques avec de simples modèles de biosphère (Xue *et al.*, 2004), puis avec des schémas de végétation dynamiques, afin d'identifier de multiples états d'équilibre dans les dynamiques climat/végétation et d'affirmer l'influence sur le climat des conditions à la surface de la terre face aux SST ou de l'humidité face à

l'albédo à la surface de la Terre, le rôle de ce dernier étant toujours controversé (Hunt, 2000). L'hypothèse d'une sécheresse provoquée par des forçages semble maintenant écartée par la plupart des études qui avancent l'idée que les changements climatiques observés dans la région proviennent de forçages externes à grande échelle (Long *et al*., 2000), c'est-à-dire de variabilités naturelles et peut-être d'un réchauffement planétaire anthropogénique (Ning-Zeng, 2003). Cependant, il faut souligner le rôle essentiel des conditions à la surface de la Terre dans la perpétuité des conditions de sécheresse et d'humidité créées par les forçages océaniques et leur effet modérateur sur les variations interanuelles via la réponse des surfaces végétales (De Ridder, 1998 ; Ning-Zeng *et al.*, 1999). Enfin, les travaux originaux de Semazzi (Semazzi *et al*., 1997) suggèrent que les montagnes de l'Atlas-Ahaggar apportent un vent orographique sahélien qui, affaibli, pourrait contribuer à renforcer les épisodes de sécheresse au Sahel. L'auteur émet l'hypothèse selon laquelle le contrôle orographique pourrait être un autre facteur important permettant de déterminer certaines caractéristiques primaires de la variabilité climatique en Afrique occidentale ; point de vue que partage Sultan (Sultan *et al*., 2003a et 2003b).

Conséquence : un ensemble complexe de périodes

Une multitude de forçages ayant des origines astronomiques, océaniques, atmosphériques et continentales déterminent le climat du bassin du Niger. Les dynamiques de chacun de ces déterminants suivent un schéma d'oscillation sur plusieurs périodes et impliquent que des phénomènes interfèrent à différentes échelles spatiales. Contrairement à l'Afrique de l'est ou du sud où l'ENSO exerce un véritable contrôle sur le climat régional, la distribution des influences entre diverses forçages produit des données variables difficiles à démêler et qui ne permet pas de déterminer une évolution climatique claire. La partie suivante sera consacrée aux différentes modes de variabilité du climat dans le bassin du Niger allant de températures moyennes à des phases glaciaires et, surtout, aux modes les plus appropriés aux périodes humaines : les variabilités saisonnales et décennales. Une attention particulière sera accordée au « Sahel » des climatologues (ce terme généralement utilisé dans un sens large incluant les régions d'Afrique occidentale au régime pluviométrique monomodal) et non à la « côte guinéenne », au sud (régime pluviométrique bimodal), car cette dernière ne représente qu'une petite partie de la région du bassin de Niger.

Un climat marqué par de nombreux modes de variabilité

Quand Hulme (2001) déclare qu'il n'existe pas de précipitations « normales » au Sahel, il occulte l'une des caractéristiques fondamentales du climat en Afrique occidentale : sa « normalité » varie en fonction des périodes. L'imbrication des modes de variabilité observés a longtemps empêché, et c'est encore le cas aujourd'hui, de comprendre les principaux processus qui déterminent les climats régionaux et locaux et donc de schématiser les changements et d'identifier une « évolution ».

Ce concept d'« évolution » peut être trompeur et demande à être précis dans la période. Ce qui peut sembler être une tendance sur une période limitée, correspond généralement à une partie d'un cycle compris dans un ensemble plus large de variabilité. L'évolution serait alors un « signal » qui détecte des bruits « variables » qui resteraient à caractériser. Suite à la théorie de Ward (1998) qui a démontré l'intérêt de séparer des oscillations qui apparaissent à différentes fréquences, on fractionne le

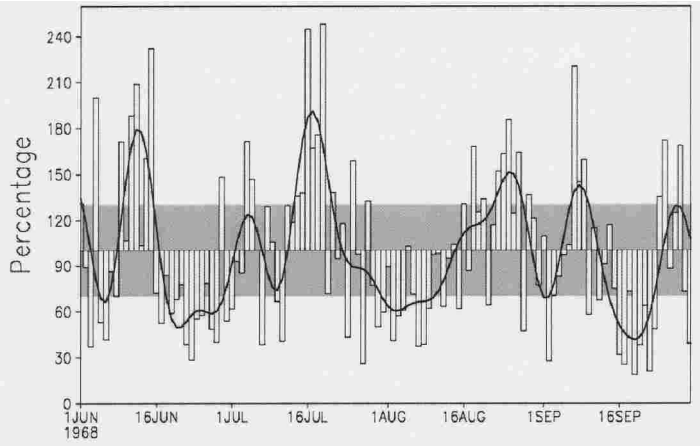
comportement du climat du bassin entre chaque constituant de sa variabilité et on montre comment ces constituants sont liés à une évolution sur une période donnée (souvent une décennie).

Variable intrasaisonnière : le rôle des ondes de l'est

On peut avancer que les variabilités intersaisonnières n'ont pas grand-chose en rapport avec l'étude de l'évolution climatique calculée sur plusieurs années. Cependant, des changements peuvent apparaître dans la structure interne de la saison. En effet, les dynamiques des systèmes synoptiques jouent un rôle prépondérant dans l'apparition d'anomalies climatiques saisonnières. Par exemple, les ondes de l'est agissent lors de périodes intra-saisonnières reliant des données climatiques individuelles à des variations interannuelles. Cette influence pourrait même avoir des effets plus importants sur les fluctuations climatiques de plus basses fréquences (Clivar, 1999).

Des travaux de Le Barbé (Le Barbé *et al*., 1997) montrent que la diminution des précipitations dans le Sahel au cours des dernières décennies s'expliquait surtout par la baisse des pluies en juillet-août, sans que la durée de la saison des pluies ne change de façon significative. Des résultats complémentaires apportés par d'Amato (D'Amato et Lebel, 1998) illustrent la variation de la quantité de pluie entre le cœur et les extrêmes de la saison des pluies. D'après ces résultats, la baisse des précipitations est principalement fonction de la baisse de la fréquence des tempêtes en plein cœur de la mousson. Cette conclusion soulève la question des facteurs contrôlant la périodicité – c'est-à-dire le développement, la vitesse de déplacement, le timing (Shinoda *et al*., 1999) – et le cycle de vie des systèmes synoptiques se déplaçant vers l'ouest.

Il est extrêmement important de bien comprendre les modèles de variabilité intra-saisonniers comme l'apparition de périodes de sécheresse ou le début difficilement prévisible de la saison des pluies et, ce, pour les processus écologiques, en particulier l'agriculture (Ati *et al*., 2002 ; Dodd *et al*., 2001 ; Omotosho *et al*., 2000 ; Ward *et al*., 1999). Prenons deux années successives, 2003 et 2004, qui ont eu des précipitations saisonnières comparables mais des distributions intra-saisonnières différentes (dans la partie ouest du Mali, par exemple). En conséquence, on a enregistré une différence nette d'effets sur la croissance de la végétation avec des retours différents sur les variables climatiques locales sur une période interannuelle ou plus longue. Donc, les analyses de variabilité et d'évolution à long terme, fondées sur des totaux sub-saisonniers (comme les précipitations JAS) doivent prendre en compte la variabilité intersaisonnière afin de corriger toute erreur possible lors de l'analyse de l'évolution climatique. Tous ces aspects justifient le besoin de renseignements adéquats sur les dynamiques des moussons en Afrique occidentale lors de la poursuite des travaux prometteurs de Sultan (Sultan *et al*., 2003a , 2003b et figure 7).

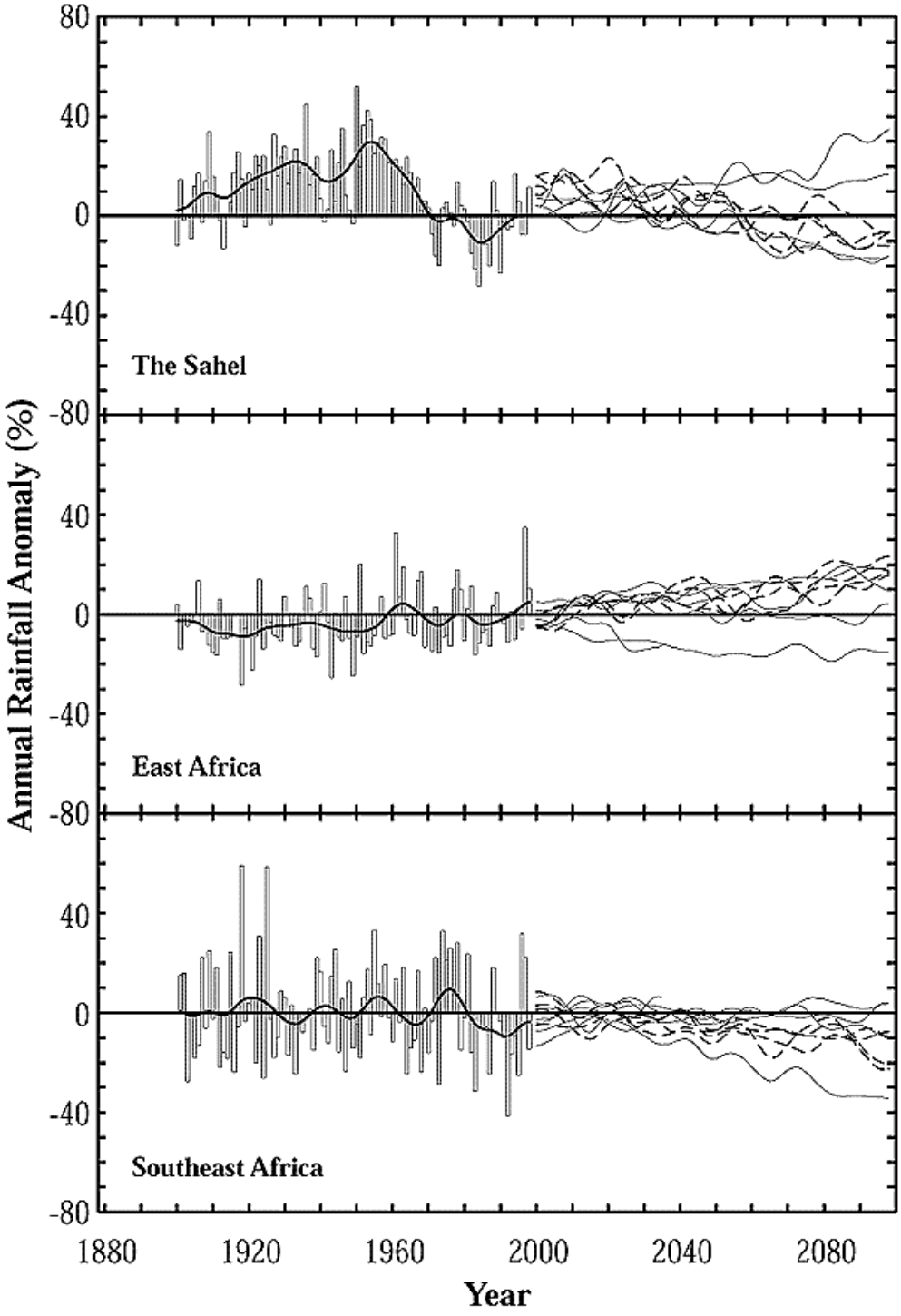


Source : Sultan *et al*., 2003a

Figure 7 - Variabilité intra-saisonnale en 1968, dans la région soudano-sahélienne, sous la forme de précipitations journalières du cycle saisonnier de 1968

Les variabilités saisonnières (interannuelles) : ce ne sont pas les plus longues !

L'intégration de variations intra-saisonnières à des périodes annuelles permet de détecter les anomalies dans les précipitations annuelles touchées par des variabilités de haute fréquence (interannuelles : HF) et de basse fréquence (interdécennales **:** BF) qui doivent être découplées et comptées séparément (Ward, 1998). Des travaux de Moron (1997) utilisant des analyses de spectres multi-élémentaires (MSSA) démontrent que le Sahel se différencie d'autres régions d'Afrique par le fait que ses fréquences sub-décennales contribuèrent très peu à la variation des précipitations pendant la période 1900-94. Par exemple, des oscillations quasi-quinquennales (OQQ : 5,1-5,8 ans), quasi-triennales (OQT : 3,2-3,6 ans) et quasi-biennales (OQB : 2,0-2,8 ans) n'expliquaient respectivement que 5 % (20 %), 5-10% (20-25 %) et 5 % (10 %) des variations pluviométriques du Sahel (Afrique de l'Est et Afrique équatoriale). On peut tirer des conclusions similaires en lisant la figure 8 de la page suivante (d'après IPCC, 2001). Il apparaît clairement que les variabilités interannuelles au Sahel, même longues (Hastenrath, 2000), ne sont pas aussi significatives que dans les régions de l'Est et du Sud-est africain. Cette spécificité ne s'applique pas à la côte guinéenne directement au sud.



Source : IPCC, 2001

Figure 8 : Anomalies des précipitations annuelles

Des variabilités interdécennales inégalées sous les tropiques

En effet, la grande proportion d'anomalies annuelles dans le climat du Sahel s'explique (ou est « contaminée ») par des oscillations qui ont lieu sur de plus longues périodes. Cette variabilité, qu'on appelle souvent fluctuation BF « basse fréquence » (Ward, 1998) intéresse tout particulièrement la communauté scientifique après la succession de plusieurs années sèches qui débutèrent au début des années 1970 et les sécheresses qui en résultèrent. Moron (1997) observa une pulsion quasi-décennale de 12-13 ans qui représenta 12 à 14 % de la variabilité de la saison des pluies.

D'après les résultats d'une simulation faite par Hunt (2000) sur 500 ans, les périodes typiques de sécheresse ou d'humidité au Sahel s'étendent sur 5-10 ans. Ceci montre bien que la période sèche de 1968 est tout à fait anormale. « *Le Sahel africain […] est l'exemple le plus inquiétant au monde de variabilité climatique mesurée directement et quantitativement* » (Hulme, 2001).

En Afrique occidentale, les précipitations ont été l'objet de fortes variations décennales et interdécennales au cours du XXe siècle. La principale caractéristique est la réduction du nombre de précipitations au cours de la deuxième partie du siècle avec une amélioration à la fin (Paeth *et al*., 2004).

Les conditions à la surface de la Terre jouent le rôle d'amplificateur des signaux climatiques (la sécheresse : anomalie interdécennale) contrairement aux variations interannuelles qui ne peuvent être considérées individuellement comme une sécheresse.

De la variabilité à l'évolution : les changements climatiques du passé perçus par les humains

De récents documents historiques montrent que l'Afrique occidentale s'est réchauffée au cours du dernier siècle en même temps que le reste du monde avec un réchauffement légèrement supérieur lors de la saison de la mousson d'été. Une succession de périodes sèches et humides est apparue depuis le début des années 1800 avec, même, une sécheresse très sévère lors de la première partie du XIXe siècle que l'on pourrait comparer en magnitude et en durée aux conditions climatiques qui se développent depuis les années 1970 (Nicholson, 1982, cité par Hulme, 2001 et figure 8). D'après les souvenirs de personnes âgées encore vivantes qui connurent la sécheresse qui s'abattit sur le Sahel aux alentours de la première Guerre Mondiale, le gouvernement colonial organisa, de manière préventive, des enterrements en masse, pour éviter les épidémies.

En l'espace de quelques années, la sécheresse et son corollaire, la désertification, sont devenues, sous la pression de donateurs venus d'agences internationales, des sujets de recherche très prisés provoquant des débats passionnés sur la nature et la signification de la sécheresse au Sahel. Ces opinions n'étaient pas toujours totalement apolitiques, manquaient parfois de justesse scientifique (Chappell et Agnew, 2004) et changeaient presque autant (Gregory, 1982, cité par Le Barbé *et al*., 1997) que les conditions de précipitation !

Mais en dépit du flot de publications provoqué par la sécheresse des années 1970-80, la question cruciale posée par Hulme (2001) reste, elle, entière : à quel point cette désertification qui s'est produite récemment dans le Sahel est un événement unique ?

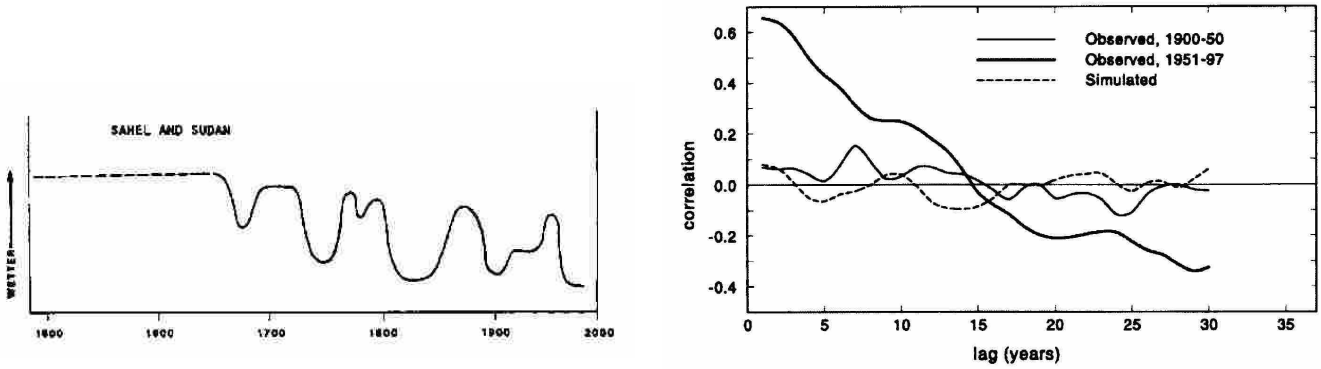


Figure 9 : Possibles précipitations à long terme dans le Sahel et le Soudan

Un prochain refroidissement planétaire ?

Des données paléoclimatologiques sur la dernière période glaciaire (20 000 – 14 000 avant JC) indiquent des températures plus basses qu'aujourd'hui (de 4 à 7 degrés), une aridité plus intense et une avancée latitudinale du désert due à la baisse des précipitations associée à de plus faibles moussons, des vents plus violents et des SST plus faibles. Cette période fut suivie d'une phase climatique « hypsithermale » de réchauffement pendant l'ère holocène, culminant vers l'an 7 000 avant JC, avec des cycles saisonniers étendus, une humidité et un recul du désert au profit de prairies et même de lacs (Zuppi *et al.*, 2004). Damnati (Damnati, 2000) cite un brusque développement de palustres, de l'an 7 000 à 6 500 avant JC, dans les 73 bassins lacustres du Sahara alimentés par une mousson plus longue et moins violente qu'aujourd'hui et dont les précipitations annuelles s'élevaient à au moins 300 mm sur la partie nord du bassin du Niger. L'auteur suggère également que les caractéristiques climatiques actuelles se sont développées vers l'an 4 500 avant JC.

Quel climat en Afrique occidentale ? Prévisions, principes et technique

La compilation des connaissances exposées plus haut apporte une base théorique sur le climat et peut être considérée comme un modèle conceptuel d'explication. De nos jours, quand on parle de « modèles climatiques », on pense généralement à des applications informatiques complexes dont on tire des connaissances. En principe, il n'est pas obligatoire d'avoir confiance en de tels modèles quand on fait des recherches sur les variabilités climatiques passées pour savoir si des observations directes (listes de températures) et indirectes (cernes d'arbres) sont disponibles. Dans la pratique, la maigreur des archives et la pauvreté des observations font que ces modèles sont largement utilisés pour créer des périodes synthétiques lors de recherches sur les cycles climatiques. Enfin, le système climatique étant complexe en général, et en Afrique

occidentale particulièrement, ces modèles sont indispensables à l'étude du climat futur. Un court résumé de leur justification, de leurs principes et de leur fonctionnement est indiqué pour faire apparaître les projections actuelles pour le bassin du Niger.

Les deux prochaines parties donnent un bref aperçu des deux grandes approches de la modélisation climatique fondée sur une synthèse de Lister qui peut être consultée pour plus de détails (Lister *et al* 2001).

Les méthodes empiriques/statistiques

Les méthodes empiriques reposent sur des indicateurs (surtout les anomalies de température à la surface de la mer : les SSTA) considérés comme des éléments prévisionnels du climat d'une région donnée au moyen d'analyses statistiques de leurs relations avec un ensemble de données prévisionnelles observées. Des premières approches comprenaient l'analyse de périodes historiques à extrapoler fondée sur la persistance d'évolutions**,** sans chercher la cause possible de ces évolutions. Une autre option simple est l'utilisation de séquences climatiques analogues en partant du fait qu'il y a une persistance dans les comportements. Au cours des dernières décennies, ont été mises au point des méthodes toujours plus inventives d'analyse statistique :

- la simple corrélation qui quantifie la force de la relation entre une période de prédictants et des prédicteurs ; ce qui nécessite souvent une moyenne de SSTA (notamment au moyen des fonctions orthogonales empiriques, les FOE), mais qui ne constitue pas une technique de modélisation prévisionnelle ;
- la régression multiple, véritable outil prévisionnel qui demande généralement une réduction dans la dimension du jeu des prédicteurs pour éviter les « faux mouvements parfaits » ;
- des techniques d'analyse linéaire très variées qui relient des modèles du champ prédictant aux modèles du champ prédicteur 'notamment des analyses des corrélations canoniques, les ACC), la décomposition en valeurs singulières (la DVS) et la modélisation inversée ;
- des méthodes d'optimisation non linéaire fondées sur la préparation de variables prédictrices parmi lesquelles des analyses discriminantes et des liens neuraux capables de gérer de très nombreuses données, donnant des produits de probabilité liés à la climatologie à long terme (et non un simple résultat dans le cas d'analyses de régression).

Les méthodes numériques/dynamiques

Si les approches empiriques/statistiques permettent l'identification de liens entre prédicteurs et prédictants, des techniques plus élaborées, basées sur des lois physiques, sont nécessaires pour faire des recherches sur les processus en jeu qui se cachent derrière ces liens. On peut les catégoriser comme une fonction de leur maniement des interactions océan/atmosphère. À l'origine, les méthodes semi-dynamiques dépendaient des SSTA comme d'une frontière absolue (et persistance, comme on le croyait) et se focalisaient sur la simulation de la réponse atmosphérique. Elles ont été largement supplantées par l'approche à « deux niveaux » selon laquelle les GCM prédisent l'évolution des SSTA utilisées à leur tour comme limite aux GCM atmosphériques (AGCM). Ces dernières approches, plus complexes, donnent des modèles océano-atmosphériques totalement couplés qui permettent aux deux composantes d'évoluer en

toute liberté et d'interagir. Des modèles océano-atmosphériques plus récemment couplés ont commencé à inclure également les couches limites à la surface de la Terre.

On peut reprendre la même classification pour les modèles de prédiction des SSTA qui varient, en devenant de plus en plus complexes, de modèles océaniques intermédiaires à des modèles océaniques hybrides et pour les modèles totalement couplés. Selon Stockdale, les méthodes dynamiques ont des avantages sur les approches empiriques/statistiques car elles peuvent gérer des situations sans précédent et traiter des combinaisons de facteurs qui ne peuvent être, d'après les quelques rares observations dont nous disposons, analysées de façon empirique (Stockdale *et al*. 1998 cité par Lister *et al*., 2001).

Cependant, de nombreux défauts subsistent : le manque d'observations locales empêche toute estimation certaine sur plusieurs décennies, impose donc des limitations pratiques à la validation des modèles climatiques et entrave leur fonctionnement dans la région (Ward, 1998). Si les systèmes d'observation par satellite pallient la pauvreté des mesures, leur faible couverture dans le temps (environ deux décennies) ne peut soulager les contraintes imposées par le manque de données historiques requises pour valider les simulations des variations climatiques en Afrique occidentale à des périodes interdécennales ou plus longues.

Clivar (1999) note que les modèles les plus actuels ont été réglés de façon à maximiser les fonctionnements dans la région pacifique pour des périodes interannuelles. Dans l'ensemble, ils ne semblent pas bien fonctionner sur l'Afrique occidentale tropicale pour la période interannuelle à l'inverse des régions où l'ENSO est le principal modulateur climatique. Une interprétation saisonnière des modèles couplés de l'Océan atlantique et de l'Océan indien apparaît elle aussi bien modeste.

Les divergences de prévisions des précipitations saisonnières sont dues à la mauvaise simulation d'un cycle saisonnier, à la sous-représentation des forçages planétaires et à la faible interaction entre la convection de cumulus et la surface sous-jacente (paramétrisation inadéquate des processus de convection en Afrique). Les interactions entre les systèmes de circulation hémisphériques et locaux risquent de ne pas apparaître dans les données de ré-analyse, à cause d'un manque d'observations en Afrique et sur les moussons océaniques avoisinantes (Clivar, 1999).

La plupart des modèles couplés océano-atmosphériques prévoyaient des changements climatiques sans tenir compte des conditions à la surface de la Terre (Hulme, 2001). Il en va de même pour les simulations de GCM atmosphériques forcées par les SST (Quan *et al.*, 2003).

Schéma d'ensemble pour des prévisions plus avancées

Outre l'apport d'une meilleure compréhension (et schématisation) du climat régional, savoir faire des prévisions justes peut s'avérer très avantageux (notamment lors de périodes saisonnières et interannuelles) pour l'hydrologie et l'agriculture, deux facteurs particulièrement importants pour les populations vivant dans le bassin du Niger. Cependant, le niveau d'incertitude que contiennent les prévisions de GCM a été démontré par des différences entre les modèles sur plusieurs régions (Braconnot *et al*.,

2000 sur le Projet d'Intercomparaison de Schématisation Paléoclimatique). Cela a provoqué une plus grande dépendance de l'ensemble des prévisions incluant des schémas multiples.

Evolution et projections des ressources en eau dans le bassin du Niger

On a vu que de complexes rétroactions entre un ensemble unique de facteurs façonnent l'exceptionnelle sensibilité climatique de l'Afrique occidentale illustrée par de multiples modes de variabilité qui empêchent l'interprétation de modèles actuels et même la prévision du climat passé. Face à ce lot d'incertitudes, comment prévoir le climat de la région au XXIe siècle ? Dans quelle mesure peut-on se fier à ces projections ? Les conditions de sécheresse vont-elles persister, régresser, empirer ? Quel sera l'impact sur les ressources en eau dans le bassin ?

Le climat SRES change les scénarii : l'ensemble de référence des projections pour le XXIe siècle

Cela comprend : les variabilités naturelles à l'échelle planétaire et des forçages anthropogéniques par des émissions de GHG (gaz à effet de serre). Cela ne comprend pas : l'impact de l'accroissement de la population sur l'utilisation de la terre et du sol.

L'évolution des précipitations révèle un résultat incertain pour le Sahel et pour l'Afrique occidentale : est-ce un témoin des limites actuelles des modèles ? Seront abordées ici les incertitudes toujours grandes des prévisions climatiques sur le bassin du Niger (schémas du SRES, IPCC, 2001).

Évolution des températures : réchauffement très probable du bassin, entraînant une très probable hausse des taux d'évapotranspiration.

Forte probabilité d'une hausse des températures et évolution incertaine du régime des précipitations avec, pour conséquence, des modifications du budget eau/énergie (plus de catastrophes climatiques, changement possible des LGP (gaz de pétrole liquide) et de la durée des précipitations, redistribution intrasaisonnière des pluies). Possible impact négatif d'une trop grande évapotranspiration sur les ressources en eau, sur l'ensemble du bassin.

Le delta du Niger : un futur Lac Tchad/Okavango ?

Un titre volontairement provocateur pour aborder la géographie du bassin du Niger et ses effets sur l'évolution des ressources en eau du bassin.

Dans quelle mesure le changement climatique aura un impact sur le bassin du Niger ? La publication en 2001 du « Changement environnemental dans la région de Sahel de l'Afrique occidentale » a permis de revoir notre vision pessimiste de l'avenir des zones semi-arides et sub-humides englobant une grande partie du bassin. Batterbury et Warren (2001) affirment que si les recherches environnementales dans la région se sont concentrées sur « l'urgence de la sécheresse », peu de progrès a été fait pour la compréhension des processus biophysiques (notamment climatiques) en jeu et que ces recherches ont eu peu d'impact sur notre mode de vie et nos comportements sociaux. L'auteur a démontré les capacités d'adaptation propres aux sociétés et à la nature

façonnée par des siècles de variabilités climatiques. Il suggère également que les dynamiques humaines (croissance de la population, urbanisation, diversification des systèmes, décentralisation...) sont davantage responsables des changements climatiques dans la région (Raynaut, 2001). Il remet en cause le mythe de la dépendance (Mortimore *et al*., 2001) incluant la dépendance climatique et d'autres « paradigmes d'équilibre » de l'écosystème évalués depuis longtemps par des chercheurs et d'autres acteurs du développement « externes ».

Tendances des ressources en eau

Introduction

Les populations du bassin du Niger sont confrontées à plusieurs types de problèmes liés à l'eau tels que les pénuries en eau, les maladies hydriques, les inondations, etc. Ces problèmes ont des causes dans lesquelles se conjuguent intimement :

- des contraintes naturelles résultant des conditions environnementales peu favorables à la reconstitution et à la mobilisation des ressources en eau : climat , végétation, sol et sous-sol ;
- des facteurs humains contribuant à la surexploitation et à la dégradation des ressources : croissance démographique, pauvreté, urbanisation, industrialisation, développement de l'agriculture, etc.

Des conditions naturelles, en particulier une sécheresse prolongée et l'augmentation de la pression humaine sur un milieu fragile, ont provoqué des ruptures profondes d'équilibre des ressources en eau et des écosystèmes du Bassin du fleuve Niger. Les principaux constats relevés sont :

- une dégradation des conditions de vie des populations ;
- une diminution significative des ressources en eau (sévérité des étiages et baisse du niveau des nappes) ;
- une réduction de la diversité biologique, en particulier par perte d'habitat ;
- une prolifération des végétaux flottants ;
- un ensablement des lits et des cuvettes ;
- une pollution due à un contrôle insuffisant des rejets dans le fleuve ;
- et le manque de synergie entre les différentes institutions responsables de la protection et de la gestion des ressources au niveau des pays et pour l'ensemble du bassin du fleuve Niger.

Climat

Le climat au Mali est de type tropical caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche (de 6 à 9 mois) et d'une courte saison humide au cours de laquelle se produit la presque totalité des précipitations dont les moyennes varient de 1 200 mm à 150 mm ou moins.

La période de sécheresse qui a commencé en 1970 a entraîné des déficits pluviométriques de l'ordre de 30 % et un déplacement des courbes isohyètes de près de 200 km vers le sud (figure 10).

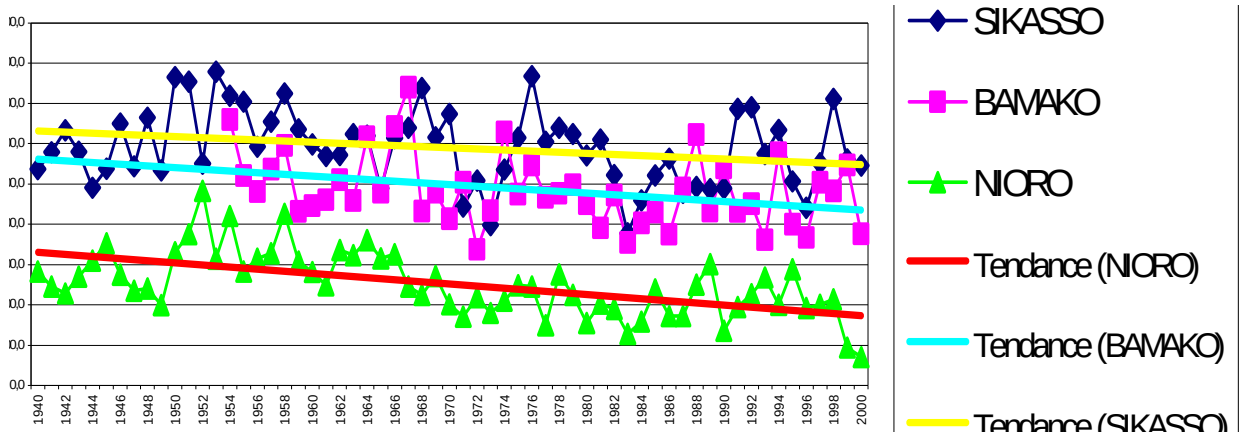


Figure 10 - Tendances de la pluviométrie au Mali

La collecte des données sur le climat est réalisée grâce à un réseau de stations permettant d'obtenir des informations sur les précipitations, l'évaporation et leurs facteurs conditionnels (température, humidité et vents). Par rapport à l'immensité du bassin au Mali, la densité du réseau de stations est plutôt lâche par rapport aux normes recommandées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) :

- 1 poste pluviométrique pour 2 500 km^2 contre 1 pour 600 à 900 km^2 pour les régions tropicales planes ;
- 1 station climatologique pour 12 500 km^2 contre ;
- 1 station synoptique pour 27 000 km^2.

Le tableau 1 donne quelques caractéristiques climatiques sur l'ensemble du bassin du Niger (température T, humidité relative U et précipitations interannuelles).

Le climat du bassin du Niger supérieur est caractérisé, au Mali, par l'alternance très prononcée entre une saison sèche dominée par des vents secs venant du Sahara (Harmattan) et une saison pluvieuse de 3 à 6 mois (entre mai et octobre) avec des vents humides venant du Golfe de Guinée (mousson). Les vents sont en général plus forts dans la zone soudano-sahélienne que dans la zone soudanaise.

Sur l'ensemble du bassin, les températures les plus élevées sont enregistrées en avril et en mai, tandis que les minimales sont observées dans la période de décembre à janvier (tableau 1).

L'humidité relative (rapport entre la tension de vapeur d'eau dans l'atmosphère et la tension de vapeur saturante à même température) est, contrairement aux températures, plus faible au nord qu'au sud du bassin. Elle est en moyenne de 40 % dans la région de Ségou-Markala-Mopti et se situe autour de 60 % au sud du bassin (tableau 1).

En général, les valeurs de l'ETP sont assez fortes au sud (200 mm/an) mais encore plus élevées dans le nord du bassin, notamment pendant la période de mars à mai. Cette caractéristique résulte de l'effet conjugué des températures souvent élevées, des humidités relatives faibles et, surtout, de l'effet desséchant de l'Harmattan.

Paramètre	Bamako	Ségou	Mopti	Tombouctou
T°moy. Annuelle	28,5	28,6	27,7	29,1
T°max - (mois) *	39,4 - (4)	41,2 - (4)	40,0 - (5)	4 3,2 - (5)
T°min - (mois) *	17,6 - (1)	15,4 - (1)	14,0 - (1)	(1)13,0 - (1)
Ü max ann en % **	73	74	75	54
Ü min ann en % **	33	32	30	21
(Ü max + Ü min) en mars	26	31	30	21
(Ü max + Ü min) en août	79	80	78	68
P (précipitations interannuelles en mm)	985	650	415	180
Nbre de mois secs ***	7	8	8 à 9	10

* Entre parenthèses, le numéro du mois de température maximum (max) et minimum (min).
** Ü max et Ü min sont respectivement les humidités relatives moyennes annuelles maximales et minimales. (Ü max + Ü min)/2 correspond aux humidités relatives moyennes du mois le plus sec (mars) et du mois le plus humide (août).
*** Suivant la définition de Gaussen, un mois est dit sec lorsque Pmm < 2 T°C.

Sources : Quensière, 1994

Tableau 1 : Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger

Le bassin du fleuve au Mali est sous l'influence du climat tropical dans lequel les précipitations annuelles varient de moins de 200 mm au nord à plus de 1 100 mm au sud. Les régimes pluviométriques sont caractérisés par l'alternance d'une saison sèche (dont la durée varie de 5 mois dans la partie sud à 9 mois au nord) et d'une saison humide, ou hivernage, qui débute en avril-mai et se termine en octobre-novembre.

La hauteur annuelle de pluie et la durée de la saison des pluies sont les principaux facteurs déterminants les quatre zones agro-écologiques ci-après (du sud au nord) :

- la zone soudano-guinéenne située sur et au sud de la ligne Bougouni-Sikasso et couvrant le Niger supérieur et le Haut Bani, avec une saison de pluies durant sept à huit mois (avril - mai à octobre - novembre) et des précipitations annuelles dépassant 1 100 mm (*cf.* Sikasso sur la figure 11),

- la zone soudanienne centrée sur la ligne Bamako–Ségou-San avec une saison pluvieuse de six mois (mai à octobre) et des précipitations annuelles variant de 1 100 à 600 mm (*cf.* Bamako - Sénou sur la figure 11),
- la zone sahélienne centrée sur la ligne Mopti–Gao et couvrant le delta central et la partie sud de la boucle du Niger avec une saison des pluies de trois mois (juillet à septembre) et des précipitations annuelles comprises entre 600 et 200 mm (figure 12),
- et la zone saharienne ou désertique centrée sur la ligne Diré – Tombouctou – Bourem et couvrant la partie nord de la boucle du Niger avec une saison des pluies réduite à deux mois (mi-juillet à mi-septembre) et des précipitations annuelles inférieures à 200 mm (figure 13).

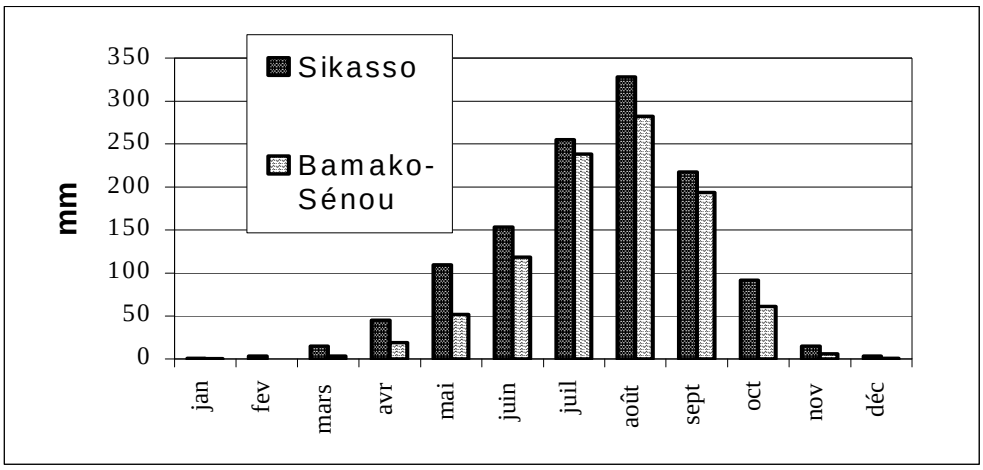


Figure 11 – Histogramme des pluies mensuelles à Sikasso et à Bamako-Sénou (normale climatologique 1951-80)

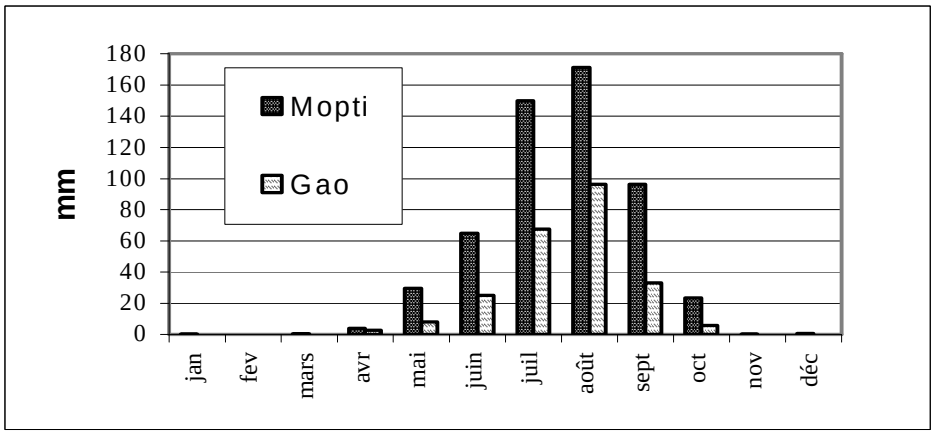


Figure 12 - Histogramme des pluies mensuelles à Mopti et Gao (normale climatologique 1951-80)

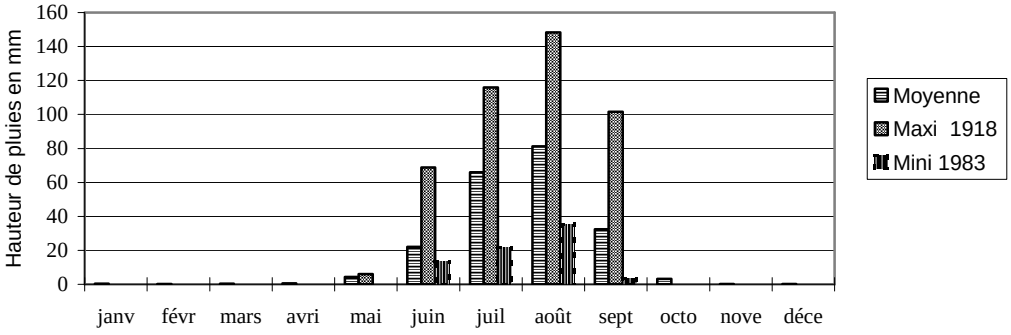


Figure 13 - Répartition mensuelle de la pluie à Tombouctou

Depuis 1970, le déficit pluviométrique se caractérise non seulement par une rigueur et une persistance exceptionnelles, notamment dans les régions sahéliennes, mais également par une extension spatiale vers les régions plus humides au sud. Le déficit pluviométrique de la période après 1970 s'est traduit par une réduction des hauteurs annuelles de pluie de l'ordre de 20 à 50 % par rapport à la période avant 1970, soit 50 à 500 mm par an ; ce qui correspond à une descente vers le sud d'environ 100 km.

Eaux de surface

L'une des caractéristiques du fleuve Niger et ses affluents est la variabilité interannuelle et intersaisonnière des écoulements (figures 14 et 15). En effet, le régime hydrologique commun à tous ces cours d'eau est fortement dominé par les facteurs climatiques (précipitations) des hauts bassins situés en République de Guinée. Il est marqué par une importante variation saisonnière des débits entre la période de hautes eaux (crue) qui se situe entre juillet et novembre selon les cas, et celle de basses eaux (étiage) avec des débits quasi nuls dans certains cas vers avril - mai. Les crues démarrent vers la fin du mois de juin. La montée des débits est très rapide. Le maximum est atteint entre fin septembre et début octobre pour le haut Niger à Koulikoro, soit avec un léger décalage par rapport au maximum des pluies.

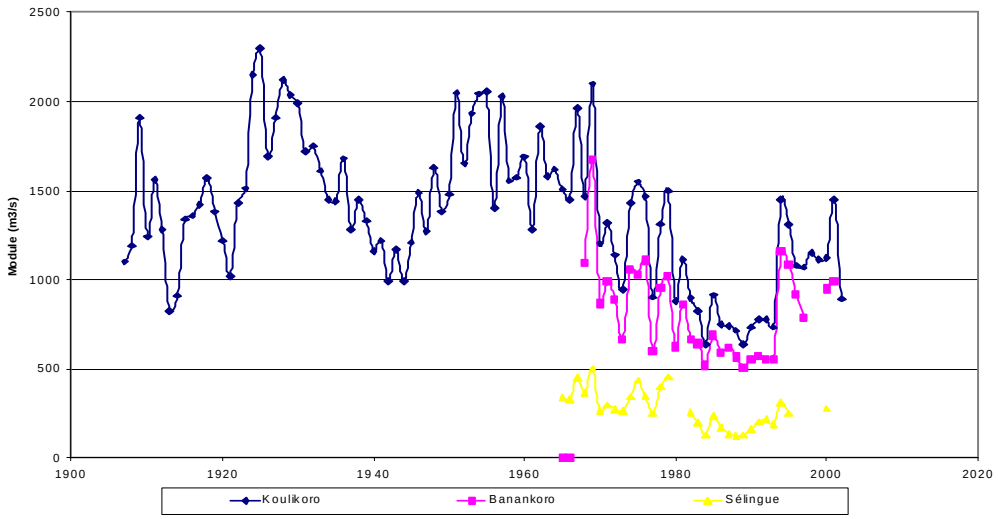


Figure 14 - Module du Niger et du Sankarani (période 1907-2002)

Plus de 80 % du volume des crues s'écoulent entre août et fin octobre sauf dans le delta central du fleuve Niger et en aval où la propagation des crues est plus lente compte tenu de la topographie des lits et du niveau avancé de leur encombrement par les bancs de sable.

Dans le delta central du fleuve qui couvre une superficie estimée à plus de 30 000 km^2 , les pertes d'eau par évaporation, infiltration et alimentation des lacs et des mares sont de 40 à 60 % des débits d'entrée du haut Niger et du Bani.

En raison de sa morphologie générale, le delta intérieur fonctionne à l'inverse d'un bassin versant, le fleuve et ses principaux bras jouant le rôle de « distributaires » de l'eau dans la cuvette.

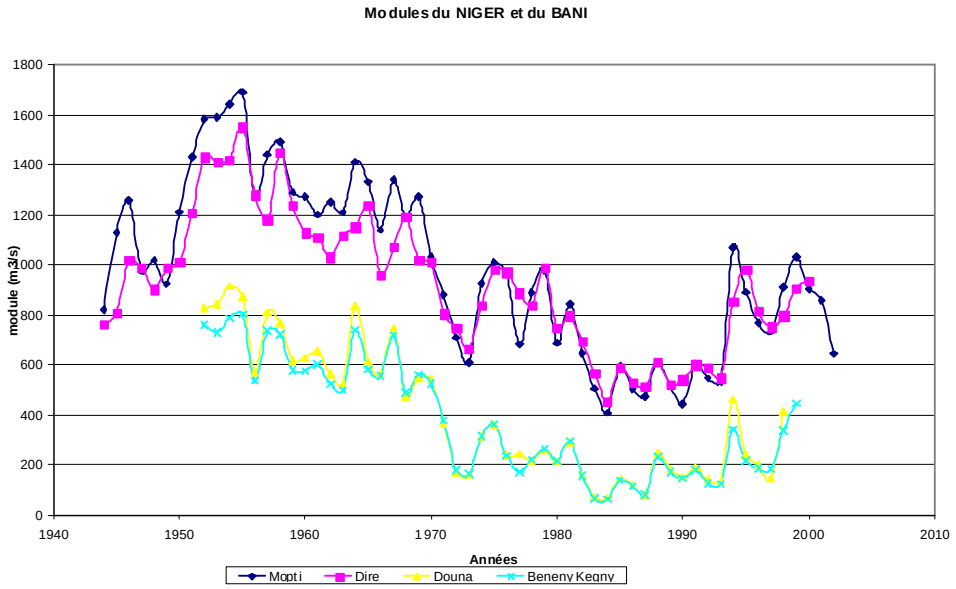


Figure 15 - Modules du Niger et du Bani à Diré, Mopti, Douna et Bénény Kégny

Potentialités des eaux de surface

Le débit moyen annuel du Niger à Koulikoro est de 1 330 $m^3.s^{-1}$, soit un volume annuel de 42 milliards de m^3. Les valeurs extrêmes observées en année humide comme en 1967 et en année sèche comme en 1984 sont, respectivement, de 1 959 $m^3.s^{-1}$, soit 62 milliards de m^3, et de 636 $m^3.s^{-1}$, soit 20 milliards de m^3.

Le débit moyen annuel du Bani est de 423 $m^3.s^{-1}$, soit un écoulement annuel de 13 milliards de m^3. Les valeurs extrêmes observées en 1967 et en 1984 sont, respectivement, de 753 $m^3.s^{-1}$, soit 24 milliards de m^3, et 70,1 $m^3.s^{-1}$, soit 2 milliards de m^3.

Les apports du Sankarani à Sélingué varient entre 200 et 400 $m^3.s^{-1}$, soit un volume de 6 à 12 milliards de m^3 selon l'hydraulicité de l'année.

La mise en eau du barrage en 1982 a fortement modifié le régime du fleuve Niger en aval de la confluence avec le Sankarani. En effet, les débits retenus dans la retenue entre août et septembre sont entièrement restitués à l'aval dès que les apports du Sankarani sont inférieurs aux besoins d'eau pour la production électrique. Les débits turbinés augmentent au fur et à mesure que la retenue se vide compte tenu, d'une part, de l'augmentation de la demande d'énergie pendant les fortes chaleurs et, d'autre part, de la baisse de la chute utilisable du barrage faute d'apports suffisants pendant la saison sèche. Le barrage soutient ainsi considérablement les étiages du fleuve Niger.

Ainsi, le fleuve Niger et ses principaux affluents (le Sankarani et le Bani) ont un écoulement moyen annuel de 1 750 $m^3.s^{-1}$, soit un volume de 55 milliards de m^3. Les

valeurs extrêmes observées sont de 2 703 $m^3.s^{-1}$, soit 85 milliards de m^3 en 1967, et de 706 $m^3.s^{-1}$, soit 22 milliards de m^3 en 1984.

En dépit des apports supplémentaires du Bani (environ 500 $m^3.s^{-1}$ à Douna), le module du Niger à Mopti est nettement inférieur à celui à Koulikoro.

Les écarts à la moyenne du module annuel sont illustrés dans les graphiques 16 et 17.

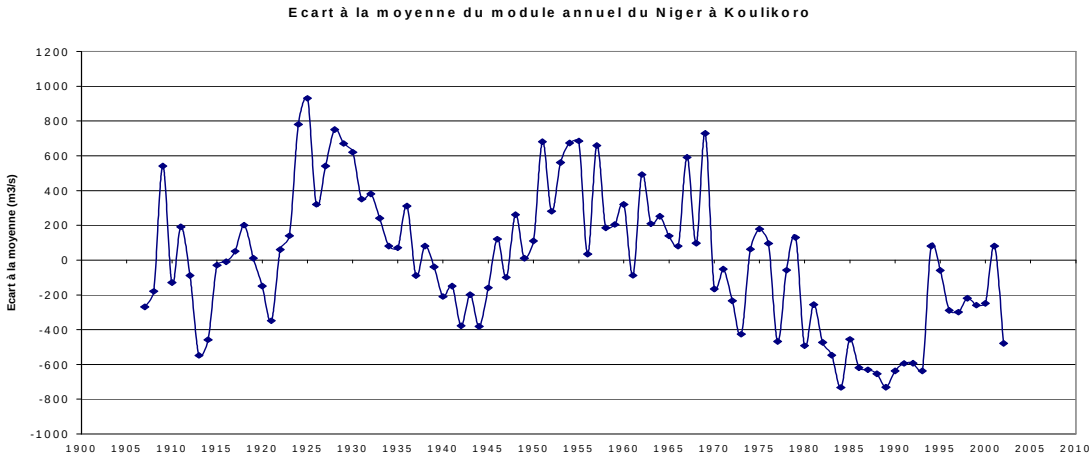


Figure 16 - Écarts à la moyenne du module moyen annuel du Niger à Koulikoro

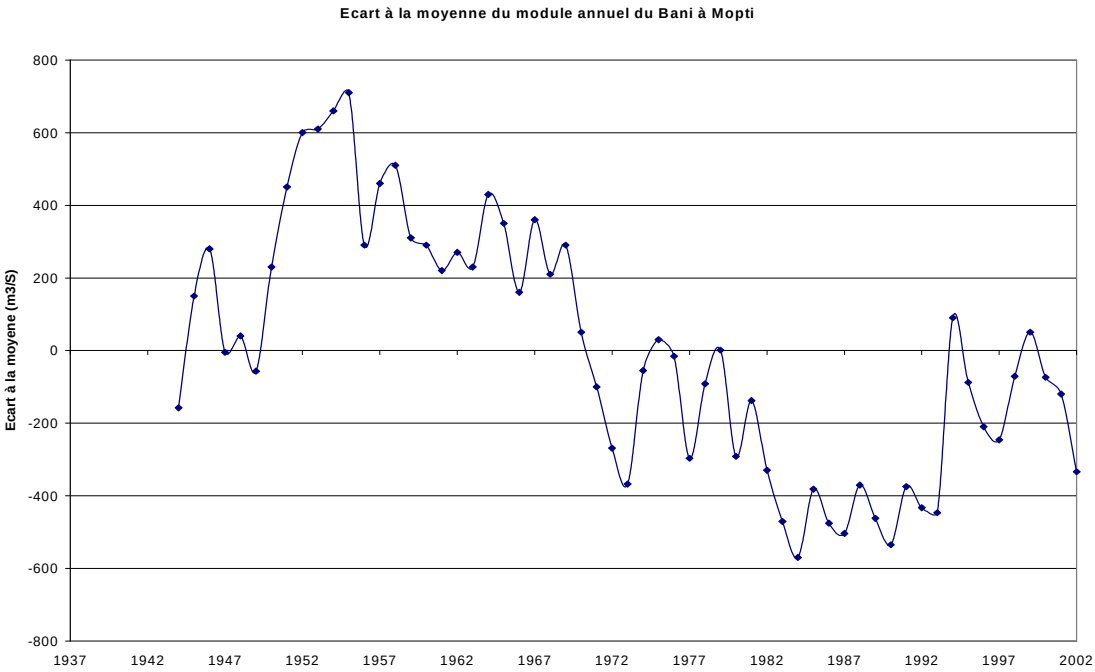


Figure 17 - Écarts à la moyenne du module annuel du Bani à Mopti

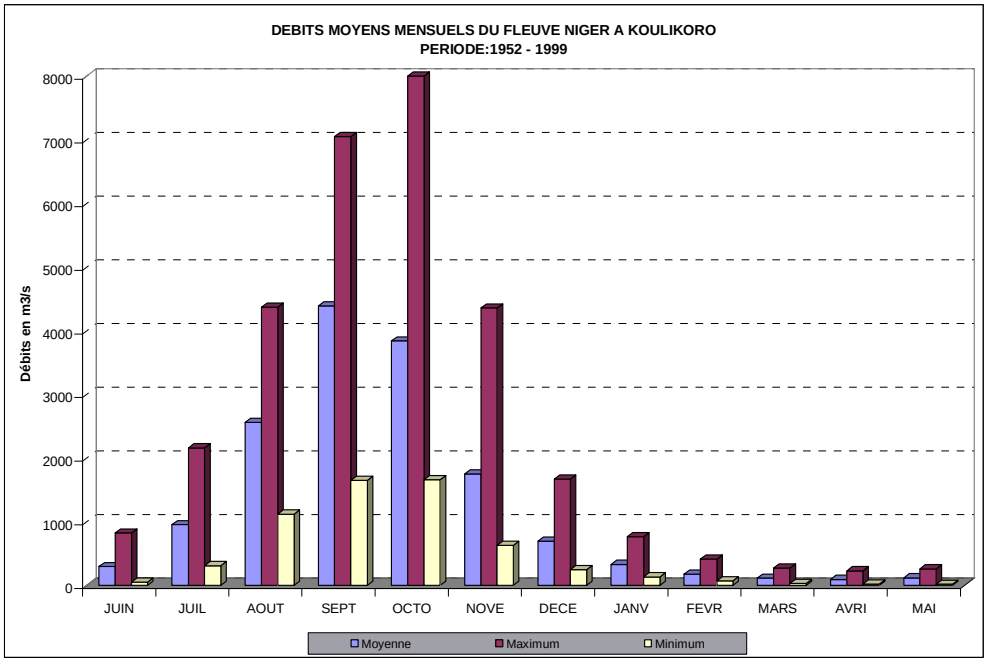


Figure 18 - Débits moyens mensuels du Niger à Koulikoro

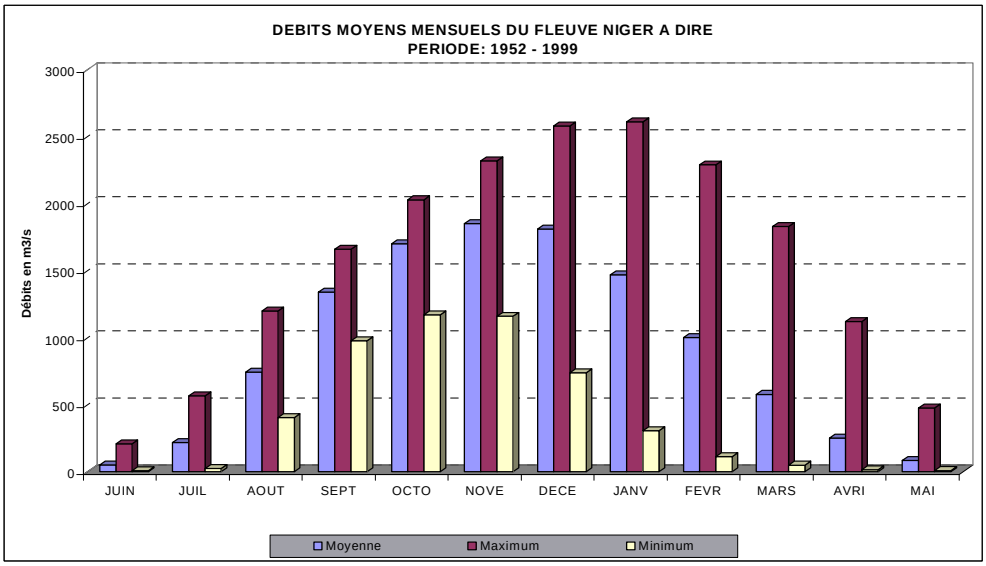


Figure 19 - Débits moyens mensuels du Niger à Diré

Fleuves	Stations	Modules (m^3/s)	Volumes écoulés milliards m^3
Niger	Koulikoro	1 280	40,366 08
Bani	Douna	424	13,371 264
Niger	Mopti	974	30,716 064
Niger	Dire	926	29,202 336
Niger	Ansongo	864	27,247 104

Tableau 2 - Volumes moyens interannuels écoulés dans les principaux cours d'eau du Mali entre 1952 et 1999

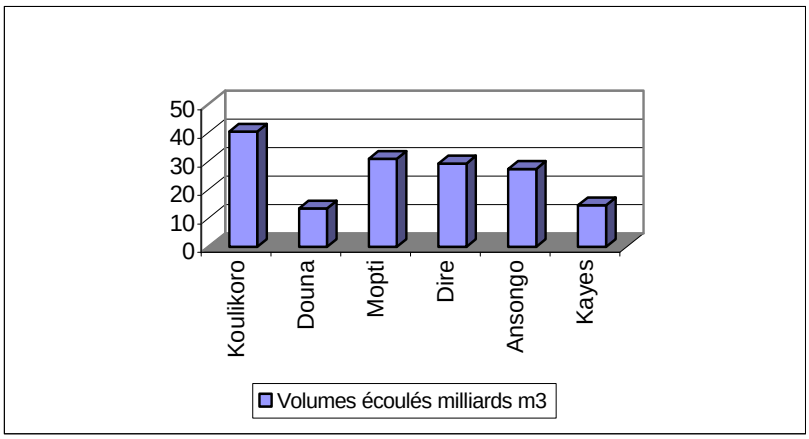


Figure 20 - Volumes moyens interannuels écoulés dans les principaux cours d'eau du Mali (1952-99)

Eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent un potentiel très important et généralement de bonne qualité mais inégalement reparties et parfois difficilement mobilisables. Elles contribuent cependant pour 85 à 90 % à l'approvisionnement en eau potable des populations, mais ne jouent qu'un rôle très accessoire pour l'irrigation en raison de leur coût de mobilisation.

Les réserves sont classées en trois grandes catégories selon le mode de gisement des eaux : les aquifères généralisés, les aquifères fissurés et les aquifères superficiels (tableau 3).

Les aquifères généralisés

Les aquifères généralisés sont associés aux formations détritiques peu ou non consolidés et d'origine essentiellement continentale qui se sont accumulés dans les bassins sédimentaires au Secondaire et au Tertiaire. Ces aquifères sont généralement multicouches avec une porosité intergranulaire et occupent un peu plus de la moitié du territoire national. Ils renferment des eaux anciennes et généralement non renouvelables à cause de la faiblesse des précipitations et de leur profondeur souvent trop élevée ne permettant pas leur réalimentation périodique.

Les débits des forages de ces aquifères sont supérieurs à 10 $m^3.h^{-1}$ pour plus de la moitié des cas et peuvent même dépasser 50 $m^3.h^{-1}$ dans certains cas.

Les aquifères fissurés

Ces aquifères sont associés aux formations cristallines (socle) ou sédimentaires anciennes du Précambrien et du Primaire. Ils sont caractérisés par des nappes semi-continues ou discontinues en fonction de la densité des réseaux de fracturation qui les affectent.

Les aquifères discontinus

Ces aquifères sont localisés en zone sahélienne ou désertique avec des précipitations annuelles inférieures à 500 mm. Les formations de recouvrement sont peu importantes et ne renferment que des nappes superficielles d'extension locale dans les bas-fonds et perchées au-dessus de la nappe fissurée du substratum. La réalimentation de ces nappes par infiltration directe est significative pour les zones à pluviométrie supérieures à 400 mm. Pour les zones à plus faible pluviométrie, elle se fait d'une manière indirecte par infiltration des eaux de ruissellement. Les débits des forages de ce type sont supérieurs à 5 % dans 30 % des cas.

Les aquifères semi-continus

La situation géographique de ces aquifères leur permet de bénéficier d'une pluviométrie élevée, de plus de 600 mm, et donc d'une recharge saisonnière qui se manifeste par des remontées de plusieurs mètres pendant l'hivernage. Le débit moyen des forages est de l'ordre de 5 $m^3.h^{-1}$. Environ 30 à 40 % des forages ont des débits supérieurs à 5 $m^3.h^{-1}$ tandis que 10 à 20 % ont des débits supérieurs à 10 $m^3.h^{-1}$.

Les aquifères superficiels

Les aquifères superficiels gisent dans les formations de recouvrement et d'altération du Quaternaire. Dans les zones à faible pluviométrie, ces aquifères sont perchés et localisés dans les bas-fonds tandis que, dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes, ils sont semi-continus.

Le régime des eaux souterraines

Les résultats du suivi des niveaux piézométriques ont mis en évidence les évolutions suivantes :

- tous les aquifères fissurés situés dans les secteurs de pluviométrie supérieure à 400 mm présentent des fluctuations de niveaux saisonnières notables (de moins de 1 m à plus de 15 m), tandis que les variations interannuelles ne sont que de quelques dizaines de cm : ce qui témoigne de la faible capacité de régularisation de ces aquifères. Ceci explique l'abaissement généralisé du niveau des nappes depuis le début des années 1970 consécutif à la longue période de sécheresse ;
- les aquifères généralisés, hormis les secteurs rechargés par les eaux de surface (delta intérieur du Niger notamment), ne présentent pas de variations piézométriques notables.

Type d'aquifère	Stratigraphie	Lithologie dominante	Superficie (km^2)	% superf. du Mali	Profond moy (m)	Débit moyen (m^3/h)
Aquifères généralisés	Continental terminal du Quaternaire	Argile, argiles sableuses, latérites	202 830	16	62	9,0
	Crétacé supérieur et Éocène inférieur	Calcaires, marnes, argiles, sables	138 910	11	136	7,3
	Continental terminal et Continental intercalaire	Sables, argiles sableuses, argiles	208 870	17	88	10,8
	Continental intercalaire	Sables, grés, conglomérats	82 320	7	249	10,4
Aquifères fissurés	Primaire de Taoudeni	Calcaires, grés	112 700	9	116	20,4
	Cambrien	Schistes, sables, calcaires, grés	66 060	5	57	6,3
	Infracambrien tabulaire	Grès, grès schisteux, schistes	174 810	14	63	5,6
	Infracambrien plissé et métamorphique	Schistes, calcaires, quartzites	97 420	8	92	7,0
	Socle granitique et métamorphique	Granites,schistes, micaschistes,	156 080	13	58	5,3
Aquifères superficiels	Quaternaire	Argiles, sables, graviers	dispersée	–	–	–

Tableau 3 - Principaux aquifères du Mali

Les réserves des aquifères du Mali sont estimées à 2 700 milliards de m^3 avec un taux de renouvellement annuel de 55 milliards m^3. Seulement 106 millions de m^3 sont actuellement exploités par an, soit 0,2 % des réserves.

Amplitude des fluctuations saisonnières

Cette amplitude dépend de plusieurs facteurs : la pluviométrie, les caractéristiques hydrauliques des aquifères, leur épaisseur, la nature lithologique et la granulométrie des terrains dénoyés.

Les fluctuations saisonnières ont des amplitudes variant entre 0,8 m (à Yanfolila en 1989) et 12 m (à Sirakoroba en 1988) pour les aquifères du socle (figure 21). Les oscillations des nappes de l'infracambrien tabulaire (figure 22) ont des amplitudes variant entre 0,51 m (à Sikasso en 1993) et 17,7 m (à Koutiala en 1988).

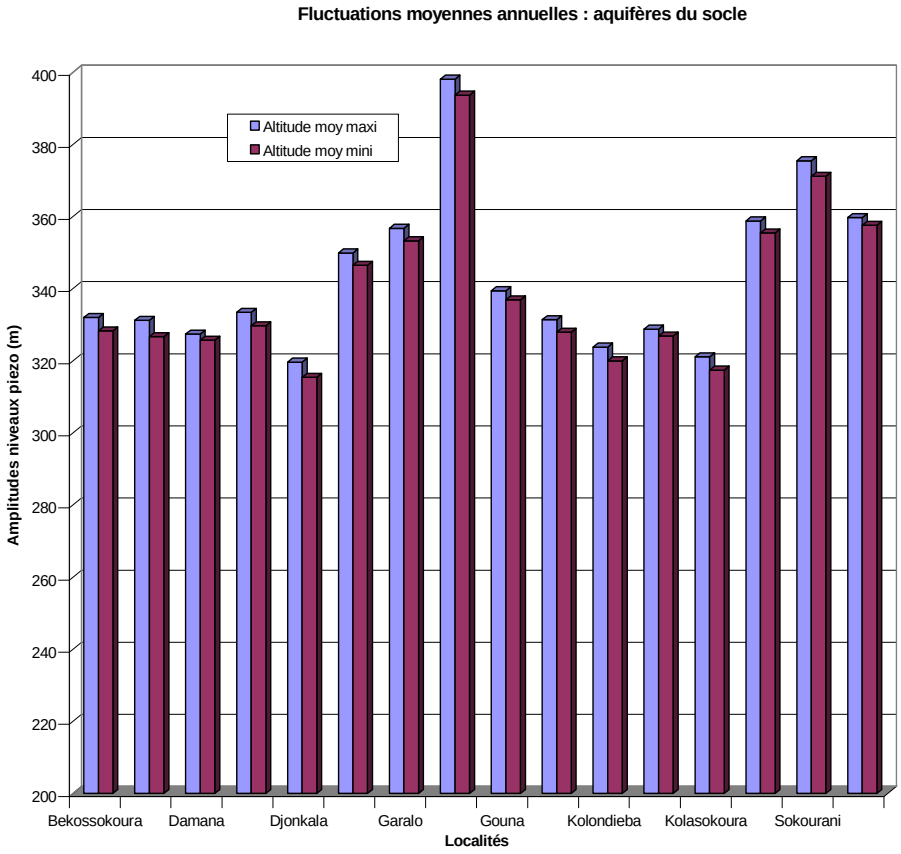


Figure 21 - Fluctuations moyennes annuelles (aquifère du socle)

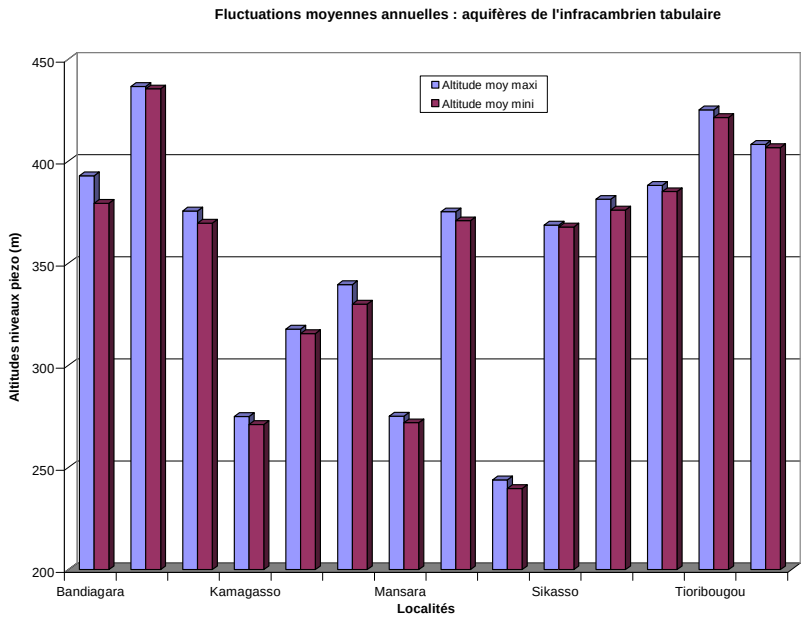


Figure 22 - Fluctuations moyennes annuelles (aquifère de l'infracambrien tabulaire)

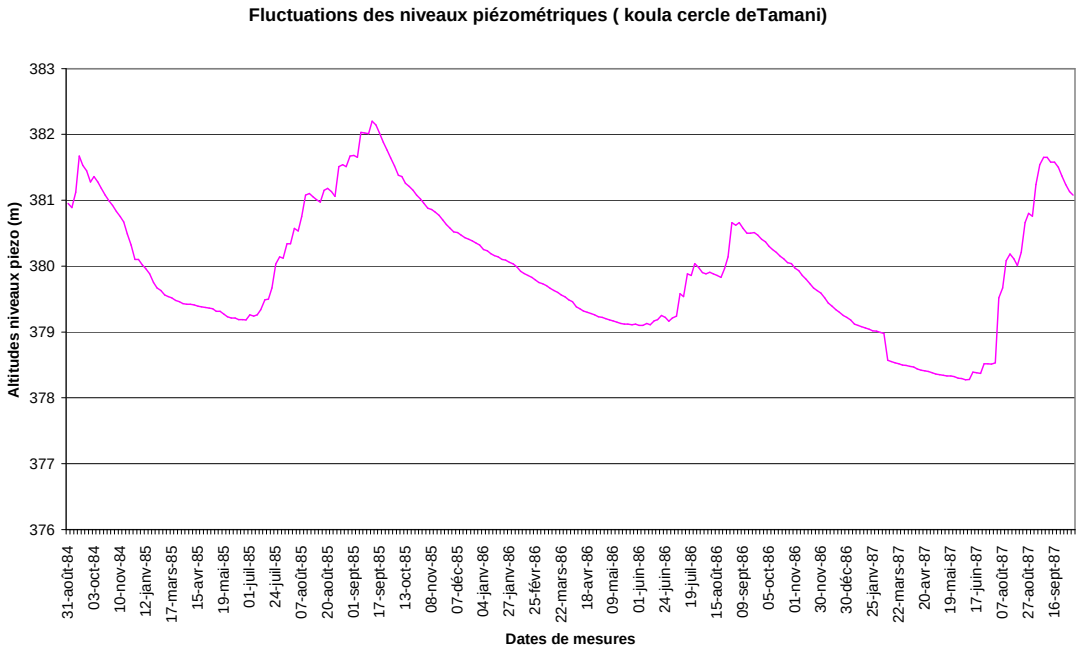


Figure 23 - Fluctuations du niveau piézométrique (à Tamani)

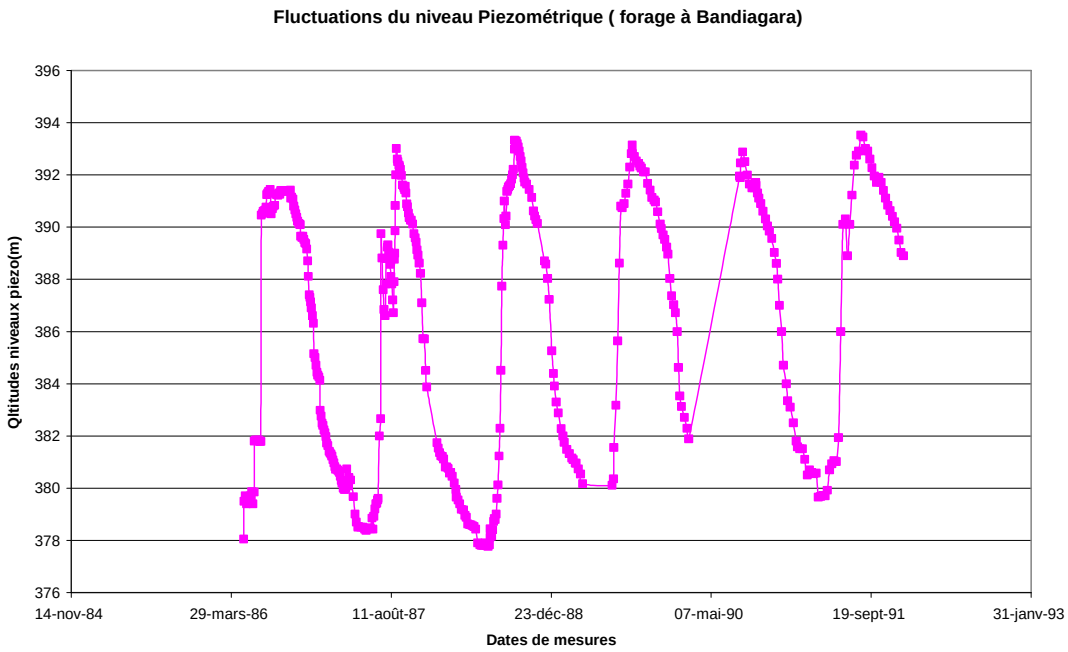


Figure 24 - Fluctuations du niveau piézométrique (Bandiagara)

 © IRD éditions 2007

Qualité de l'eau du fleuve Niger

Qualité des eaux de surface

Il existe plusieurs études récentes sur la chimie de l'eau du fleuve Niger (Pallangié, 1998 ; Picouët, 1999). Grâce au projet Ghenis, un réseau d'alerte et de suivi de la qualité de l'eau pour l'ensemble du bassin supérieur a été établi. Dans le cadre de ce projet, les analyses ont été effectuées de manière régulière de 1999 à 2001 afin de compléter une série chronologique suffisante de données.

Les analyses ont été effectuées en partie sur le terrain et, en partie, au laboratoire. Elles portent sur des paramètres physico-chimiques généraux (pH, température, turbidité, conductivité électrique, oxygène dissous) et sur les concentrations en éléments majeurs et en composés azotés. Certaines analyses de DBO, de coliformes, de pesticides et de métaux lourds ont été ponctuellement réalisées.

Les analyses ponctuelles de pesticides et de métaux lourds ont été effectuées aux Pays-Bas en 1995 et 1996. Certains échantillons prélevés en septembre 2000 ont subi des analyses pour la recherche de métaux lourds et de pesticides au Laboratoire National de la Santé et au Laboratoire Central Vétérinaire de Bamako.

Les résultats des mesures effectuées jusqu'ici sur les eaux du Niger et de ses affluents indiquent que la pollution physico-chimique n'est pas alarmante. Par contre, la qualité bactériologique est mauvaise (coliformes totaux et fécaux > 100 colonies pour 100 ml). Le cachet chimique des eaux du Niger et du Bani reste fortement tributaire du lessivage du substratum rocheux et des sols cultivés (usage d'engrais) par les eaux météoriques chargées de gaz carbonique. Ainsi, les eaux du Niger provenant du haut bassin dominé par des roches granitiques (socle Birimien) ont un excès de sodium et de silice avec un aspect légèrement bicarbonaté tandis que les eaux du Bani drainant un domaine gréseux (Infracambrien) ont un excès de calcium et de bicarbonates (figure 25).

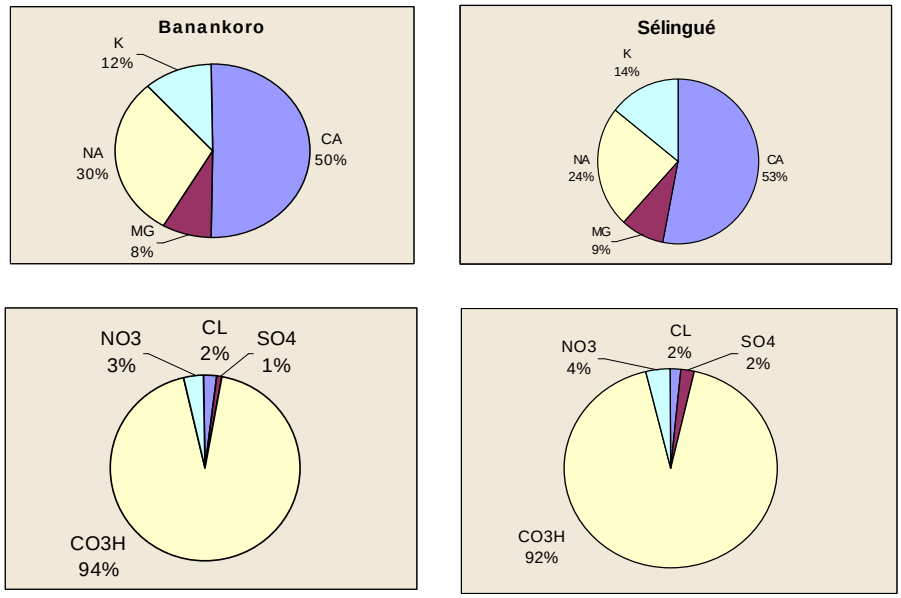


Figure 25 - Composition ionique des eaux du Niger à Banankoro et du Sankarani à Sélingué (proportion moyenne interannuelle de chaque cation et anion en mg/l)

Les concentrations en éléments majeurs vérifient ainsi les relations suivantes qui doivent être obtenues pour les eaux de surface naturelles :

$HCO_3^- > Cl^- + NO_3^- + SO_4^{2-}$

$Ca^{2+} > Na+ > K+ \geq Mg^{2+}$

La composition ionique est la même pour les eaux du Niger et de son affluent, le Sankarani.

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement, mais très approximativement, la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (tableau 4).

La conductivité électrique à 25° C mesurée au laboratoire est en moyenne de 41,1 $\mu S.cm^{-1}$ et de 44,5 $\mu S.cm^{-1}$ pour les mesures effectuées sur le terrain. La conductivité étant un paramètre très variable, il faut se référer aux mesures de terrain. La moyenne étant inférieure à 100 $\mu S.cm^{-1}$, on peut considérer que les eaux du fleuve Niger supérieur sont très peu minéralisées.

Conductivité électrique à 25°C (µS/cm)	Point du réseau	Oct 1999	Fév 2000	Nov 2000
Bamako - Collecteur ENSUP	RSM 22	207	546	35
Bamako - TAO	RSM 19		70	
Bamako - Abattoir et TAMALI	RSM 20		698	250
Bamako - ITEMA	RSM 18			
Koulikoro - Huicoma	RSM 15	224	46	52,3
Ségou - COMATEX	RSM 08	41	192	70,8
Sélingué - rejets agricoles	RSM 29	86	293	39,2

Tableau 4 - Conductivité électrique mesurée au niveau de différents points de rejet pour octobre 1999, février et novembre 2000

Le pH moyen pour les eaux du Niger aux stations de Banankoro, de Koulikoro, de Ké-Macina et à Sélingué est de 7. La concentration des nitrates est comprise entre 0.2 et 15,0 $mg.l^{-1}$.

Les données moyennes pour l'ensemble des stations du réseau de suivi et pour les cinq campagnes d'analyses figurent sur le tableau 5. Nous présentons les valeurs moyennes interannuelles pour les stations de Banankoro, de Koulikoro, de Sélingué et de Ké-Macina dans le tableau 6. Ces stations réparties régulièrement le long du réseau de suivi nous permettront de donner une idée de la qualité globale des eaux du Niger supérieur.

D'autre part, des prélèvements ont été effectués au niveau des rejets d'eaux usées domestiques, agricoles et industrielles afin d'identifier et de quantifier les pollutions potentielles du fleuve (tableau 7).

	CA	MG	NA	K	FE	CL	SO_4	CO_3H	NO_3	TAC	TH	TU	*TT*
Minimum	2	0	0,7	0,2	0,01	0	0	0	0	1	5	7	0
Maximum	44,5	21,5	425	27	1,73	178	16	279	9	239	200	147	43,3
Moyenne	4,69	1,00	4,85	1,43	0,41	2,22	0,42	23,56	1,17	20,4	15,7	25,3	27,1
Ec.-Type	2,03	0,93	14,8	1,42	0,16	8,97	0,92	11,4	0,54	12,9	7,61	10,5	2,68
Coef. Var.	0,45	0,86	1,90	0,87	0,52	3,01	2,07	0,44	0,74	0,58	0,48	0,47	0,10

	COL	COT	PHL	PHT	BI	MADIS	NO_2	PO_4	NH_4	O_2d	% sat O_2
Minimum	16	0	5,8	0	-10,9	17,47	0	0	0	0,04	11,2
Maximum	614	698	11,3	11,6	10,9	1524	0,8	7,4	1,82	10,4	120
Moyenne	54,1	50,7	6,92	6,98	3,55	49,68	0,02	0,36	0,32	6,92	90,16
Ec.-Type	90,2	41,8	0,45		5,59	52,94	0,10	0,51	0,20	0,89	11,3
Coef. Var.	1,22	0,73	0,06	0,25	3,99	0,85	5,42	1,42	0,74	0,12	0,12

Tableau 5 - Données moyennes sur les analyses chimiques réalisées sur 5 campagnes (mai et octobre 1999 ; février, septembre et novembre 2000) pour l'ensemble des points de suivi

	Banankoro	Koulikoro	Ké-Macina	Sélingué	Moyenne
Nb de camp	7	6	7	7	
Débit ($m^3.s^{-1}$)	853.5	1085	969	265	
COL	**45.2** +/-0.3	**38.1** +/- 0.2	**40.2** +/- 0.2	**40.9** +/- 0.1	**41.1**
COT	**49.7** +/- 0.3	**45.6** +/- 0.6	**38.7** +/- 0.2	**43.9** +/- 0.3	**44.5**
TT	**27.1** +/- 0.1	**28.7** +/- 0.1	**27.0** +/- 0.2	**27.5** +/- 0.1	**27.6**
PHT	**7.2** +/- 0.1	**6.8** +/- 0.2	**6.9** +/- 0	**7.1** +/- 0.1	**7.0**
PHL	**7.0** +/- 0.1	**7.0** +/- 0.1	**7.3** +/- 0.1	**7.1** +/- 0.1	**7.1**
O_2 dissous	**7.0** +/- 0.2	**7.3** +/- 0.2	**7.3** +/- 0.1	**7.2** +/- 0.7	**7.2**
% sat	**90.5** +/- 0.1	**92.5** +/- 0.1	**91.3** +/- 0.1	**90.8** +/- 0.1	**91.3**
Ca	**4.6** +/- 0.3	**4.2** +/- 0.2	**4.4** +/- 0.3	**4.5** +/- 0.2	**4.4**
Mg	**0.9** +/- 0.7	**1.3** +/- 0.3	**1.0** +/- 0.4	**0.9** +/- 0.6	**1.0**
Na	**3.1** +/- 0.5	**2.7** +/- 0.3	**2.6** +/- 0.4	**2.4** +/- 0.3	**2.7**
K	**1.4** +/- 0.6	**1.2** +/- 0.2	**1.4** +/- 0.2	**1.3** +/- 0.1	**1.3**
Cl	**0.6** +/- 0.9	**0.8** +/- 0.7	**0.9** +/- 0.6	**0.4** +/- 0.2	**0.7**
CO_3H	**25.5** +/- 0.3	**22.6** +/- 0.2	**23.8** +/- 0.3	**18.7** +/- 0.4	**22.7**
NO_3	**0.8** +/- 0.7	**0.9** +/- 0.9	**0.8** +/- 1	**0.9** +/- 0.9	**0.8**
NH_4	**0.2** +/- 0.8	**0.2** +/- 0.6	**0.3** +/- 0.7	**0.2** +/- 0.6	**0.2**
PO_4	**0.38** +/- 0.9		**0.5** +/- 1	**0.4** +/- 0.7	**0.4**
MADIS	**42.2** +/- 0.2	**41.6** +/- 2	**42.7** +/- 0.1	**42.0** +/- 0.1	**42.1**
TU	**20.3** +/- 0.7	**22.2** +/- 0.8	**27.2** +/- 0.6	**17.1** +/- 0.5	**21.7**

Ca., Mg., Na. ,… : Concentrations en $mg.l^{-1}$; TAC : alcalinité totale ($mg.l^{-1}$ de $CaCO_3$) ; TH : dureté totale ($mg.l^{-1}$ de CaCO3) ; TU : turbidité en UNT ; TT : température mesurée sur le terrain (℃) ; BI : balance ionique (%) ; COL : conductivité électrique à 25℃ mesurée au laboratoire ($\mu S.cm^{-1}$) ; COT : conductivité électrique à 25℃ mesurée sur le terra in ($\mu S.cm^{-1}$) ; PHL : pH mesuré au laboratoire ; PHT : pH mesuré sur le terrain ; MADIS : matières solides totales ($mg.l^{-1}$), O_2d : concentration en Oxygène dissous ($mg.l^{-1}$) ; %sat. : pourcentage de saturation de l'Oxygène (%).

Tableau 6 - Composition chimique moyenne des eaux du Niger à Banankoro, Koulikoro et Ké-Macina et du Sankarani à Sélingué, débit moyen interannuel calculé sur la période 1996-99

	Collecteur - effluent			Collecteur - mélange			TAO		Tamali - effluent			Tamali - mélange	
Date	10/99	02/00	11/00	10/99	02/00	11/00	10/99	02/00	10/99	02/00	11/00	10/99	11/00
SO_4	1.25	4	0	0	0	0		0.5	1.25	0.25	3	0.5	0.25
CO_3H	71.5	279	21	24	40	17		39	17	125	35	57	24
NO_3	1.2	0.5	1.9	1.2	0	1.9		0	1.2	4.4	1.9	1.1	2
Fe			0.51			0.47					0.36		0.34
TAC		239	17		33	14		32		102.4	29	47	20
TH		200	14.4		17.2	12		16		40	22	30	14
TU	32	40	12	30	17	12		19	25	86	15	40	10
TT	34.2	22.9	25.3	32.8	23.7	24.8	32	24.5	29.4	23.1	24.9	24.4	24.8
COL	155	490	43	53	67	36		71	45	391	108	165	56
COT	207	546	0	0	112	35		70	0	420	250	90	35
PHL	6.9	7.6	6.6	6.6	7.2	7		7	7	7.7	6.5	6.7	6.8
PHT	6.4	7.3	6.9	6.8	7.5	7.1	7.4	7.5	7.1	6.8	7.1	6.8	0
MADIS	117.55	280.7	46.96	40.2	50.81	39.31		53.85	49.14	223.96	81.91	125.1	42.47
NO_2		0.8	1.02		0	0.4		0.05		0.04	0.61	0	0.58
PO_4		2	0.32		0.28	0.39		0.08		7.4	0.42	4.8	0.58
NH_4		1.38			0.47			0.35		1.82		1.55	
O_2 dissous				5.2		7.9	-	6.9	-	0.28	6.2	6.7	7.5
% sat.			96	72.3		97	-	89	-	34	80	87	94
C.F													
C.T													
DCO								8		350	50		

	ITEMA			Huicoma			COMATEX effluent		COMATEX mélange		Sélingué - effluent		
Date	02/00	11/00	02/00	10/99	02/00	11/00	02/00	11/00	02/00	11/00	10/99	02/00	10/99
SO_4	0	4.75	0.25		0	4.5	2.5	0.5	0	0.5	0.25	0	0
CO_3H	31	24	28		11.7	70	13.42	0	16.5	39	17	18	18
NO_3	0	4.5	0.2		9	2	1.1	1.9	1.5	2.3	1.8	0.5	0.8
Fe		0.33				0.15		0.35		0.17			
TAC	25	20	23		84	57	105	178		32		15	
TH	14	30	15.2		14.4	10	9.2	43.2		13		10	
TU	16	12	16		98	50	16	7	40	13	52	29	24
TT	24.7	24.9	23.7	39.2	30.1	31	20.3	33	26.1	24.2	30.6	21.2	29.3
COL	50	126	45		174	133	215	2 510	32	69	36	37	54
COT	46	52.3	42		192	0	293	0	77	70.8	86	35.4	88
PHL	7	6.5	7.2		9.8	7.9	9.8	11.3	6.5	7.8	5.8	7	7
PHT	8	0	7.9	2.5	10.3	9.4	10.9	11.6	7	9.5	5.6	6.8	5.9
MADIS	54.6	95.56	49.14		107.2	100.9	132.4	1 524.1	34.94	52.33	39.31	40.4	40.95
NO_2	0	1.67	0		0.04	0.38	0	3.3		1.09		0	
PO_4	0.24	0.47	0.44		0.66	0.5	0	0.45		0.4		0.26	
NH_4	0.42	7	0.05		0.12		0					0	
O_2 dissous	8.1		8.6		6.4		7.2	0.04	5.2	6.8	5.1	7.6	6.6
% sat.	105		106		87	114	93	96.8	66.4	117	70.9	90	89
C.F			>200				>200						
C.T			>200				>200					>200	

DCO					645				0				

Tableau 7 - Résultats des analyses au niveau des effluents et des zones de mélange des rejets. En grisé, valeur dépassant les concentrations maximales acceptables fixées par l'OMS

La teneur en oxygène est un paramètre extrêmement variable. Une variation importante peut être due à la présence de végétaux, de matières organiques oxydables, d'organismes et de germes aérobies, ainsi que de la perturbation des échanges atmosphériques à l'interface (présence de graisses, d'hydrocarbures, de détergents, etc.).

Pour l'ensemble des points de rejet industriel et domestique analysés, la teneur en oxygène est inférieure à 7 $mg.l^{-1}$. Les teneurs en oxygène dissous et les pourcentages de saturation les plus faibles sont observés au niveau des rejets de la COMATEX (5,2 $mg.l^{-1}$ et 66 %) et de l'abattoir à Bamako (0,28 $mg.l^{-1}$ et 34 %) du fait de la présence de beaucoup de matières organiques biodégradables dans les rejets de l'abattoir consommant l'oxygène présent dans l'eau.

La présence d'oxygène dans les eaux de surface joue un rôle primordial dans le maintien de la vie aquatique et dans les phénomènes d'auto-épuration. Sa solubilité est fonction de la température, de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité.

Les résultats des analyses peuvent être exprimés de deux façons :

- la teneur en oxygène dissous (en mg.l-1) ;
- le pourcentage de saturation qui exprime le rapport entre la teneur effectivement présente dans l'eau analysée et la teneur théorique correspondant à la solubilité maximum.

La teneur de l'oxygène dans les eaux de surface dépasse rarement 10 $mg.l^{-1}$. Pour les eaux du Niger supérieur et du Sankarani, elle est en moyenne de 7,2 +/- 0,2 $mg.l^{-1}$.

La concentration en oxygène dissous est directement fonction de la température de l'eau. La figure 26 illustre cette relation pour les analyses effectuées à Koulikoro.

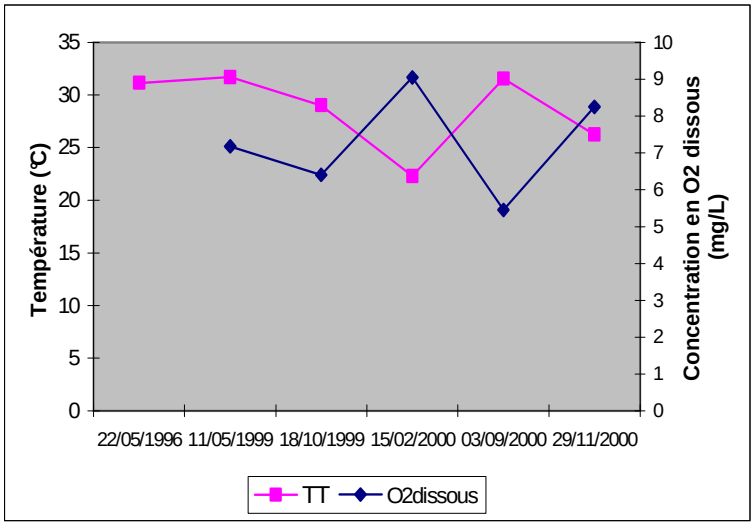


Figure 26 - Évolution de la teneur en oxygène dissous en fonction de la température de l'eau à Koulikoro

Les éléments nutritifs

Les éléments nutritifs sont des éléments chimiques tels que l'azote, le phosphate et le potassium dont les plantes ont besoin pour croître. Ils sont présents naturellement dans l'environnement et rendus accessibles à la végétation par les précipitations, par la désintégration mécanique et chimique des roches et des minéraux du sol et par la décomposition de la matière organique (plantes et animaux morts). Leur présence peut également résulter de l'activité humaine, en particulier de l'agriculture, de l'évacuation des déchets industriels et municipaux et des émissions atmosphériques. L'apport d'éléments nutritifs est souvent considéré comme la plus grave menace posée par l'agriculture à la qualité de l'eau. Pour maintenir un rendement élevé et une bonne qualité de leurs cultures, les agriculteurs ajoutent des éléments nutritifs au sol, principalement par l'application de fumier animal, de déchets végétaux et animaux et d'engrais minéraux.

L'azote devient assimilable par les plantes lorsqu'il est sous une forme soluble, c'est-à-dire principalement sous forme de nitrates. Bien que les nitrates eux-mêmes soient relativement peu toxiques, ils peuvent être réduits dans l'appareil digestif des nourrissons et des ruminants (bovins et moutons) en nitrites qui sont, eux, toxiques. Les nitrites causent la méthémoglobinémie qui réduit la capacité du sang à transporter l'oxygène. Chez les humains, la plupart des cas de cette intoxication est liée à une consommation d'eau renfermant au moins 40 milligrammes d'azote en nitrates par litre. Les nitrites jouent également un rôle dans la formation des nitrosomines qui peuvent causer le cancer. Les fortes concentrations en nitrates peuvent également nuire à la faune. Les fortes concentrations d'ammoniaque, une autre forme soluble d'azote, peuvent être toxiques pour les poissons.

Le phosphate et l'azote qui passent des terres agricoles aux eaux superficielles n'atteignent généralement pas des niveaux présentant un risque direct pour les humains ou les animaux. Toutefois, ils peuvent être assez abondants pour causer l'eutrophisation, phénomène qui se produit parfois naturellement mais qui peut être accéléré par l'activité humaine.

Les normes internationales indiquent qu'une eau contenant plus de 45 $mg.l^{-1}$ de nitrates (exprimés en NO_3), soit 10 $mg.l^{-1}$ de nitrates (exprimés en N), peut provoquer une méthémoglobinémie infantile.

Pour l'ensemble des points, la teneur moyenne en nitrates (exprimés en N) varie de 0,8 à 0,9 $mg.l^{-1}$, ce qui est une valeur très basse et témoigne la bonne qualité de l'eau du Niger en dehors des points de rejet.

La valeur des nitrates semble augmenter en fonction du débit. Pour les eaux usées, les concentrations en phosphates varient de 0,0 à 7,4 $mg.l^{-1}$ alors que, déjà, avec une valeur de 0,2 $mg.l^{-1}$, le phénomène d'eutrophisation peut commencer : ce phénomène est surtout accentué au niveau des rejets de pollution domestique et se traduit, entre autre, par la présence de jacinthes.

Les matières organiques

L'eau usée domestique contient un mélange complexe de produits. Parmi ceux-ci, une grande quantité qui est le sous-produit de notre consommation, est constituée de matières organiques biodégradables.

Celles-ci vont être décomposées par les micro-organismes qui sont présents dans l'eau et qui vont se servir de nos déchets pour se développer et se reproduire. Leur consommation de matières organiques va s'accompagner d'une respiration de l'oxygène dissous dans l'eau.

Cet oxygène est présent en très petite quantité, souvent grâce aux remous de l'eau à sa surface qui mélange de l'air à l'eau, mais aussi grâce à la photosynthèse de végétaux qui sont immergés dans l'eau.

A l'endroit d'un rejet, il y aura beaucoup de matières organiques à consommer et donc beaucoup de micro-organismes qui vont respirer la faible quantité d'oxygène présente dans l'eau. La concentration d'oxygène dissous va alors diminuer et les autres organismes présents vont s'en ressentir. Les poissons exigeant beaucoup d'oxygène seront souvent les premiers à subir ce déficit. Ce phénomène s'appelle l'auto-épuration : l'écosystème cours d'eau s'adapte lui-même aux matières organiques en excès.

Si l'oxygène est presque absent, il y a alors asphyxie de nombreuses espèces d'organismes animaux et végétaux et l'écosystème est profondément modifié.

La biodégradation opérée par les micro-organismes produit elle-même un déchet qui est rejeté sous forme de sels minéraux dans l'eau en plus de l'apport, par lessivage, des engrais qui est une autre source de sels minéraux. Ces sels, surtout les nitrates et les phosphates, vont permettre la croissance de végétaux tels que des algues et des mousses qui se développent dans le lit d'un cours d'eau. Si ces sels sont très abondants, les plantes vont se développer et se multiplier de façon exubérante : c'est ce qu'on appelle l'eutrophisation. Cette évolution provoque un nouveau besoin d'oxygène accru pour la respiration de tous ces êtres vivants. Même si la photosynthèse fournit, le jour, de l'oxygène jusqu'à saturation, la respiration peut asphyxier le milieu en une seule nuit : ce qui peut entraîner la mort des poissons et des invertébrés sensibles.

Une autre conséquence du rejet d'eaux usées domestiques dans un cours d'eau est la formation de dépôts que l'on appelle sédiments parce qu'ils se forment à la suite de la sédimentation de particules plus lourdes au fond du cours d'eau. Ces sédiments s'accumulent tout d'abord près de l'endroit du rejet, mais ils peuvent aussi se déplacer en étant remis en suspension par les crues. S'ils sont constitués de matières organiques, ils sont colonisés rapidement par des micro-organismes dits anaérobies qui se développent sans oxygène et fermentent sur place. Les gaz produits se volatilisent dans l'air ambiant et, à de très faibles teneurs, peuvent provoquer des odeurs incommodantes.

On mesure la quantité de pollution organique facilement biodégradable, souvent d'origine domestique, en laissant incuber une eau usée dans des conditions standard et en mesurant la quantité d'oxygène respirée par les micro-organismes. On appelle cette mesure la demande biochimique en oxygène ; elle est souvent mesurée après 5 jours et

son abréviation est $DB0_5$. Cette mesure étant longue, un raccourci consiste à mesurer la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques par voie chimique. La durée de la mesure est de 2 heures. Le résultat s'appelle la demande chimique en oxygène (DCO). Les résultats de ces deux mesures sont d'autant plus élevés qu'il y a de matières organiques oxydables dans l'eau (DCO plus élevé que DBO).

Les éléments-traces

Les éléments-traces sont des métaux ou des métalloïdes qui sont naturellement présents dans le sol mais qui peuvent être aussi exogènes.

Ils sont notamment apportés par :

- les engrais ;
- les amendements ;
- les pesticides ;
- les déchets ;
- et les retombées de pollution atmosphérique.

Certains sont indispensables en faibles quantités, mais tous sont dangereux au-delà d'un certain seuil.

Les principaux éléments-traces potentiellement toxiques pour l'homme sont le cadmium, le mercure, le plomb et l'arsenic. Le nickel, le cuivre, le zinc, le chrome et le sélénium sont toxiques pour les végétaux.

Les éléments-traces présents dans le sol peuvent être fixés (notamment par absorption, adsorption ou précipitation) ou solubilisés. La solubilisation leur permet d'être absorbés par les plantes ou de migrer vers les eaux.

Les éléments-traces se trouvent sous forme de métal ou de sel métallique oxydé ou réduit. Ils sont plus ou moins dangereux suivant leur forme chimique.

Ils présentent un danger de contamination de la chaîne alimentaire avec accumulation le long de celle-ci. Ils peuvent avoir, sur l'homme et sur les animaux, des effets toxiques, cancérigènes, tératogènes ou mutagènes.

Les plus préoccupants sont :

- l'arsenic (As) provoquant des troubles digestifs et neurologiques. L'arsenic est utilisé dans les tanneries, les peintures et colorants ;
- le cadmium (Cd) provoquant des maladies osseuses et rénales. Le cadmium est utilisé dans les industries textiles, les batteries et comme stabilisant pour les plastiques et les pigments ;
- le mercure (Hg) touchant le système nerveux. Le mercure est utilisé pour extraire l'or, dans la production du chlore et dans les tanneries ;

- le plomb (Pb) provoquant anémie et des lésions nerveuses. On l'utilise dans l'imprimerie, les peintures, les batteries et les carburants automobiles ;
- le chrome (Cr) toxique pour le tube gastro-intestinal. Le chrome se rencontre dans les eaux usées des usines textiles et des tanneries ;
- viennent ensuite le nickel, le cuivre, le zinc et le sélénium qui sont toxiques pour les végétaux.

Il ressort des résultats sur les métaux lourds analysés dans les prélèvements de la campagne de septembre 2000 une absence de métaux lourds.

Les pesticides

Les pesticides sont des substances toxiques utilisées pour lutter contre des êtres vivants nuisibles à l'homme. Les principaux types de pesticides sont les fongicides (contre les champignons), les insecticides (contre les insectes) et les herbicides (contre les mauvaises herbes). On peut séparer les pesticides en plusieurs familles dont celle des hydrocarbures organochlorés (aldrine, DDT, chlordane, hexachlorocyclohexane, etc.) et celle des composés organophosphorés (malathion, …).

Dans le sol, les pesticides subissent des dégradations chimiques et micro-biologiques sous l'action des bactéries et des champignons. Des réactions chimiques peuvent aussi les transformer lorsqu'ils ne sont pas décomposés ou volatilisés dans l'atmosphère. Les pesticides peuvent être dissous dans les solutions du sol et entraînés petit à petit vers les nappes phréatiques ou les nappes superficielles.

La durée de vie des pesticides est très variable : ainsi, les composés organophosphorés ont une vie courte et certains hydrocarbures chlorés (le DDT par exemple) sont très persistants : ce qui en fait des poisons cumulatifs, c'est-à-dire des substances provoquant une toxicité chronique insidieuse.

De façon générale, les pesticides sont caractérisés à la fois par une toxicité aiguë et par une toxicité chronique, celle-ci pouvant être évaluée en déterminant des doses létales (en abrégé DL). Par exemple, la DL 50 d'une substance pour le rat est le nombre de milligrammes de substance par kilogramme d'animal qui tue 50 % d'une population de rats en une durée et un nombre d'applications à préciser (une seule application pour la toxicité aiguë, plusieurs pour la toxicité chronique).

Les organochlorés ont la propriété de pouvoir s'accumuler dans les organismes. Les principaux dangers présentés par les pesticides sont, outre leur manque de sélectivité, la contamination des aliments (avec accumulation le long de la chaîne alimentaire) et celle des nappes phréatiques et superficielles.

En plus de leur caractère toxique, dû à la présence d'éléments-traces, certains organochlorés possèdent des propriétés tératogènes et cancérigènes.

Les analyses de pesticides effectuées en septembre 2000 montrent une absence de pesticides dans les eaux du fleuve Niger.

Qualité des eaux souterraines

On distingue les nappes superficielles et les nappes profondes. Toutes deux sont protégées par opposition aux eaux de surface.

Les nappes superficielles sont exploitées à partir des puits traditionnels. Elles sont polluées à partir des infiltrations provenant essentiellement :

- des eaux usées domestiques. Ceci est surtout accentué au niveau des vieux quartiers des grandes villes. À Bamako, on enregistre plus de 150 $mg.l^{-1}$ de NO_3- et 100 $mg.l^{-1}$ de Cl^- dans l'eau de puit des vieux quartiers : ces eaux font l'objet de contaminations fécales ;
- des eaux usées artisanales : effluents provenant des teintureries et des savonneries traditionnelles ;
- des eaux usées industrielles et minières ;
- des graisses et des hydrocarbures ;
- des intrants agricoles.

Les nappes profondes sont exploitées à partir des forages et des puits modernes. Elles présentent très peu de problèmes de qualité (pollution bactériologique 5 %). Cependant, les pollutions chimiques peuvent survenir plus tard. Compte tenu des différentes formations géologiques, nous trouvons des eaux très peu minéralisées au sud avec :

- une conductivité inférieure à 50 $\mu S.cm^{-1}$;
- une dureté inférieure à 75 $mg.l^{-1}$ de CaCO3 ;
- et une concentration en chlorures inférieure à 5 mg/l.
- et des eaux fortement minéralisées dans les régions nord avec :
- une dureté supérieure à 500 $mg.l^{-1}$;
- une conductivité supérieure à 3 700 $\mu S.cm^{-1}$;
- et une concentration en chlorures supérieure à 1 000 $mg.l^{-1}$.

Transport solide par les eaux du Fleuve Niger et érosion

Les travaux de recherche sur les transports solides du fleuve Niger au Mali ont été nombreux et ont donné lieu à de nombreuses thèses et publications scientifiques. En effet, durant plus de 10 ans, différentes équipes hydrologiques de chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'Orstom puis de l'IRD, dans le cadre de projets de recherche successifs avec des partenariats maliens de la DNHE, devenu DNH (Direction Nationale de l'Hydraulique) et de l'Université du Mali ont réalisé les observations et mesures de terrain, sans lesquels rien de ce qui va être présenté ici n'aurait été possible. On peut lister par ordre alphabétique toutes les personnes ayant participé à notre connaissance, à la collecte et/ou au traitement de la banque de données IRD de Matières en Suspension du bassin du fleuve Niger au Mali : Arfi R., Audollent M., Bamba F., Bénech V.,

Bricquet J.P., Dembélé L., Des Tureaux, T.H., Diabaté M., Diallo D., Diarra M., Gourcy L., Gréard M., Guiguen N., Kondé C., Kuper M., Leroux J.F., Mahé G., Mahieux A., Marieu B., Nguyen P., Olivry J.C., Orange D., Picouët C., et Soumaguel A.

Cette note de synthèse fait tout particulièrement référence aux travaux de thèse de D. Orange (1992), Gourcy (1994), Picouët (1999) et aux publications suivantes : Bricquet *et al*. (1997), Picouët *et al.* (2000), Picouët *et al.* (2002).

Introduction : questionnement scientifique et base de données

L'étude du transport de matières par les eaux de surface s'inscrit dans le cadre des problématiques de géodynamique actuelle liées à l'étude des grands fleuves du globe. Dans un hydrosystème aussi complexe que celui du bassin du fleuve Niger au Mali, il est nécessaire de séparer l'étude du bassin versant amont de l'étude du delta lui-même. Ces deux entités répondent en effet à deux problématiques différentes : l'une est davantage axée sur les taux d'érosion et de transport ainsi que sur les différentes formes sous lesquelles les éléments sont transportés, la seconde est davantage liée à l'estimation des taux de sédimentation dans les plaines inondables et leur rôle dans les bilans de matières terrigènes exportées par la rivière. Dans tous les cas, le point de départ de toute étude sur le transport de matières est l'acquisition de données fiables de débit et de concentration nécessaires aux calculs des quantités de matière transportée. Cette étude sur la géodynamique actuelle du bassin amont et du delta intérieur du Niger se base ainsi essentiellement sur une base de données correspondant à un suivi journalier des débits et à un échantillonnage régulier (souvent hebdomadaire) des eaux du Niger pour l'analyse des éléments majeurs et des matières en suspension. Réalisé dans le cadre d'un réseau mis en place par l'IRD (ex-Orstom) de 1991 à 1999, l'échantillonnage regroupe 8 stations principales représentatives des différents biefs du bassin versant au Mali : amont du bassin versant (Banankoro et Koulikoro), le Sankarani (Sélingué), entrées du delta (Ké-Macina sur le Niger et Douna sur le Bani), confluence du Bani et du Niger (Sensé), sortie du lac Débo situé au milieu du delta (Akka) et enfin sortie du delta (Diré).

L'ensemble des données de débit (sur au moins 30 années) et de concentration (sur 8 années d'étude) ont permis d'appréhender la variabilité spatiale et temporelle des paramètres étudiés. L'étude des apports hydriques a ainsi montré que la période d'étude était contrastée et représentative des fluctuations hydroclimatiques de ces 25 dernières années déficitaires. Ce contraste hydrologique entre années sèches (1991-92, 1992-93, 1993-94), années humides (1994-95, 1995-96) et années moyennes (1996-97, 1997-98) présente un des intérêts majeurs de ce travail. Il a permis de comparer les différentes réponses du milieu (du point de vue du transport fluvial particulaire) à cette variabilité hydroclimatique.

La caractérisation des apports liés au bassin amont du Niger

Sur l'ensemble des stations de suivi du bassin amont du fleuve Niger, les relations entre concentration en MES (matières en suspension) et débit forment des cycles d'hystérésis temporels : le maximum de MES arrive avant le maximum de débit, et les concentrations sont plus importantes en crue qu'en décrue. Ces relations mettent

en évidence la variabilité des sources de MES à l'échelle du bassin versant : on observe, d'une part, les apports de particules liés à l'érosion provoquée par la pluie et le ruissellement sur les versants et, d'autre part, les apports liés à l'érosion des dépôts anciens (ou à l'érosion de berges et de fond du lit) de l'ensemble du réseau hydrographique, des cours d'eau de tête à l'exutoire.

L'étude des flux de matières en suspension met également en évidence la variabilité spatiale d'une station à une autre des flux annuels et la faiblesse relative des tonnages exportés par le Bani, principal affluent du Niger : sur la période d'étude (1991-98), les apports du Bani ne représentent en moyenne que 20 % des apports de MES au delta. Cette faiblesse des apports du Bani réside dans la faiblesse des lames annuelles écoulées qui est, à l'échelle des bassins versants étudiés, le principal facteur déterminant les taux de transport de MES. Il apparaît également que la lithologie du bassin et les sols qui en découlent sont aussi des facteurs explicatifs des taux d'érosion observés sur le Niger. L'étude des variations spatiales des flux de MES a ainsi montré que, malgré des bassins intermédiaires de faible superficie et malgré l'influence du barrage de Sélingué (qui agit comme un véritable décanteur pour les apports du Sankarani), l'érosion augmente d'amont en aval sur le bassin versant du Niger du fait uniquement du changement des conditions climatiques et lithologiques. En effet, une des particularités du fleuve Niger au Mali est de se diriger vers des zones de plus en plus désertiques dont l'érodabilité est de plus en plus importante. Le facteur limitant l'érosion est alors la faible quantité d'eau de pluie tombant sur ces régions. Si on compare le Niger aux autres grandes rivières du globe, la faiblesse des exportations de matière sur le bassin amont du Niger s'explique surtout par le relief peu marqué de la zone géographique étudiée. Les activités humaines ont donc très peu d'influence sur les exportations de matières par le fleuve Niger.

Les changements observés lors de la traversée du delta intérieur du Niger

La caractéristique principale du delta est que d'importantes pertes en eau s'y produisent (de 30 à 45 % des entrées suivant l'hydraulicité de l'année). Elles correspondent essentiellement à des pertes par évaporation et évapotranspiration à partir des surfaces inondées. La partie amont – proprement deltaïque – et la partie aval – caractérisée par des zones inondées plus réduites et une morphologie différente – ont des fonctionnements hydrologiques très différents. La partie amont montre un comportement assimilable à un canal distribuant des eaux dans une multitude de plaines et de mares qui stockent puis restituent des volumes d'eau conséquents lorsque que le seuil de remplissage est atteint. À l'inverse, la partie aval ne montre que des périodes de stockage du fait de l'existence de lacs périphériques ne se remplissant que les années de bonne hydraulicité. L'eau capturée par les lacs est alors définitivement perdue pour le système hydrologique majeur que constitue le bras principal du fleuve Niger.

L'approche par le calcul des bilans de matières entre entrées et sorties souligne le rôle du delta intérieur du Niger dans le stockage des sédiments quelles que soient les années. Mais la disparité amont/aval existe aussi pour les processus de transferts des sédiments.

Les bilans des flux de matière en suspension transportée par le fleuve entre les entrées du delta (Ké-Macina et Douna) et la sortie (Diré) montrent que, tous les ans, il y

a accumulation de sédiments dans le delta. Le delta intérieur du Niger retient entre 0,15 millions de tonnes de sédiments pour les années dites sèches (à plus faible superficie d'inondation, comme lors du cycle hydrologique 1992-93) et environ 1,3 million de tonnes lors des années dites humides, comme en 1994-95 (tableau 8). En fait, les pertes en sédiments sur l'ensemble du delta représentent une fonction croissante, presque linéaire, des flux de MES entrants : les pertes de MES dans le delta sont d'autant plus importantes que les pertes hydriques (pertes par évaporation) le sont aussi (figure 27). Seul le cycle sec 1992-93 ne répond pas à cette loi. En effet, ce cycle est caractérisé par une hydraulicité très faible et une grande partie des eaux du fleuve est restée dans le drain principal sans pouvoir déborder des berges, d'où des pertes en MES extrêmement faibles. Le fonctionnement du delta intérieur du Niger se caractérise donc par une hauteur d'eau minimum à atteindre, seuil minimum pour que les eaux du Niger puissent fertiliser les terres du delta.

Sédiments en 10^3 t	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98
Module annuel entrant ($m^3 s^{-1}$)	820	780	1780	1400	1110	1110
Entrées delta (1)	944	1343	2703	2090	1645	1587
Sortie lac Débo (2)	696	747	1250	1162	1032	957
Bilan delta amont	-248	-596	-1453	-928	-613	-630
Sortie delta (3)	784	766	1487	1183	962	887
Bilan delta aval	+88	+19	+237	+21	-70	-71
Bilan Total	-160	-577	-1 216	-907	-683	-700

(1)Somme des flux des deux entrées (Ké-Macina et Douna),
(2) Somme des flux des trois émissaires sortant du lac Débo (Akka, Awoye et Korientze),
(3) Flux à la sortie unique du delta (Diré).

Tableau 8 - Module hydrologique annuel entrant et bilan des flux de matières particulaires transitant dans le delta intérieur du fleuve Niger (exprimés en milliers de t par an). Les bilans négatifs indiquent une accumulation de sédiments dans le delta

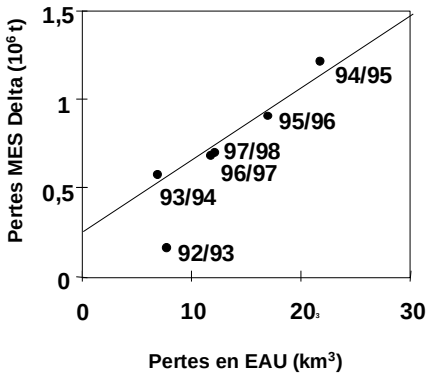


Figure 27 - Évolution annuelle des pertes en sédiments (en t) dans l'ensemble du delta versus les pertes hydriques (en km^3)

Cependant, les comportements entre delta amont et delta aval sont différents : s'il y a toujours accumulation de sédiments dans le delta amont, les bilans sur le delta aval sont relativement équilibrés avec, curieusement, une propension à délivrer du sédiment lors des deux années hydroclimatologiquement opposées, à savoir 1992-93 et 1994-95 (tableau 8). En effet, dans la partie amont, le delta est une immense plaine d'inondation classique où les nombreux méandres d'alimentation des innombrables

mares et l'importante couverture végétale constituent des pièges à sédiments majeurs. Dans cette partie du delta, la quantité de matière déposée est une fonction directe de l'importance de l'hydraulicité de la crue et de sa compétence érosive sur les versants avant son arrivée dans le delta. La figure 28a montre que les deux cycles hydrologiques extrêmes de notre population d'étude (1992-93 pour le sec et 1994-95 pour l'humide) ne répondent pas exactement à cette norme. Pour le cycle sec, comme évoqué précédemment, la crue n'a pas atteint le seuil minimum pour déborder suffisamment du lit majeur. Par contre, la figure 28a met en évidence que, lors du cycle 94-95, trop de sédiments sont perdus par rapport à la norme : l'inondation, du fait de la forte hydraulicité, a pu atteindre de nombreux endroits très reculés du drain majeur qui constituent autant de pièges à sédiments supplémentaires. Sur la partie aval, la figure 28b met en évidence le comportement extrême du cycle 1994-95 : les fortes pertes en eau sont accompagnées de gains en sédiments significatifs.

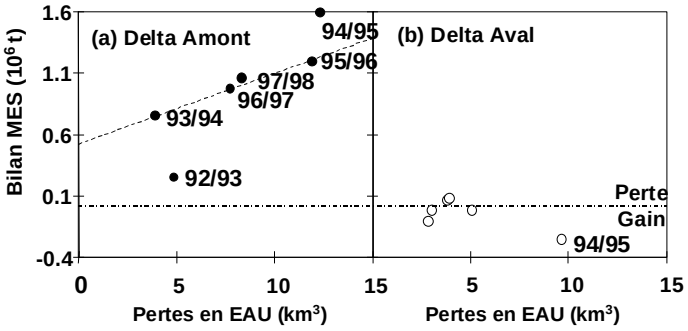
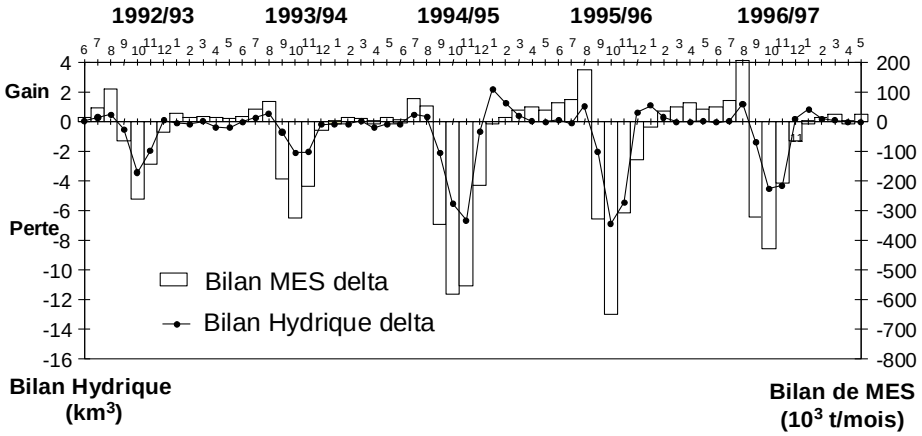


Figure 28 - Évolution annuelle des pertes en sédiments (en t) versus les pertes hydriques (en km^3) pour le delta amont (a) et pour le delta aval (b)

L'étude de ces bilans de MES au pas de temps mensuel permet de comprendre ces disparités. Les bilans mensuels des pertes en MES sont caractérisés par l'alternance (figure 29) de périodes de reprise (aussi appelée gain en sédiments, c'est-à-dire exportation de sédiments en dehors du delta) et de sédimentation (perte en sédiments par le fleuve), cette dernière étant largement prédominante en termes de flux. Dans le delta amont (figure 29a), comme vu précédemment, les périodes de sédimentation correspondent aux périodes de pertes hydriques centrées sur les mois de septembre à décembre (saison de crue). Dans la partie aval du delta, on a vu que le bilan entrée-sortie des flux de matières est relativement à l'équilibre et ne semble pas dépendre de l'hydraulicité de l'année (figure 29b). En fait, après le passage de la plaine amont et des lacs centraux, les eaux sont très peu chargées et les quantités de sédiment mises en jeu sont donc faibles. Les périodes de reprise semblent toutefois être prépondérantes par rapport aux périodes de pertes (figure 29b). Des reprises de sédiment sont, par exemple, observées en décembre-janvier, au début de la saison sèche. Elles sont surtout importantes pour les cycles 1992-93 et 1994-95 (figure 29b). Pour les années sèches telles que 1992-93, ces gains sont sans doute liés à l'effet de l'érosion éolienne sur des versants secs non ou peu végétalisés du fait de la quasi « non-inondation ». Au contraire, pour les années humides, comme lors du cycle 1994-95, les flux d'eau de décembre sont encore importants. Des apports de sédiment par une érosion des berges encore humides ou par une forte remobilisation des sédiments déposés sur les sols inondés et sur les végétaux (lors du retour d'eau des plaines vers le fleuve) sont alors possibles. Pour le cycle 1994-95, la dynamique mensuelle montre également des gains

de matière en début de crue sur le delta aval. L'importance des écoulements en début de crue a probablement eu un effet de « chasse d'eau » sur les sédiments. Bien que la forte hydraulicité de l'année 1994-95 ait entraîné, sur le delta aval, une forte perte en eau (figure 29b) liée à une inondation importante, en superficie et en temps, et surtout à un remplissage des lacs périphériques (vérifié sur le terrain), et du fait de la faible concentration en matières en suspension dans les eaux sur cette partie du delta lors de la période d'inondation, le processus de piégeage des sédiments n'apparaît pas comme un processus majeur dans les bilans sédimentaires (voir bilans septembre-novembre de la figure 29b). La reprise des laissés de crue dans les lits mineurs et la probable érosion de versant en début de crue, puis la remobilisation de décrue et l'érosion éolienne après crue en début de saison sèche sont sans doute largement les processus majeurs pour le fonctionnement sédimentologique du delta aval. Ainsi, contrairement au bilan hydrique, les lacs périphériques ne jouent pas un rôle majeur sur le bilan de matière transportée par le fleuve Niger au cours de sa traversée du delta.

(a) Delta amont



(b) Delta aval

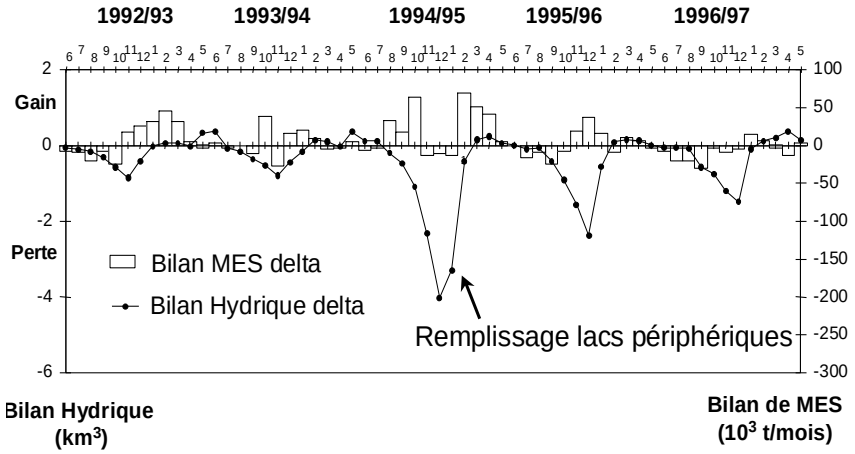


Figure 29 - Évolution comparée des bilans mensuels (sortie-entrée) du transport hydrique et du transport particulaire de 1992-93 à 1996-97 dans le delta amont (a) et dans le delta aval (b)

Finalement, on peut retenir que les pertes annuelles en MES observées lors de la traversée du delta correspondent de 26 à 54 % des entrées suivant les années. Les pertes en MES correspondent à un phénomène d'alluvionnement favorisé par différents facteurs agissant sur les vitesses du courant : pentes faibles, topographie et morphologie particulières (levées de berge, méandres, zones mortes multiples), végétation aquatique abondante, caractéristiques de la crue (intensité et durée de l'inondation). Ces pertes diffèrent suivant les deux parties du delta et sont donc liées à la variabilité spatio-temporelle de l'inondation annuelle :

- sur le delta amont (la zone deltaïque), il y a alternance de périodes de reprise et de dépôt de sédiments, les périodes de dépôt étant largement prédominantes du point de vue des pertes de matière et concordantes avec les périodes de pertes en eau ;
- sur le delta aval, les bilans de MES ne sont pas reliés aux bilans hydrologiques du fait de la faible quantité de sédiments transportés mise en jeu et du fait du rôle des facteurs édaphiques. Dans ces conditions, les lacs périphériques ne représentent pas des pièges particuliers à sédiment, rôle joué par la grande plaine d'inondation que constitue le delta amont.

Ainsi les eaux du Niger à leur sortie du delta intérieur du Niger sont très faiblement chargées en MES. Les transports solides dans la boucle du Niger vont donc être, avant tout, constitués du sapement des berges (faible à cet endroit) et, surtout, des mouvements éoliens de sable : le fleuve traversant alors un erg.

Conclusion

En termes d'indicateur d'érosion du bassin versant, les matières en suspension transportées par le fleuve Niger indiquent que l'exportation en dehors du bassin de matière solide par le fleuve est faible. Le transport solide est surtout marqué sur la branche amont du fleuve et il se trouve réparti dans l'ensemble du delta amont durant la crue annuelle pendant la phase d'inondation. Le fleuve Niger transporte peu de sédiments.

Enfin, cette grande banque de données sur les matières en suspension du fleuve Niger recueillies par les équipes de l'IRD pendant plus de 10 ans est une source d'informations exceptionnelles dans cette région du monde où l'acquisition des données est difficile, rare et coûteuse. En termes de qualité environnementale des eaux, elles pourront être utilisées comme référence pour les années à venir dans la perspective d'un futur observatoire de l'environnement du fleuve Niger au Mali.

 © IRD éditions 2007

Tendances des ressources et de l'environnement biotique

La végétation

État des lieux

La végétation du delta intérieur du Niger (DIN) comporte deux grandes composantes : celle des plaines inondables colonisées essentiellement par des plantes herbacées et celle des reliefs non-inondables (toggué, berges des chenaux et du lit majeur, sommet des dunes) où, en plus des herbacées, se développe une strate ligneuse dont la composition varie en fonction de l'écologie. « Toggé » est le nom traditionnel des buttes exondées dans le delta et sur les bordures sèches : c'est donc une végétation très contrastée. Sur les togués et les bordures exondées, la végétation varie de la savane arbustive au sud et à l'est à une végétation très pauvre au nord du delta.

La végétation du DIN a été étudiée par plusieurs auteurs. En 1950, une esquisse des types de formation végétale a été établie par Duong-Huu-Thoi. Puis, dans le cadre du programme de l'OICMA, les travaux de J.T. Davey (1957) ont abouti à une cartographie des étages floristiques de l'aire grégarigène du delta central du Niger réalisée par le BDPA pour la FAO à l'échelle 1/50 000. Signalons enfin la carte pastorale dressée par l'IEMVT et couvrant l'ensemble du delta et ses bordures ; mais l'échelle de travail (1/500 000) en limite la précision et les utilisations.

Les données sur la végétation que nous présentons pour cette expertise ont été tirées essentiellement de l'étude réalisée par les chercheurs du Centre international pour l'élevage en afrique (Cipéa).

Forêts

Selon le Projet inventaire des ressources ligneuses (Pirl), les formations forestières couvrent 4.5 millions d'hectares tandis que les cultures et les jeunes jachères s'étendent sur 1.8 million d'hectares pour l'ensemble de la région de Mopti. Il s'agit essentiellement de savanes arbustives, rarement arborées ainsi que de palmeraies diverses. Des fourrés dominés par diverses espèces s'observent également.

En zone exondée, on les rencontre essentiellement dans la bordure ouest et dans le sud du delta mais aussi sous forme d'îlots dispersés jusqu'au nord-est. *Acacia seyal*, *Piliostigma reticulata* et *Acacia raddiana* constituent l'essentiel de ces formations forestières. Au sud, on trouve des vergers à *Vitelaria paradoxa* et *Terminalia macroptera*, deux espèces qui marquent la limite nord de l'isohyète 600 mm.

En zone inondée, les formations forestières sont encore dominées par divers acacias. *Acacia kirkii* est bien représenté au nord, autour du lac Debo, mais aussi au sud de Ouro Modi et de Mopti. Selon les chercheurs du Cipéa, les formations forestières du delta occupent 578 373 ha dont 74 % en zone exondée.

La production de bois-énergie (quantité exportable annuellement sans entamer le capital forestier) des formations forestières était de 1,8 million de tonnes selon le Pirl.

Quant au stock de bois-énergie, il a été estimé à 40 millions de m^3 pour l'ensemble de la région de Mopti, dont 3,5 millions en bois mort.

Sur la base des travaux du Pirl, le projet Stratégie énergie domestique (SED) a recalculé les productions annuelles ainsi que les superficies occupées par les différentes formations forestières du delta (tableau 9).

Cercle	Surface des forêts en ha	Volume de bois-énergie en m^3	Volume de bois mort en m^3
Youwarou	204 400	1 628 695	423 571
Ténenkou	262 550	2 773 040	Nd
Mopti	178 800	1 465 825	60 000
Macina	240 750	2 429 896	201 457
Djenné	118 200	939 590	40 000
Total	1 004 700	9 297 046	725 028

1 m^3 = 2 ,3 stères et 1 stère = 330 kg
Source : SED 1999

Tableau 9 - Potentiel ligneux de cinq cercles du delta intérieur du Niger

Il apparaît que le stock de bois mort était relativement important. Ce dernier, qui est surtout abondant au nord, assurait plus de 70 % de l'approvisionnement en bois de feu.

Pâturages herbacés

Excepté la végétation des reliefs non submersibles et quelques plaines irrégulièrement ou tardivement inondées, les pâturages du delta intérieur du Niger sont, dans leur grande majorité, des savanes herbeuses et des prairies aquatiques constituées, essentiellement, de graminées et/ou de cypéracées pérennes (Wilson *et al.*, 1983).

Grâce à l'inondation, ces plaines constituent un espace privilégié dans le Sahel, ce qui se répercute sur leur productivité, notamment sur celle des espèces végétales. Les niveaux de production fourragère sont très élevés mais très variables d'un pâturage à l'autre.

Les graminées à tige flottante forment des pâturages connus sous le nom de bourgou, mot peul désignant les pâturages inondés, la formation végétale elle-même étant appelée la bourgoutière. Celles-ci se développent sur des plaines recevant 4 à 5 m d'eau par an. Il faut quand même signaler qu'elles ne survivent à la submersion profonde que si la montée des eaux se fait progressivement, de façon à permettre la croissance simultanée des tiges.

En considérant l'ensemble des associations végétales dans lesquelles le bourgou a le statut d'herbacée dominante ou codominante, il apparaît que les bourgoutières couvrent 239 884 ha, soit 8,9 % de la superficie des communes qui les englobent (Marie, 2000). Ce sont les parcours les plus productifs du delta avec des productions moyennes de 20 t/ha, mais pouvant dépasser 30 t. La production de repousses en saison sèche atteint 6 000 kg. Les herbacées dominantes sont *Echinochloa stagnina* et *Voscia cuspidata*.

Si 40 communes sur 51 possèdent un bourgou, la superficie occupée par les bourgoutières varie fortement d'une commune à l'autre. Quatre communes, à savoir Déboye, Toguéré Coumbé, Kéwa et Youwarou cumulent 100 000 ha. Par contre, les communes les moins pourvues, au nombre de quatorze, ne disposent que de 8 000 ha (tableau 10).

Les bourgoutières sont abondantes dans le nord, au niveau du lac Debo, mais aussi autour de Toguéré Coumbé, Ténenkou, Mopti et dans la cuvette du Yongari : elles dessinent une forme de fer à cheval autour du lac Debo (Marie, 2000).

Les vétiveraies occupent 639 934 ha, soit environ 30 % du delta. Elles occupent diverses positions topographiques : lit majeur, chenal, ombilic de décantation, plaine d'inondation, haut fond, etc. Leur production moyenne varie de 10 à 12 t selon leur écologie. Dans les zones inondables *Vetiveria nigritana* et *Scirpus maritimus* sont les herbacées dominantes. Mais, en position haute, en plus de *Vetiveria nigritana* on rencontre *Andropogon gayanus* et *Sorghastrum trichopus* comme dominantes. Les herbacées accompagnatrices sont *Panicum anabaptistum* et *Hyparrhenia spp.*

Les rizières sauvages sont aussi bien représentées : elles couvrent 342 391 ha, soit 15,36 % du delta. La production, quoique intéressante, se situe entre 6 et 8 t par hectare. Par rapport aux formations végétales précédentes, la flore est plus riche (14 espèces). *Oriza longistaminata, Aeschynomene sensitiva* et *Nymphea maculata* sont dominantes. On y trouve diverses espèces accompagnatrices parmi lesquelles : *Ipomea aquatica, Melochia corchorifolia* et *Nymphea spp.*

Les pâturages dominés par *Eragrostis barteri*, ou éragrostaies, occupent sensiblement la même superficie que les bourgoutières, mais leur valeur pastorale est moindre avec des productions moyennes oscillant entre 5 000 et 8 000 kg par hectare. *Eragrostis barteri* est l'espèce dominante ; elle est accompagnée par *Ipomea aquatica* et *Melochia corchorifolia.*

À ces formations végétales, il faut ajouter les plaines à *Panicum anabaptistum* qui couvrent 5 % des superficies et les savanes à *Andropogon gayanus* des replats sablonneux qui s'étendent sur 37 805 hectares, soit environ 2 % des superficies.

Biodiversité

L'eau est au centre de la problématique du phénomène de désertification. Dans le delta intérieur du Niger, par le biais de l'inondation, elle génère une grande biodiversité de la faune et de la flore ; ce qui représente, sur le plan écologique et socio-économique, un potentiel de ressources considérable et inestimable en zone sahélienne. Trois systèmes de production exploitent principalement ces ressources : la pêche, l'agriculture et l'élevage. Ces activités tiennent une place prépondérante dans l'économie du pays. Dans ce paragraphe, seules deux ressources seront traitées, à savoir les fourrages et les forêts.

Nom de la commune	Surface de la commune (en km^2)	Superficie en bourgou (ha)	Surface du bourgou défriché en 1989 (en ha)	Pourcentage de la surface de la commune en bourgou	Pourcentage du bourgou défriché
Déboyé	853	34 291	263	40,2	0,8
Toguéré Coumbé	2 544	27 828	4 961	10,9	17,8
Kééwa	1 024	22 834	7 444	22,3	32,6
Youwarou	975	22 685	420	23,3	1,9
Bimber Tama	590	18 124	75	30,7	0,4
Dialloubé	1 497	12 782	1 257	8,5	9,8
Konna	838	12 335	1 642	14,7	13,3
Socoura	733	9 805	5 344	13,4	54,5
Soyé	929	8 031	2 446	8,6	30,5
Ouro Ardo	325	7 462	4 482	23,0	60,1
Togoro Kotia	1 085	6 561	3 780	6,0	57,6
Sio	539	6 242	4 037	11,6	64,7
Diondori	510	5 845	2 739	11,5	46,9
Néma Badenyakafo	1 035	5 724	1 084	5,5	18,9
Ouroubé Doudé	351	4 255	72	12,1	1,7
Ouro Guiré	286	3 737	2 012	13,1	53,8
Fakala	583	3 578	680	6,1	19,0
Sasalbé	309	3 311	2 139	10,7	64,6
Ouro Ali	173	2 811	1 142	16,3	40,6
Togué Mourari	282	2 178	1 313	7,7	60,3
Farimaké	3 591	2 030	6	0,6	0,3
Diaka	1 169	2 007	353	1,7	17,6
Borondougou	114	1 928	401	16,9	20,8
Koubaye	341	1 927	227	5,7	11,8
Pondori	170	1 906	747	11,2	39,2
Sougoulbé	228	1 507	338	6,6	22,5
Kounari	471	1 411	545	3,0	38,6
Macina	1 111	954	18	0,9	1,9
Dianké	961	924	19	1,0	2,1
Djénné	281	840	78	3,0	9,3
Ouro Modi	115	574	69	5,0	12,1
Fatoma	301	564	462	1,9	81,9
Matomo	450	543	83	1,2	15,3
Dandougou Fakala	262	492	24	1,9	4,8
Ténenkou	9	386	248	43,8	64,2
Dérrary	182	376	54	2,1	14,4
Fémayé	162	350	144	2,2	41,0
Madiama	177	290	0	1,6	0,0
Diafarabé	711	235	0	0,3	0,0
Monimpebougou	2 133	137	103	0,1	75,6

Source : Marie, 2000

Tableau 10 - Répartition des bourgoutières dans les différentes communes

Les ressources fourragères

L'inventaire réalisé par les chercheurs du CIPEA fait ressortir, pour le delta, une liste de 189 espèces dont 137 espèces herbacées. Comparée au Gourma voisin qui compte 350 espèces, c'est une flore relativement pauvre à l'instar de la majorité des plaines inondables. Cette pauvreté de la flore contraste toutefois avec une forte production saisonnière de biomasse qui est 15 à 20 fois plus élevée que dans celle des zones sahéliennes avoisinantes.

Les ressources fourragères intègrent trois éléments : les pâturages naturels, les résidus de récolte et les cultures fourragères pratiquées surtout par l'introduction de bourgou.

Sur les plaines inondables, on trouve surtout des graminées (et /ou cyperacées) pérennes parmi lesquelles il faut distinguer quatre types biomorphologiques : les graminées cespiteuses, les graminées à tiges flottantes, les graminées gazonnantes et les géophytes rhizomateux (tableau 11).

Hémicryptophytes			**Géophytes**
Cespiteuses dressées	À tiges flottantes	gazonnantes	Rhizomateuses
Vetiveria nigritiana	*Ehinochloa stagnina*	*Cynodon dactylon*	*Oriza longistaminata*
Andropogon gayanus	*Voscia cuspidata*	*Sporobulus spicatus*	*Echinochloa pyramidalis*
Eragrostis barteri	*Brachiaria mutica*	*Sporobolus helvolus*	*Eleocharis dulcis*
Hyparrhenia rufa		*Brachiaria mutica*	*Scirpus brachyceras*
Panicum anabaptistum			*Cyperus maculatus*

Tableau 11 - Type biomorphologique de quelques-unes des graminées et cypéracées dominantes du delta du Niger

Sigles	**Dénomination de l'association végétale**
AC	Eragrostaie haute à *Eragrostis bacteri* et *Andropogon canaliculatus*
AG	Savane à *Andropogon gayanus* des replats sablonneux
B	Bourgoutière à *Echinochloa stagnina*
BP	Bourgoutière basse à *Voscia cuspidata*
EOR	Eragrostaie basse à *Eragrostis barteri* et *Oriza longistaminata*
ESP	Eragrostaie à *Eragrostis barteri* et *Setaria anceps*
MB	Mosaïque des berges
O	Orizaie haute à *Oryza longistaminata* et *Setaria anceps*
OP	Orizaie basse à *Oryza longistaminata* et *Eleocharis dulcis*
P	Panicaie à *Panicum anabaptistum*
PAK	Plaine à *Acacia kirkii*
PAM	Plaine basse et chenal à *Mytragyna inernis*
PAN	Acacière des basses plaines à *Acacia nilotica*
PAR	Plaine à *Acacia raddiana et Calotropis* - lande à *Indigofera* des lacs sahéliens
PAS	Acacière des hautes plaines à *Acacia seyal*
R	Rizière des casiers de l'Office du Niger et des Opérations Riz
TA	Savane arbustive des *« toggé »* à *Andropogon gayanus* et *Piliostigma reticulatum*
TB	Palmeraie à *Borassus aethiopum*

TC	Végétation anthropique des *« toggé »* à *celtis integrifolia* et *Borassus aethiopum*
TD	Fourré arbustif des *« toggé »* à *Diospyros mespiliformis*
THY	Palmeraie à *Hyphaene thebaica*
TS	Savane arbustive des *« toggé »* à *Acacia sieberiana* et *Acacia seyal*
TT	Savane arborée des *« toggé » à Termimalia macroptera*
VB	Vétiveraie très basse
VH	Vétiverai haute
VOR	Vétiveraie basse
VSP	Vétiveraie moyenne, savane à *Hyparrhenia ruffa*
ZB	Zone de battement des crues maximales

Source : Marie, 2000

Tableau 12 - Dénominations des vingt-huit associations végétales du delta intérieur

Sur la base de l'analyse d'observations faites sur 169 sites échantillonnés dans le delta en 1979 et 1980 (Hiernaux *et al.*, 1983), vingt-huit formations végétales élémentaires dont dix-huit dans les plaines d'inondation et dix autres sur les reliefs non-inondables ont été distinguées (tableau 12). En zone inondée, quatre de ces formations végétales recouvrent plus de 60 % des superficies. Il s'agit des bourgoutières, des rizières sauvages, des vétiveraies et des éragrostaies.

Les ressources forestières

Les ressources forestières du delta proviennent de trois grands types de formation végétale ayant des écologies différentes :

- celles qui supportent une lame d'eau variant de 2,8 à 4 m ;
- celles qui sont inondées par ruissellement, mais qui peuvent l'être secondairement par la crue : la hauteur de la lame d'eau se situe entre 0,1 et 0,6 m ;
- celles qui ne sont pas inondées.

Les tableaux 13 et 14 donnent des informations sur la flore de ces trois types de forêt.

Sigle de la formation végétale	Hauteur de la submersion	Superficie occupée en ha	Espèces dominantes	Espèces accompagnatrices	Espèces occasionnelles
PAK : plaine à *Acacia kirkii*	2,8 - 4 m	5 288	*Acacia kirkii*	*Mimosa pigra*	*Ziziphus amphibius*
PAM : basse plaine et chenal à *Mitragyna inermis*	1,5 – 2,8 m	30 516	*Mitragyna inermis, Mimosa pigra*	*Acacia seyal, Acacia nilotica, Ferethia apodanthera, Pterocarpus santalinoïdes*	*Ziziphus amphibius*
PAN : acacière des basses plaines à *Acacia nilotica*	0,3 – 0,6 m	62 907	*Acacia nilotica*	*Acacia seyal, Mitragyna inermis*	*Dicrostachys glomerata, Piliostigma reticulata, Ziziphus mauritiana*
PAS : acacière des hautes plaines à *Acacia seyal*	0,1 – 0,3 m	50 235	*Acacia seyal, Acacia nilotica,*	*Diospyros mespiliformis, Ziziphus mauritiana*	*Balanites aegyptiaca, Piliostigma reticulata*
PAR : plaine à *Acacia raddiana* et *Calotropis procera*	0 – 0,1 m	2 388	*Acacia raddiana, Calotropis procera*	*Ziziphus mauritiana*	

Source : Marie, 2000

Tableau 13 - Quelques caractéristiques des formations forestières inondées du delta

Sigle de la formation végétale	Superficie occupée en ha	Espèces dominantes	Espèces accompagnatrices	Espèces occasionnelles
TA	161 835	*Piliostigma reticulata, Guiera senegalensis, Ficus gnaphalocarpa, Acacia pennata*	*Acacia sieberiana, Crataeva religiosa, Diospyros mespiliformis, Saba senegalensis, Ziziphus mauritiana*	*Acacia albida, Balanites aegyptiaca, Borassus aethiopum, Dicrostachys glomerata*
TB	27 931	*Borassus aethiopum, Acacia seyal, Piliostigma reticulata*	*Diospyros mespiliformis, Guiera senegalensis, Maytenus senegalensis, Securinega virosa*	*Acacia sieberiana, Boscia senegalensis, Grewia bicolor, Hyphaene thebaïca*
TC	34 916	*Celtis integrifolia, Borassus aethiopium, Ficus gnaphalocarpa, Tamarindus indica*	*Adansonia digitata, Acacia pennata, Acacia sieberiana, Diospyros mespiliformis*	*Acacia nilotica, Balanites aegyptiaca, Hyphaene thebaïca, Piliostigma reticulata*
TD	49 259	*Diospyros mespiliformis, Acacia seyal, Piliostigma reticulata, Ziziphus mauritiana*	*Dicrostachys glomerata Maytenus senegalensis, Acacia nilotica, Securinega virosa*	*Acacia ataxacantha, Balanites aegyptiaca, Guiera senegalensis,Tamarindus indica*
THY	53 905	*Hyphaene thebaïca, Acacia seyal, Piliostigma reticulata*	*Acacia laeta, Acacia senegal, Diospyros mespiliformis, Maytenus senegalensis*	*Acacia sieberiana, Albizzia chevalieri, Balanites aegyptiaca, Boscia senegalensis*
TS	82 161	*Acacia sieberiana, Dicrostachys glomerata, Albizzia chevalieri*	*Acacia campilacantha, Acaccia seyal, Acacia pennata*	*Acacia laeta, Combretum micranthum*
TT	17 032	*Terminalia macroptera, Terminalia avicennoides*	*Vittelaria paradoxa, Diospyros mespiliformis, Piliostigma reticulata, Pterocarpus erinaceus*	*Feretia apodanthera, Gardenia ternifolia, Maytenus senegalensis, Pseudocedrella kotschii*

Tableau 14 - Quelques caractéristiques des formations forestières exondées du delta

Ces forêts inondables sont de véritables refuges écologiques qui permettent la reproduction des oiseaux (hérons, aigrettes, cormorans, anhingas, spatules et ibis) et ce, parce qu'elles répondent à certaines conditions spécifiques : sécurité créée par l'inondation, leur étendue, l'absence de dérangement humain et animal.

Les espèces dominantes sont surtout des acacias. Les plaines à *Acacia nilotica* sont les plus représentées (42 %). On y trouve comme accompagnatrices *Acacia seyal* et *Mytragina inermis.* Viennent ensuite les plaines à *Acacia seyal* (33 %) et *Mitragyna inermis* (20 %). Dans ces dernières, on trouve plusieurs espèces accompagnatrices : *Acacia seyal, Acacia nilotica, Feretia apodanthera et Pterocarpus santalinoides.* Les plaines à *Acacia kirkii* qui ne couvrent que 2 % servent de refuges aux oiseaux paléarctiques : elles font encore du DIN le plus important site de reproduction des oiseaux en Afrique de l'ouest. On y rencontre aussi *Ziziphus amphibius* et *Mimosa pigra* qui indiquent une dégradation des bourgoutières par mauvais drainage.

En zone exondée, les savanes à *Andropogon gayanus* et *Piliostigma reticulata* sont les plus représentées (plus de 160 000 hectares) et, *Guiera senegalensis*, *Ficus gnaphalocarpa* et *Acacia pennata* sont classées, en plus de *Piliostigma reticulata*, comme espèces dominantes.

La jacinthe

1. Généralités

La jacinthe d'eau *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms-Laubach appartient à la famille des Pontederiacées. Elle est originaire du Bassin amazonien et c'est à partir de cette zone qu'elle a été introduite accidentellement ou intentionnellement par l'homme dans diverses parties du monde (Sculthorpe, 1967).

Au Mali, sa présence remonte à 1990 autour de la ville de Bamako. À partir de ce point, elle a envahi le cours du fleuve Niger et, depuis cette période, elle représente une menace pour les autres plans d'eau du pays et les rizières à l'Office du Périmètre Irrigué de Baguineda (OPIB), à l'Office Riz Ségou (ORS) et à l'Office du Niger (ON).

Très prolifique et envahissante, elle constitue un véritable danger pouvant compromettre le développement par ses effets pervers :

- accroissement de l'évaporation d'un facteur compris entre 3,7 et 7 (Gopal et Sharma, 1981). Elle favorise donc l'évaporation des plans d'eau et entrave ainsi les activités socio-économiques liées à l'utilisation de l'eau ;
- entrave à la navigation et à la pêche ;
- réduction de la production d'énergie électrique ;
- perte de la diversité biologique ;
- développement des moustiques et d'autres parasites cause de maladies hydriques ;
- obstruction des ponts et des canaux d'irrigation.

2. Évaluation du niveau d'infestation des plans d'eau

Pour lutter contre la jacinthe au Mali, un projet de recherche a été entrepris en 1997-98 par l'IER en collaboration avec ses partenaires (projet FAO/MLI/6613A). Les informations fournies par ce projet montrent que le niveau et les zones d'infestation ont varié depuis le déclenchement de la lutte.

3. État en 1999

En aval du fleuve, l'infestation des plans d'eau par la jacinthe était plus étendue, de Bamako jusqu'à Macina, à environ 350 km sur le parcours du Niger. On a retrouvé également la jacinthe d'eau dans la ville de Niono ainsi que dans le fleuve Bani, à plus de 300 km de Bamako. Cette infestation augmentait les chances d'invasion du delta du Niger qui sert de zone de reproduction pour les poissons, de refuge pour les oiseaux migrateurs et de zone de transhumance des animaux au Mali. Cependant, l'infestation n'avait pas la même importance sur tout le trajet. Les cas les plus inquiétants ont été signalés dans les localités suivantes :

- autour de la ville de Bamako où toutes les bordures du fleuve étaient infestées : cela servait de source d'infestation durant la crue pour l'aval du fleuve ;
- le barrage hydroélectrique de Sotuba qui était constamment sous la menace des touffes issues du fleuve par le barrage des Aigrettes ou du canal principal ;
- le canal de Baguineda dont la partie la plus inquiétante était la zone inondée où le canal fait une courbe avant Doukourakoro : cette zone constitue un réservoir même pendant la saison des pluies ;
- le fala (mare) de Sekoro, complètement envahi, où la navigation était fortement entravée ;
- le fala (mare) de Bambougou, à l'embouchure du canal de l'Opération Riz Ségou, avec une infestation plus dense que celle de la berge du cours principal du fleuve : cette infestation constituait une menace pour les rizières de Dioro ;
- la zone d'inondation du barrage de Markala et le canal principal de l'office du Niger qui étaient très infestés ;
- le canal du Sahel, du barrage du point A, à la ville de Dougabougou : cette infestation constituait une menace pour les canaux d'irrigation du Sukala.

4. État en 2002

Après trois années de lutte, le niveau d'infestation a baissé, mais une autre plante envahissante a pu être observée : le salvinia géant (tableaux n° 15 et 16). Les niveaux élevés d'infestation ont été observés dans les points de rejet des eaux usées d'origine diverse favorables à la multiplication de la jacinthe.

Sites	Jacinthe		Salvinia géant		Autres plantes aquatiques	
	notation	% de couverture	notation	% de couverture	notation	% de couverture
Mare de Kalabankoro	1	5	0	0	3	26
Pont des Martyrs	4	75	0	0	2	20
Pont du roi Fadh	4	60	0	0	2	25
URG	2	10	0	0	3	26
N'Golonina	4	50	0	0	2	25
Radio Kledu	4	60	0	0	1	5
Hôtel Mandé	4	60	0	0	1	5
Pont après TAMALI	1	5	3	25	2	25
Abreuvoir des bœufs	1	5	3	25	2	25
Canal de Baguinéda	2	10	4	40	3	25

Tableau 15 - Évaluation de l'infestation du fleuve et du canal d'irrigation de Baguinéda dans la zone de Bamako

Le pont des Martyrs, du roi Fadh, les berges à N'Golonina, derrière la radio Klédu et l'hôtel Mandé sont des points de rejet des eaux usées d'origines diverses favorables à la multiplication de la jacinthe d'eau, ce qui explique le niveau élevé des infestations.

Sites	Jacinthe d'eau		Salvinia géant		Autres plantes aquatiques	
	notation	% de couverture	notation	% de couverture	notation	% de couverture
Collecteur de Niono	4	80	0	0	2	20
Sossé daga (Séribala)	1	5	0	0	4	75
Fala de Secoro	2	25	1	1	4	75
COMATEX (derrière)	3	50	2	10	2	20
Canal de navigation	1	1	2	20	2	10
Fala de Gombougou	0	0	3	40	2	10
Canal adducteur	1	1	1	1	0	0

Tableau 16 - Évaluation de l'infestation du fleuve à Ségou et Markala

5. Méthodes de lutte

Le projet FAO/MLI/6613A propose trois formes de lutte : la lutte par enlèvement manuel qui est la forme la plus utilisée, la lutte biologique et la lutte chimique. Cette dernière a seulement été testée dernièrement.

- Lutte manuelle

Ce moyen de lutte implique une disponibilité en main d'œuvre. La participation de la communauté réduit fortement les coûts. Elle est possible dans les endroits faciles

d'accès et peu profonds tels que les canaux d'irrigation et les fossés. Ce genre de lutte peut être organisée en régie par certains services ou à la suite d'initiatives locales des populations confrontées à l'envahissement des berges ou des infrastructures par la jacinthe d'eau. Les caractéristiques de la lutte manuelle sont reportées dans le tableau 17.

Caractéristiques	Description
Travail	Extraction de la jacinthe à la main en utilisant des outils tels que la fourche et le râteau.
Surface d'action	Limitée au cas des mauvaises herbes marginales et pour de petites surfaces
Efficacité	Pour un homme, 2,5 t / 8 heures (biomasse 24 kg/m$^{2)}$
Restriction d'application	Profondeur, pente, marécage, qualité de l'eau, moustiques
Implications écologiques	Recommandation relative aux contaminants
Avantages	Promouvoir la participation des usagers Assainissement de l'eau Utilisation des mauvaises herbes (artisanat)
Désavantages	Processus très lent limité aux endroits peu profonds, insécurité des travailleurs Efficacité diminuée par la présence des moustiques.

Tableau 17 - Principales caractéristiques de la lutte manuelle

Cependant la portée de cette lutte est très limitée.

- Lutte biologique

Il s'agit d'utiliser deux prédateurs de la jacinthe, à savoir des charançons du genre *Neochetina* (*Neochetina eichhorniae* et *Neochetina Bruchi*) pour le contrôle de la plante. La méthode de lutte comprend plusieurs étapes :

a) Élevage des charançons

Après leur importation, les charançons sont élevés dans des bassines construites à cet effet.

- La récolte

Les plants de jacinthe récoltés doivent être bien verts, jeunes, sains, ni trop âgés ni trop longs et avec des feuilles ne présentant aucun symptôme de maladie, ni de pourritures ou de brunissements.

- Le lavage

Les plants récoltés dans le fleuve sont sales et certainement contaminés par des champignons et des bactéries. Ils peuvent aussi abriter des araignées et des escargots. Ils seront alors soigneusement lavés avec l'eau du robinet malgré les dispositions prises pendant leur collecte au fleuve. L'opération du lavage s'accompagne de l'habillage de

la plante qui consiste à couper les feuilles indésirables qui ont échappé au triage pendant la collecte.

- La stérilisation

Les plants de jacinthe bien lavés et habillés seront plongés dans l'eau de Javel à 10 % pendant 4 à 5 minutes. Les plants seront ensuite rincés deux à trois fois avec l'eau du robinet. C'est un travail minutieux à cause des brûlures que l'eau de Javel persistante peut provoquer sur les racines et sur les feuilles. Cette opération de lavage a un double avantage : d'une part, les plants sont désinfectés de tous les corps étrangers qui leur sont nuisibles et, d'autre part, elle prévient les éventuelles contaminations des insectes qui seront utilisés pour l'infestation de la jacinthe.

- La mise en place des plants

Après la stérilisation, les plants de jacinthe sont placés dans les bassines d'élevage.

- La fertilisation des bassines

La fertilisation est très importante : elle permet d'obtenir des plantes vigoureuses pour alimenter les insectes. Elle se fait avant ou peu après la mise en place des plants et consiste à apporter des engrais afin de rendre le milieu aquatique favorable au développement de la jacinthe. L'engrais bleu a été utilisé à la dose de 40 mg/bassine. C'est un engrais composé soluble de formule 20N-20P-20K ; il est employé par les fleuristes et vendu au détail. Son apport est renouvelé après chaque vidange des bassines qui intervient trois fois par mois.

- L'infestation des plants par les insectes

Les charançons N. bruchi et N. eichhorniae adultes seront capturés manuellement sur les plants de jacinthe puis séparés par espèce et lâchés à raison de 120 couples par bassin. Les deux espèces se distinguent par leurs couleurs et le V caractéristique du N. bruchi. Ils seront placés sous la gaine de la première ou de la seconde feuille, au centre de la rosette.

- Entretien des plants

Ce travail consiste à un changement d'eau dans les bassines et à l'enlèvement des feuilles malades ou mortes. Les changements de l'eau interviennent chaque fois que les moisissures commencent à se développer.

b)- Lâchers des charançons

Les lâchers seront effectués de janvier à mai et consistent à déposer les charançons adultes sur les feuilles de jacinthe. Ils doivent être effectués dans plusieurs points dans les zones d'infestation.

- La lutte chimique

Deux herbicides, à savoir Herbextra dont la matière active est le 2.4D à 720 $g.l^{-1}$ et le Roundup liquide dont le glyphosate est la matière active à 360 $g.l^{-1}$ peuvent aussi contrôler efficacement la jacinthe.

Tendances évolutives

La végétation herbacée

Face à l'ampleur des variations saisonnières et interannuelles, il est parfois difficile d'identifier les tendances évolutives de la végétation à moyen et long terme et encore plus délicat d'en démêler les facteurs multiples et interactifs.

Une vingtaine de sites du delta suivis de 1979 à 1984 dans le cadre du contrat CIPEA / ODEM (Opération de Développement de l'Élevage de la région de Mopti) permet de se faire une idée sur la dynamique de la végétation des savanes herbeuses du delta. Cependant, il faut signaler que les années d'observations se rangent parmi les moyennes, mauvaises et très mauvaises années climatiques et surtout hydrologiques (presque rangées dans une progression décroissante régulière de 1979 à 1984) ; aussi l'impact des fluctuations des pluies et de la crue qui est présenté ne concerne que cette situation particulière.

1- Impact des changements climatiques et de la crue

- Les résultats du suivi ont permis de tirer les conclusions suivantes :
- la majeure partie des plaines inondables est assez stable sur le plan floristique car elle est constituée de graminées pérennes souvent protégées de la pâture pendant la saison de croissance (cinq à six mois),
- la sensibilité des parcours aux fluctuations de la crue est très variable. Les bourgoutières suivies ont été peu affectées dans leur structure comme dans leur production par la baisse considérable du niveau de la submersion parce que la durée de la submersion n'était pas modifiée. Par contre, l'orizaie, l'eragrostaie et la vétiveraie haute ont été très affectées non seulement dans leur production mais aussi dans la structure de leur peuplement. L'état de ces trois parcours fin 1984 était alarmant : le peuplement de l'espèce dominante était décimé et remplacé par un peuplement très irrégulier dominé par des annuelles sahéliennes,
- les variations de la crue et du régime des pluies ont un effet plus visible sur la production que sur la flore. Ainsi, sur un pâturage à *Oriza longistaminata*, la production maximale mesurée en 1979 était de 10 t, mais, en 1980, une arrivée tardive de l'inondation et sa faible profondeur ont empêché *Oriza longistaminata* d'arriver à la floraison : la production a alors chuté de moitié,
- à plus long terme, en plus de la production, un faible niveau des crues combiné à une pluviométrie déficitaire peuvent transformer la végétation (Diarra L., 1985) Deux exemples permettront d'illustrer cette dynamique :

- Savane à *Eragrostis barteri*

Avant la sécheresse, elle était dominée par Eragrostis barteri et accompagnée de quelques touffes d'*Hyparrhenia rufa*, de *Paspalum orbiculare*, d'*Oriza longistaminata*

et de Setaria anceps. On y trouvait rarement *Paniculum fluvicola*, *Andropogon africanus*, *Crotalaria ochroleuca*, *Brachiaria jubata* et *Acroceras amplectans*.

La production végétale atteignait un maximum (3 à 6 t de matière sèche par hectare) en octobre. Le parcours était surtout utilisé pendant la saison des pluies par les bovins de retour de transhumance, mais aussi en saison sèche où il était mis en feu pour faciliter la pâture des repousses par les petits ruminants.

- Savane à *Vetiveria nigritiana*

Avant la sécheresse de 1983-84, cette savane était constituée de grosses touffes espacées de *Vetiveria nigritiana*, *Sorghum trichopus*, *Panicum anabaptistum* et, plus rarement, de *Hyparrhenia exarmata* et de *Panicum fluvicola*. Les dépressions entre les touffes étaient colonisées par des annuelles, principalement *Panicum wallense et Setaria palide fusca*.

La biomasse atteignait un maximum (6 à 8 t de matière sèche par ha) au moment de la fructification, en octobre et en novembre. La production végétale se poursuivait en saison sèche par l'émission de repousses feuillées. Ces savanes étaient surtout pâturées à la suite de cette repousse stimulée d'ordinaire par un incendie qui éliminait les chaumes de l'année précédente.

Après la sécheresse, les pérennes qui dominaient précédemment dans les savanes à *Eragrostis* ont régressé pour céder la place à des espèces annuelles telles que *Panicum subalbidum*, *Setaria pallide-fusca*, *Borreria choetocephala*, *Borreria filifolia*, *Eragrostis pilosa* et *Leptadenia hastata*. Quant aux savanes à *Vetiveria*, elles ont été envahies par *Panicum laetum*, *Panicum subalbidum* et *Setaria pallide-fusca*. La plupart de ces espèces annuelles existaient déjà dans les parcours considérés, mais, la superficie qu'elles occupaient avant la sécheresse était nettement moins importante. L'influence négative de la sécheresse de 1983-84 sur la savane à *Vetiveria* a été accentuée par l'activité accrue des termites jusque-là limitée par des crues régulières et suffisamment abondantes. L'évolution du recouvrement des différents faciès permet d'apprécier les changements survenus (tableau 18)

Savane/ faciès	Recouvrement linéaire (en %)				
	1979	1981	1983	1984	1986
Savane à Vetiveria nigritana					
Touffes vivantes de Vetiveria nigritana	60.0	40.0	20.0	4.6	0.3
Touffes mortes de Vetiveria nigritana	2.0	5.0	9.0	9.6	4.2
Annuelles	7.0	8.5	10.0	13.6	15.1
Termitières	n.d.	0.5	1.0	1.2	1.3
Sol nu	33.0	46.0	60.0	71.0	78.9
Savane à Eragrostis barteri					
Eragrostis barteri	n.d.	55.0	3.5	3.5	3.1
Oriza longistaminata	n.d.	7.4	7.4	7.4	7.1
Leptadenia hastata	n.d.	0.0	1.0	2.0	3.7
Annuelles	n.d.	7.6	15.0	16.1	34.0
Sol nu	n.d.	30.0	73.1	70.0	52.1

Tableau 18 - Évolution du recouvrement linéaire des différents faciès propres aux savanes à Vetiveria et à Eragrostis des plaines d'inondation du fleuve Niger dans le Mali central, 1979-86

2- Impact de l'exploitation pastorale et de l'incendie

À long terme, en plus de leurs effets sur la productivité et la qualité fourragère, le mode et l'intensité d'exploitation fourragère ont un impact sur les peuplements végétaux. Les points suivants méritent d'être signalés :

- la mise en défens intégrale ou l'entrée tardive du bétail dans les bourgoutières alors que le sol est desséché empêche le marcottage naturel des tiges d'*Echinochloa stagnina* ; ce qui risque de compromettre la régénération de son peuplement l'année suivante,
- le maintien du peuplement d'*Echinochloa stagnina* peut aussi être mis en danger par un faucardage trop sévère,
- sur les toggés et dans les plaines périphériques non inondées (comme ailleurs dans les parcours sahéliens et soudano-sahéliens) les tapis herbacés composés d'annuelles sont sensibles à la pression de pâture exercée au cours de la croissance en saison des pluies, surtout lorsque cette pression est permanente tout au long de la saison. Les risques sont d'autant plus élevés pour les toggés du Macina que le bétail résidant s'y retrouve confiné lors de la submersion.

3- Impact de la mise en culture

La culture du riz qui s'est beaucoup accrue avec la généralisation des labours attelés au cours des dernières décennies exerce un impact sur la ressource fourragère. La substitution du parcours naturel par le riz se traduit par une perte fourragère dont

l'importance dépend de la réussite ou de l'échec (assez fréquent puisque l'inondation n'est pas contrôlée) de la culture mais surtout du type de pâturage préexistant.

Pour une oryzaie, une eragrostaie ou une vétiveraie, la substitution d'une plante pérenne par une annuelle supprime la production des repousses, mais la perte globale de biomasse n'est pas très importante. Il faut quand même signaler que, de 1952 à 1989, les superficies cultivées en riz ont augmenté de 30 % (Marie, 2000). Avec l'évolution démographique, ce chiffre devra être revu à la hausse.

Pour les bourgoutières, la substitution se traduit, par contre, par un manque à gagner considérable que l'on peut chiffrer à la perte des rations d'entretien de six bovins par hectare pendant les six mois de saison sèche. Cette importante ressource est fortement menacée par endroits. Selon J. Marie (2000), en 1989, plus de 50 000 ha étaient défrichés et transformés en rizières, notamment autour de Mopti et de Ténenkou, dans le Yongari et dans le Kotia. Avec la persistance de la sécheresse, on peut s'attendre à une augmentation des superficies des bourgoutières cultivées.

La végétation ligneuse

L'évolution du capital ligneux dépend de plusieurs facteurs comme le climat, l'évolution démographique et les systèmes de culture et d'élevage.

1- Impact des variations climatiques

L'analyse de photographies aériennes datant de 1952 et de 1971, complétée par les résultats de prospections aériennes faites en 1985-87, montre que le nombre de forêts inondables a fortement diminué suite aux longues années de sécheresse et aux faibles inondations annuelles. C'est ainsi que de véritables « forêts mortes » ont vu le jour. Si, dans les années 1950, on pouvait dénombrer 25 forêts inondées dans le DIN, en 1985, on n'en comptait que sept qui hébergeaient cinq grandes colonies nicheuses. De nos jours, seules les forêts de Akkagoun et Dentaka sont en bon état. (tableau 19)

2- Impact de l'exploitation pastorale

En période de crue, les forêts constituent une part importante des ressources fourragères. La pression exercée par les troupeaux sédentaires est renforcée, en saison sèche, avec l'arrivée des animaux transhumants. Cependant, suite à la surcharge en bétail et surtout au mode d'exploitation, l'arbre paye un lourd tribut aux déprédations humaines. Pour mettre le fourrage ligneux à la disposition du bétail, les bergers coupent les branches les plus élevées pour les coucher à terre. L'opération présente peu de risque lorsqu'il s'agit des petites branches, mais, lorsqu'elle concerne les grosses branches, les conséquences sont plus graves. La branche qui reste attachée à l'arbre par une zone à moitié coupée est sujette aux attaques des bactéries et des champignons. De plus, la partie qui touche le sol est facilement attaquée par les termites et lorsque le feu passe, toute la plante est la proie des flammes alors que seul le tronc aurait pu être touché. De telles pratiques entraînent la mort des arbres (Diarra L., 1998).

Site, colonie	Années 1940	Années 1950	1985	1998-99	2000-02
DIN Nord : Débo - Korientzé aval					
Kerdial	+	+			
Beima	+	+			
Koussouma	+	+			
Toba	+	+			
Gome	+	+			
In tarouel	+	+			
Owa	+	+			
DIN central : Débo - Korientzé					
Timisobo	+	+	+		
Kepagou	+	+	+		
Gourao	+	+	+		
Dentaka	+	+	+	+	+
Akkagoun	+	+	+	+	+
Kota	+	+			
Sobesaba	+	+			
Barangissé	+				
Korientzé	+	+			
Bora Bora	+	+			
DIN Sud : Débo - Korientzé en amont					
Koumbe Niasso	+	+	+		(+)
Kouakourou	+	+	+		(+)
Tomina	+	+			
Wilibana	+	+			
Ngomi	+	+			
Tilembeya	+				
Djibitaga	+	+			
Kadial	+	+			

Les forêts des colonnes 1940 et 1950 sont des sites potentiels de nidification.

NB. Les sept premiers sites ne sont pas inondés en cas de sécheresse. Les forêts de Timisobo, Gourao, Koumbé Niasso et Kouakourou sont dans un état de dégradation avancé.

Tableau 19 - Évolution des sites à colonie nicheuse dans le DIN au Mali

3- Impact des défrichements et de l'exploitation du bois-énergie

Dans le delta, le taux de croissance de la population est voisin de 1,4 % par an, mais il est nettement plus élevé dans le sud où il atteint 5 % par an (Marie, 2000). Pour satisfaire les besoins en terre agricole et en bois-énergie, d'importants prélèvements sont faits dans les forêts.

Les défrichements entraînent une modification importante du peuplement ligneux des formations végétales mises en culture. Leur impact est aggravé par le raccourcissement de la jachère qui ne permet plus aux ligneux de se régénérer, à l'exception de quelques espèces particulièrement vivaces telles que *Guiera senegalensis*, *Piliostigma reticulatum*et *Ziziphus mauritiana* qui continuent à émettre des rejets après plusieurs années de coupes systématiques.

Dans les zones cultivées autour des villages, la végétation revêt un caractère anthropique très marqué. La végétation est une savane parc où la strate ligneuse est constituée essentiellement d'espèces épargnées par les défrichements. Il s'agit d'*Acacia albida*, de *Vitelaria paradoxa*, etc. (Wilson *et al.*, 1983).

Selon le projet SED, la consommation rurale de bois-énergie dans le delta est de 1,3 million de tonnes sur la base d'une consommation annuelle de 0,6 à 0,8 t/hab/an. Cette consommation absorbe 70 % de la production annuelle ligneuse, mais, dans certaines localités, la consommation est supérieure à la production annuelle et, d'année en année, on assiste à une augmentation du nombre d'intervenants dans l'exploitation du bois-énergie (tableau 20).

Cercle	Production annuelle	Bois mort	Consommation rurale	Exportation (bois +charbon)	Reste de bois mort	Bilan bois vert
Djenné	53810	40000	123040	12202	-	- 41432
Macina	198651	310000	101415	-	208585	198651
Mopti	77557	60000	107224	22170	-	8163
Ténenkou	120844	-	101244	-	-	19600
Youwarou	41390	1243571	65859	22790	1154923	41390

Source : SED

Tableau 20 - Bilan ressources prélèvement de bois du bassin de Mopti (t/an)

Sur la base d'un taux de croissance annuelle des populations rurales de 1,4 %, un taux de croissance de la consommation des combustibles de 5 %, une diminution de la productivité ligneuse suite aux défrichements de 0,5 % et un taux de perte du stock de bois mort de 5 %, le projet SED estime que le bilan global production-prélèvements de bois (bilan « bois vert ») devrait chuter de 1,4 million de tonnes à moins de 100 000 t en 2005. Cette baisse est due à l'épuisement du stock de bois mort et à l'augmentation de la consommation urbaine et de la consommation rurale.

Indicateurs de suivi

L'analyse statistique des observations botaniques et écologiques faites sur 169 sites échantillonnés dans le delta a permis d'établir une fiche signalétique pour chaque formation végétale. Celle-ci comporte des indications sur la composition floristique, la position géomorphologique, la texture des sols, le régime d'inondation et les ressources fourragères établies dans une situation d'utilisation standard.

Par la suite, la carte réalisée par le CIPEA des formations végétales du delta a été digitalisée et intégrée au système d'information géographique Delmasig (Marie, 2000) ; ce qui permet l'expression géoréférencée de toutes les variables utilisées pour la caractérisation des formations végétales (composition floristique, production fourragère) et de leur environnement et le calcul des statistiques de superficie.

Composition floristique

Pour la composition floristique, chaque formation végétale est caractérisée par deux valeurs de référence :

- la valeur indicatrice des espèces, codée de 0 à +++, qui définit l'intensité de liaison entre l'espèce et la formation végétale ;
- l'abondance/dominance des espèces.

La première est indiquée par des seuils de probabilité de présence ou d'absence de l'espèce dans la formation végétale. La seconde est indiquée par la distinction de trois catégories d'espèces : les dominantes, les accompagnatrices et les occasionnelles ; chacune représentant respectivement, 80, 15 et 5 % de la biomasse végétale (tableaux 21, 22 et 23).

Le suivi de l'évolution de ces valeurs de référence peut servir d'indicateur de la dynamique de la flore de la formation végétale considérée.

Code	Signification statistique
+++	L'espèce est significativement sensible à l'état de la variable au seuil de 1/1 000
++	L'espèce est significativement sensible à l'état de la variable au seuil de 1 % mais pas de 1/1 000
+	L'espèce est significativement sensible à l'état de la variable au seuil de 5 % mais pas de 1 %
.	L'espèce n'est pas significativement sensible à l'état de la variable au seuil de 5 %
0	L'échantillon est trop faible pour conclure ou il y a absence de données

Source : Marie, 2000

Tableau 21 - Code représentant l'intensité des liaisons espèces/profil floristique ou profil/état des variables

Code	Statut en termes d'abondance/dominance
HD	Herbacées dominantes
HO	Herbacées occasionnelles
HA	Herbacées accompagnatrices
LD	Ligneux dominants
LO	Ligneux occasionnels
LA	Ligneux accompagnateurs

Source : Marie, 2000

Tableau 22 - Statut des espèces végétales en termes d'abondance/dominance dans les formations végétales

Espèces dominantes ou codominantes		Espèces accompagnatrices		Espèces occasionnelles	
Echinochloa stagnina	+++	*Ipomea aquatica*	+	*Melochia corchorifolia*	+
Voscia cuspidate	++	*Nymphea lotus*	++	*Utricularia inflexa*	+
		Nymphea maculata	+	*Vetiveria nigritiana*	+
		Polygonum spp.	+		

Tableau 23 - Exemple d'une bourgoutière à *Echinochloa stagnina*

Production fourragère herbacée

La production fourragère herbacée est modélisée en formulant des hypothèses tenant compte de la hauteur de crue. Elle est représentée par trois valeurs :

- le maximum qui correspond à des valeurs de pointe mesurées sur le terrain ;
- la valeur médiane qui correspond, en moyenne, à la production escomptée lors d'une bonne crue ;
- la valeur minimale qui est celle obtenue lors d'une mauvaise année.

La production de repousse de saison sèche est décrite aussi par trois valeurs standard : minimale, médiane et maximale.

La connaissance des caractères de l'inondation permet donc, à partir du modèle Delmasig, de caractériser la production fourragère de l'ensemble du delta à partir des valeurs des formations végétales individuelles. Quelques valeurs de production sont données au tableau 24.

Formations végétales	Production annuelle en kg/ha			Production de repousse en kg/hectare (de décembre à juin)		
	minimum	médiane	maximum	minimum	médiane	maximum
AC	3000	5000	8000	300	600	1200
B	15000	20000	30000	3000	6000	10000
O	5000	8000	15000	400	800	1200

AC = Eragrostaie haute à *Eragrostis barteri* et *Andropogon canaliculatus*
B = Bourgoutière à *Echinochloa stagnina*
O = Orizaie haute à *Oriza longistaminata* et *Setaria anceps*

Tableau 24 - Production standard de quelques formations végétales du delta

Production fourragère ligneuse

La production foliaire des ligneux peut être aussi calculée à l'aide des relations d'allométrie établies par le CIPEA (Cissé, 1982). Les équations établies pour les principales espèces sont données au tableau 25. Elles permettent d'évaluer le potentiel fourrager aérien d'une région ou d'une formation végétale lorsque l'on dispose d'un inventaire tenant compte des aspects structuraux des différentes espèces du peuplement ligneux.

Espèces	A	B
Acacia machrostachya	0.60	2.31
Acacia nilotica	0.51	2.36
Acacia pennata	0.60	2.31
Acacia raddiana	0.50	2.35
Acacia sieberiana	0.60	2.13
Acacia seyal	0.48	2.31
Anogeissus leiocarpus	2.36	1.75
Balanites aegyptiaca	6.11	1.58
Bombax costatum	0.46	2.17
Cassia sieberiana	0.95	2.07
Combretum nigricans	1.25	2.12
Detarium microcarpum	0.31	2.71
Feretia canthioides	1.91	1.64
Hexalobus monopetalus	1.55	1.93
Guiera senegalensis	3.09	1.89
Maïtenus senegalensis	3.09	1.89
Prosopis africana	1.01	2.09
Pteleopsis suberosa	0.95	2.07
Pterocarpus erinaceus	0.95	2.07
Pterocarpus lucens	0.95	2.07
Piliostigma reticulata	0.31	2.71
Strychnos spinosa	1.38	1.91
Terminalia macroptera	2.09	2.06
Ximenia americana	3.09	1.89
Vitex madiensis	0.31	2.71
Ziziphus mauritiana	1.38	1.91

La biomasse foliaire (B) est donnée par la formule : B = (a x C b) où a et b sont des coefficients définis pour chaque espèce et C la circonférence du tronc de l'espèce

Tableau 25 - Relations d'allométrie utilisées pour l'estimation de la biomasse foliaire des espèces ligneuses

Production de bois

La production annuelle de bois peut être évaluée à l'aide d'une équation proposée par le projet Stratégie Énergie Domestique (SED) qui utilise deux paramètres (pluviosité et recouvrement ligneux) pour modéliser la productivité des formations forestières.

L'équation est la suivante :

$i = 0{,}3699 \exp(3{,}1652\ P.R^2)$ où i = productivité en m^3/ha/an,

P = pluviométrie annuelle exprimée en m

R = Recouvrement en %

P.R2 = Pluviométrie x Recouvrement au carré

exp = fonction exponentielle

Un inventaire ligneux est donc nécessaire pour appliquer cette équation.

Le stock de bois mort, le niveau d'exploitation et l'accroissement des populations sont des indicateurs qui permettent d'apprécier les tendances évolutives de la ressource ligneuse.

L'avifaune

Le DIN est réputé pour sa faune abondante à cause de la biomasse végétale considérable produite lors de la crue. Même si les sécheresses passées ont négativement influencé les populations animales, le DIN reste toujours parmi les zones les plus riches en Afrique, car il héberge des effectifs d'oiseaux d'eau d'une importance internationale qui contribuent substantiellement à l'évolution de leurs populations en Afrique, en Europe et en Asie.

- Selon plusieurs auteurs, l'avifaune du DIN compte plus de 350 espèces. Elle comporte des espèces locales et des espèces migratrices qui y viennent pour passer la période hivernale.
- Sur les 143 espèces d'oiseaux d'eau que compte l'Afrique subsaharienne, 125 sont signalées dans le DIN. Les inventaires récents (1998-2001) font état de 103 espèces dont 98 dans la zone de Debo Korientzé (Wetlands international, 2003). Avec le retrait des eaux, les oiseaux se concentrent dans la zone centrale (Debo Korientzé) mais aussi à Pora, Koumbe Niasso, Diondiori et Seri (Wymenga *et al.*, 2002).

Ces oiseaux jouent un rôle économique important dans le delta. Ils participent à la protection des cultures par la consommation des criquets, sauteriaux et autres insectes. Une relation a pu être établie entre la production de riz, les attaques de criquets et l'abondance des oiseaux. Pendant les bonnes années, le nombre d'oiseaux est élevé car la niche écologique est plus grande et la nourriture plus abondante.

Ces oiseaux constituent aussi une source de protéines pour les populations. Chaque année, des milliers d'oiseaux sont capturés par les pêcheurs et vendus dans différents marchés.

Populations d'oiseaux d'eau

Comme nous l'avons déjà signalé, à l'instar du fleuve Sénégal et du Lac Tchad, le bassin du fleuve Niger constitue l'une des trois plus grandes aires grégarigènes des oiseaux paléarctiques et éthiopiens de l'Ouest africain. Non seulement il sert de zone d'étape pour quelques millions d'oiseaux, mais c'est aussi le lieu de reproduction pour de nombreuses espèces. Les recensements aériens et les comptages de terrain permettent de voir les tendances évolutives des espèces. Ces recensements montrent une forte influence de la crue sur la dynamique des populations. Ils montrent aussi que les effectifs sont importants.

Les recensements relatifs aux six espèces les plus communes (la Sarcelle d'été, le Dendrocygne veuf, l'Oie de Gambie, l'Ibis falcinelle, la Barge à queue noire et le

Combattant varié) font état de 1 163 881 oiseaux en janvier 1997 contre 1 052 700 en janvier 2001, les sarcelles représentant respectivement 77 et 70 % des effectifs.

Dans le complexe Débo Walado, on a recensé 214 859 oiseaux en 2000-01. Toujours pour ce complexe, il ressort que :

- les effectifs les plus élevés se rencontrent chez deux espèces, à savoir le Bécasseau minute (31 802 individus en avril) et le Combattant varié (47 281 sujets en février) ;
- quatre espèces totalisent chacune plus de 10 000 individus : ce sont le Cormoran africain (10 400 en octobre), l'Aigrette garzette (10 915 en mars), l'Ibis falcinelle (10 651 en février) et le Pluvier pâtre (10 196 en juin) ;
- certaines espèces sont considérées comme vulnérables (l'Aigrette ardoisée, l'Aigrette garzette, l'Ibis sacré, la Mouette à tête grosse) ;
- d'autres sont menacées ou rares (le Pélican gris, le Blongios nain, le Jabiru d'Afrique, l'Ombrette africaine, la Grue couronnée, etc.) ;
- les effectifs des oiseaux augmentent quand les crues se retirent.

Les principales espèces migratrices sont la Sarcelle d'été, le Pilet, le Souchet et le Nyroca. L'analyse des recensements aériens effectués dans les années 1970 a abouti à la désignation du complexe Lac Débo - Walado Débo comme site Ramsar de canards.

Parmi les espèces éthiopiennes, on peut citer le Dendrocygne fauve, le Dendrocygne veuf, l'Oie de Gambie, l'Oie d'Égypte et le Canard casqué.

Dynamique des populations

La comparaison des effectifs à des dates différentes permet de voir les tendances interannuelles de certaines espèces. Ainsi, la population des ibis falcinelles qui comptait 25 000 individus en 1980 a beaucoup diminué. L'effectif total est réduit de moitié dont 30 à 80 % dans le Débo. Contrairement aux falcinelles, les populations de Barge à queue noire observent une relative stabilité (environ 40 000 individus). Il en est de même pour les populations de Combattant varié (300 000 individus). En ce qui concerne la Sterne caspienne, après le déclin dû à la sécheresse passée, on observe un rétablissement de la population (3 334 oiseaux) suite à de meilleurs niveaux de crue.

Si l'on considère les couples reproducteurs, on a une image divergente (tableau 26). Pendant que certaines sont en déclin, d'autres sont en augmentation. Enfin pour certaines, on observe une relative stabilité.

Espèces	1986/1987	1994/1996	1999/2001	État des populations
Héron garde-bœuf	63 000 - 65 000	65 000 - 90 000	50 000 –- 60 000	déc.
Cormoran africain	17 000 - 17 500	16 000 - 17 000	18 000 - 20 000	inc
Grande Aigrette	2 800 - 3 100	500 - 1 000	1 500 - 1 800	déc.
Aigrette garzette blanche	900 - 1 000	500 - 1 000	500 - 1 000	sta.
Aigrette garzette noire	80 - 110	+	80	déc. / sta.
Aigrette intermédiaire	800 - 875	>200	1 700	inc
Crabier chevelu	550 - 650	+	500	sta. ?
Aigrette ardoisée	200 - 250	150	130	déc.
B ihoreau gris	1 - 10	100 - 300	1 - 10	irr
Héron cendré	10 - 15	30 - 50	-	irr
Héron mélanocéphale	10	1 - 5	2	déc. / sta.
Héron pourpré		2 - 10	-	irr
Anhinga d'Afrique	40 - 45	15 - 30	250 - 300	inc
Ibis sacré	30 - 40	50	200 - 250	inc
Ibis falcinelle	-	150	_	irr
Spatule d'Afrique	300 - 350	50	100 - 150	inc
Bec-ouvert africain	30 - 40	0 - 1	-	déc.

Inc. = en augmentation, sta. = stable, déc. = en déclin, irr. = irrégulier.

Tableau 26 - Populations reproductrices (N couples nicheurs) des espèces d'oiseaux d'eau nicheurs des forêts inondées du delta

Les ravageurs

La Direction nationale de l'appui au monde rural (DNAMR) par son service régional (DRAMR) et ses bases phytosanitaires de Ségou et Mopti sont chargées de la mise en œuvre de la politique de protection des végétaux dans le DIN. Les informations collectées auprès de ce service font ressortir qu'en plus des oiseaux granivores et des rongeurs, le delta abrite d'autres ravageurs. Il s'agit :

- des chenilles mineuses de tiges de riz et de mil ;
- des sauteriaux dans les cercles de Niono, Macina, Ténenkou et Youwarou ;
- des cantharides dans les cercles de Niono, Macina et Ténenkou.

Les méthodes de suivi des ravageurs s'appuient sur l'existence d'un réseau de surveillance et d'alerte précoce. Des agents spécialisés répartis dans le delta, les offices et des paysans organisés en brigades villageoises d'intervention assurent la surveillance et la signalisation des ravageurs. Dans ce paragraphe, des informations détaillées seront données uniquement sur les oiseaux et les rongeurs.

Les oiseaux ravageurs

Comme toutes les zones humides, le delta intérieur du Niger constitue une aire riche et variée en espèces d'oiseaux. Cependant, les espèces qui causent des dégâts dans les rizières sont peu nombreuses et leurs méfaits peuvent être énormes (entre 3 et 6 % de la production). En zone Office du Niger, les ravageurs les plus fréquents sont les suivants :

1- Les *anatidae* ou canards

Les canards et les échassiers sont des oiseaux d'eau. Ils fréquentent les zones humides. Les canards ont généralement le bec court, souvent plat, les pattes sont également courtes. Les espèces de grande taille ont le vol lourd. Ils sont tous bien adaptés au vol et à la natation et certaines espèces sont plongeuses. Les principales espèces sont données ci-dessous :

Nom commun	Nom vernaculaire	Nom scientifique
Sarcelle d'été	Dugu-dugu	*Anas querquedula*
Canard pilet	Dugu-dugu	*Anas acuta*
Oie de Gambie	Bunuba	*Plectopterus Gambiensis*
Canard casqué	Bunu koroni	*Sarkidionis melanota*
Dendrocygne veuf	Kilili	*Dendrocygna viduata*
Dendrocygne fauve	Kilili	*Dendrocygna bicolor*

2- Les *charadriidae* (échassiers)

Les échassiers, les sarcelles et les pilets sont des migrateurs qui se reproduisent en Europe et en Asie. Ils quittent l'Afrique en mi-mars pour revenir en août – septembre - octobre. Ils fréquentent toutes les zones humides du Mali notamment le delta central du Niger, le delta mort, la zone lacustre, les mares et les lacs naturels et artificiels (Sélingué, Manantali).

Les autres canards et moineaux passent toute leur vie en Afrique. Ils sont néanmoins capables de longs déplacements selon les conditions du milieu. Pendant la période de reproduction, ces oiseaux se dispersent sur toutes les zones favorables. Parmi les échassiers, il faut retenir :

Nom commun	Nom vernaculaire	Nom scientifique
Chevalier combattant	Kala-kala	*Philomanchus pugnax*
Barge à queue noire	Kala-kala	*Limosa limosa*

3- Les *Plocidae* ou Tisserins

Les plus dangereux sont le travailleur à bec rouge (*Quelea quelea*) et le moineau doré (*Passer luteus*).

Toutes ces espèces ont un comportement grégaire, c'est-à-dire qu'elles satisfont en groupe à leurs besoins de sommeil et de nourriture. Elles peuvent ainsi former des volées de plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'individus. Au cours de la campagne 2001-02, leur densité par hectare variait de 100 000 à 150 000.

Les rongeurs

Généralités

Les rongeurs constituent l'ordre le plus important de la classe des mammifères. Sur 4 269 espèces connues de mammifères, il existe 2 015 espèces de rongeurs (Wilson et Reeder, 1993).

Les connaissances sur les rongeurs soudano-sahéliens, et particulièrement ceux du delta, sont encore modestes notamment en ce qui concerne leur écologie et leur nuisibilité. Selon Gautun, il existe quelques 200 espèces de rongeurs reconnus comme nuisibles sur l'ensemble des régions tropicales.

Le delta intérieur du Niger abrite une grande diversité de rongeurs. On y trouve une quinzaine de genres appartenant à sept familles : les Muridae, les Gerbillidae, les Sciuridés, les Dendromuridae, les Gliridae, les Cricetomyidae et les Tryonomyidae. (Diarra W., 2003). La liste des principaux rongeurs du delta est donnée au tableau 27.

Famille	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Nature des dégâts causés par l'espèce
Muridae	*Arvicanthis ansorgei*	Gunturu	Perforation des digues des casiers rizicoles
Muridae	*Dasymys spp*	Fala gon	
Muridae	*Rattus rattus rattus*	Senegal gninè	Entrepôts et stocks alimentaires
Muridae	*Rattus norvegicus*	Gon fin	
Muridae	*Mus musculus*	Sokono gninè	Objets divers
Muridae	*Nanomys spp*		Stocks alimentaires
Muridae	*Mastomys erythroleucus*	Gninè wulema	Ravageur des cultures céréalières et maraîchères
Muridae	*Myomys daltoni*	Tiga domu	
Muridae	*Lemniscomys spp*	Gninè niègè niègèma	Ravageur des cultures de décrue et des cultures maraîchères
Gerbillidae	*Taterillus gracillus*	Gninè wuleni	Ravageurs des cultures céréalières, de décrue et maraîchères
Gerbillidae	*Tatera gambiana*	Gninè wulemba	Dégâts dans les champs d'arachide
Sciuridae	*Helioscirus gambianus*	Chigèlèni	Dégâts dans les parcs à karité et à néré
Sciuridae	*Xerus erythropus*	N'gèlèni	Nuisible des champs d'arachide, de manioc, de patate
Dendromuridae	*Steatomys caurinus*	Gninè tuluma	Dégâts dans les champs d'arachide
Thrionomidae	*Thryonomis swenderianus*	Kôgninè	Dégâts dans les champs de canne à sucre
Gliridae	*Graphiurus murinus*	Bolen	Dégâts insolites
Cricetomyidae	*Cricetomys gambianus*	Toto	Dégâts en milieux habités

Source : Diarra L., 1998

Tableau 27 - Principaux rongeurs du delta intérieur du Niger

Les rongeurs colonisent différents types de milieux :

- les milieux stables avec des ressources trophiques abondantes : il s'agit, essentiellement, des périmètres rizicoles et des jardins potagers. Dans de tels milieux, le cycle biologique annuel de la dynamique des populations de rongeurs comporte trois phases : reproduction, dispersion et concentration. C'est durant cette phase que se fait la reproduction ;
- les milieux intermédiaires qui englobent les zones de culture sèche ainsi que les zones inondables. Le cycle biologique comprend quatre phases : reproduction, dispersion, sédentarisation et concentration. Pendant la sédentarisation, les individus vivent de leurs réserves jusqu'en saison des pluies ;
- les milieux arides. En plus des quatre phases précédentes, le cycle de ces milieux comporte une phase d'estivation qui survient avant la phase de concentration. Durant celle-ci, les rongeurs vivent des réserves accumulées pendant les cinq à huit mois de saison sèche.

Périodes de lutte

Dans les milieux stables, la lutte doit être continuelle. Lorsque l'on ne connaît rien de la biologie des ravageurs du milieu, le calendrier de lutte doit être établi en fonction du calendrier d'installation des cultures. La lutte est utile dans de tels milieux et doit être engagée pour amener les densités de population des rongeurs à des proportions acceptables et supportables par les écosystèmes.

Dans les champs de culture sèche, la lutte doit être engagée en fin de saison sèche/début de saison des pluies. La vitamine K1 contenue dans les végétaux verts étant l'antidote naturel des raticides, une intervention après la consommation d'herbe fraîche entraînerait un phénomène de chimiorésistance qui se transmettra aussi aux descendants, d'où la nécessité d'agir à temps en suivant les normes recommandées.

Dans les zones inondables, la lutte doit être engagée en fin de saison des pluies/début de saison sèche.

En milieu aride, la lutte doit se faire pendant la phase préestivale pour atteindre le maximum d'individus.

Dans quels cas faut-il lutter contre les rongeurs ?

La lutte se justifie en fonction de la densité des rongeurs. Quatre phases sont distinguées :

- la phase de silence où la densité se situe entre 0 et 20 individus par hectare. La lutte est inutile car le coût des produits sera supérieur aux dégâts causés par les rongeurs ;
- la phase des ravages chroniques : la densité se situe entre 21 et 40 individus par hectare. La lutte doit être commencée pour empêcher la pullulation des rongeurs ;

- la phase des ravages éclair ou phase d'explosion. Durant celle-ci, la densité est comprise entre 41 et 60 individus par hectare. La lutte est très utile sinon toute la récolte peut être compromise ;
- la phase de déclin ou de normalisation démographique. La lutte est inutile car les récoltes sont déjà dévastées. Mais, malheureusement, c'est à ce moment que l'aide internationale arrive alors qu'il n'y a plus rien à sauver. Il conviendrait donc d'orienter l'aide internationale de la phase quatre en phase deux pour orienter les projets de recherche[1].

La lutte contre les rongeurs peut être faite de façon traditionnelle (battues, effarouchement sonore, piégeage, feux de brousse, lutte chimique avec *Erythropleum guineense*).

Méthodes de lutte en zone inondable

Elle se fait en plusieurs étapes :

- Le piégeage préalable durant cinq à six nuits pour identifier les nuisibles présents et pour définir leur rayon d'action moyen. Il se fait sur des transects de 100 m avec 10 à 15 appâts par transect. Le piégeage consiste à attraper les rongeurs à l'aide de pièges dans lesquels ils sont tués lorsqu'ils tentent de manger l'appât.Ce piégeage permet aussi d'avoir l'équidistance entre les appâts empoisonnés. Il est préférable d'utiliser les anticoagulants de deuxième génération qui cumulent les avantages des poisons toxiques et ceux des anticoagulants de première génération.
- Choix des molécules en fonction des espèces : il est aussi nécessaire d'alterner les molécules pour éviter les cas de résistance. Les produits de deuxième génération les plus couramment utilisés sont :
  - les klérates (Brodiphacum) ;
  - la chlorophacinole (KCAID) ;
  - le lanirat (Bromadiolone) ;
  - le dipnenacum (Yasodion).

Méthode et indicateurs de suivi de l'abondance des rongeurs

L'évolution de la densité des rongeurs peut être suivie par la méthode dite de « capture - marquage - recapture ». Il s'agit d'installer des pièges permettant la capture de rongeurs vivants que l'on attire à l'aide d'appâts appropriés : restes de repas, concombres, pastèques, arachide, pâte d'arachide, dattes, grains de mil, sorgho ou maïs, farine de poisson séché, etc. Les appâts sont mis chaque soir vers 16 heures et les pièges seront vérifiés chaque matin entre 6 heures et 7 heures 30. Les campagnes de piégeage sont organisées sur le terrain à des moments précis de l'année : avant et après la crue, pendant la crue et en saison sèche ; soit en juillet, novembre, décembre, janvier et avril.

1 Il importe d'adopter une stratégie de contrôle des populations qui soit adaptée en fonction du cycle biologique annuel des populations de rongeurs. Pour cela, l'acquisition de connaissances supplémentaires est nécessaire car elles permettent de mettre en évidence des périodes de fragilité du cycle biologique des populations.

Il existe de nombreuses méthodes de piégeage qui peuvent différer en fonction du nombre de lignes de piégeage, des pièges et de la surface de piégeage. Les chercheurs de l'IRD proposent d'utiliser 100 pièges placés sur quatre lignes de piégeage. Les lignes seront regroupées par paire, avec un espace interlignes de 20 m et un espace interpaires de 50 m. Chaque ligne sera donc composée de 25 pièges espacés d'environ 10 m sur une aire de piégeage d'environ 250 sur 100 m. Le début et la fin de chaque ligne sont marqués et les coordonnées géographiques de chaque piège sont relevées à l'aide d'un GPS (*Geographic Positionning System*). La position des pièges posés en bout de ligne donne aussi une idée des limites de l'inondation au fur et à mesure des missions de piégeage.

Les animaux capturés sont pesés, sexés et marqués par amputation des phalangettes selon un code de marquage classique, puis relâchés à l'endroit de leur capture. La position de capture est aussi notée. Le relevé du poids au cours des missions permet de suivre les variations corporelles du poids des animaux.

Le matériel nécessaire comprend :

- un peson d'une capacité de 3 ou 400 g pour peser les animaux ;
- des ciseaux pour couper les phalangettes des animaux à marquer ;
- des fiches de données pour établir le calendrier journalier des positions des captures et des recaptures ;
- une planchette de manipulation pour les mensurations morphologiques de l'animal piégé.

L'analyse du nombre de capture-recaptures des individus renseigne sur l'importance des individus sédentaires. On suppose que les individus capturés une fois ont une probabilité plus forte d'être moins sédentaires que les individus capturés plusieurs fois. On peut calculer des indices de sédentarité.

La distance maximale entre les recaptures successives (DMR), la moyenne des distances entre les recaptures successives (DRS) et la longueur totale entre les recaptures successives (LTR) sont des indicateurs de la mobilité d'un individu (indice de mobilité).

Situation et tendances caractérisant l'ichtyofaune et la ressource halieutique ; connaissances et indicateurs

Introduction

Le poisson constitue, avec les sols cultivables et les pâturages, l'un des trois piliers des ressources naturelles de la vallée du fleuve Niger. C'est pourquoi les informations, parfois alarmistes et souvent contradictoires, qui circulent à propos de l'état de cette ressource trouvent généralement un écho important. C'est pourquoi il est

important de faire le point sur ce sujet pour le Niger malien dans son ensemble et, en particulier, pour le delta intérieur, principale région de pêche pour le Mali.

Il faut rappeler en premier lieu que, d'un point de vue biogéographique, l'ichtyofaune du fleuve Niger appartient à la province ichtyologique nilo-soudanienne (Hugueny et Lévêque, 1994). Celle-ci, bien que très vaste et formée de trois grands bassins (Nil, Tchad, Niger) et divers autres petits bassins (Sénégal, Volta et autres), a gardé une composition faunistique remarquablement homogène du fait des contacts qui sont restés maintenus entre ces bassins, soit jusqu'à une époque géologique récente (fin du tertiaire ou début du quaternaire) soit même jusqu'à l'heure actuelle (cas du mayo Kebi qui peut faire communiquer le bassin du Tchad avec celui du fleuve Niger en période de hautes-eaux). La grande taille de cette province biogéographique explique sa richesse en espèces de poissons et, en particulier, la richesse du fleuve Niger.

Le nombre d'espèces peuplant la région du Niger supérieur et du delta intérieur du Niger est en effet de 130 à 140, selon Daget (1954). Cependant, une moitié d'entre elles sont peu connues ou du moins très rarement capturées par les engins de pêche, notamment du fait de leur petite taille : c'est le cas notamment du genre Barbus. Cependant, cela ne représente qu'une part infime des quantités capturées et débarquées. En fait, ces espèces n'entrent dans la composition des captures qu'à titre accessoire et accidentel et non en tant qu'espèces ciblées. Il est clair que, concernant de telles espèces qui ne font pas vraiment partie de la ressource halieutique, il serait vain de tenter de caractériser une quelconque situation et plus encore d'essayer de dégager des tendances évolutives. Seules des missions de chercheurs spécialisés en systématique, travaillant par empoisonnement de petites portions du fleuve ou de ses bras, sont en mesure de fournir des informations sur la présence de ces espèces rares ou dépourvues d'intérêt halieutique ; et cela ne peut évidemment se faire que de façon très ponctuelle[2].

Par conséquent, l'étude présentée ici se concentre sur les espèces qui sont (ou qui étaient) rencontrées dans les captures de la pêche ; c'est-à-dire un nombre d'espèces qui n'excède pas 80. Il s'ensuit qu'il est très difficile de répondre de façon absolue et sans aucun biais à la question « y-a-t-il des espèces de poissons qui ont disparu du fleuve Niger au cours des dernières années ou décennies ? ».

Par contre, il est possible de s'interroger sur le fait de savoir si, parmi les espèces mentionnées comme pêchées il y a quinze ou soixante ans, certaines se sont raréfiées (voire même n'apparaissent plus du tout) dans les captures. La réponse à cette question, qui peut être abordée en termes d'occurrence ou de fréquence d'occurrence, constitue la première partie de l'étude.

La deuxième partie s'intéressera à la situation et aux tendances affectant les populations toujours présentes : Y-a-t-il baisse d'abondance ? ou bien changement de

2 Il faut noter que ces missions de prospection scientifique permettent de temps à autre et jusqu'à récemment (années 1990) de trouver et de décrire de « nouvelles » espèces. Elles permettent aussi de revoir la taxonomie des espèces existantes grâce à l'examen de spécimens nouvellement capturés en meilleur état que les holotypes conservés dans les bocaux de formol des muséums.

structure démographique, par exemple moins de grands spécimens ? Si oui, est-ce inquiétant ? Sur ces points, nous essaierons de fournir des modèles explicatifs, hypothétiques ou validées, ainsi que des indicateurs pour les suivis à venir.

Disparition, raréfaction ou apparition d'espèces dans les captures

Pour étudier l'évolution de la composition spécifique des captures dans la région la plus pêchée du fleuve Niger au Mali, qui est celle du delta, on peut se baser sur les travaux de Daget (1954), de Quensière *et al.* (1994), de Laë (1995), de Kodio *et al.* (2002) ainsi que sur la synthèse de Laë *et al*. (2004). Les périodes d'observation vont de 1945 à 2004, ce qui donne un recul d'une soixantaine d'années, s'échelonnant sur plusieurs phases du développement de la pêche et sur plusieurs périodes hydroclimatiques.

Espèces qui semblent avoir disparu ou quasiment disparu

Hepsetus odoë est une espèce prédatrice de grande taille qui était encore présente en 1988 dans le souvenir des vieux pêcheurs du Delta. D'ailleurs Daget (1954) déclare que ce poisson « se rencontre assez fréquemment dans les mares de la zone d'inondation mais rarement dans le fleuve proprement dit » et il en décrit un certain nombre d'exemplaires capturés pendant son séjour commencé en 1945. Si l'on en croit la carte fournie par Lévêque *et al*. (1992), le moyen Niger et le delta constitueraient la limite nord de l'aire de répartition de l'espèce, laquelle serait plus typique « du haut cours des fleuves et des petites rivières, là où les *Hydrocyons* sont absents ou peu abondants » (or, il faut rappeler ici que les *Hydrocyons* sont abondants dans le cours moyen du fleuve Niger). Quoiqu'il en soit, cette espèce semble aujourd'hui avoir totalement disparu du cours moyen du fleuve Niger, ou du moins du delta intérieur – aucune capture n'ayant été signalée lors des études du GP DCN (1988-92) ni dans la période de l'observatoire de la pêche (1994-2001).

Une autre espèce, *Arius gigas*, appartenant à la famille essentiellement estuarienne et côtière des *Ariidae*, était selon Daget (1954) « devenue rare dans le Niger supérieur », alors qu'on pouvait encore « le rencontrer couramment en aval du lac Debo ». D'ailleurs de vieux pêcheurs interrogés en 1988 gardaient un souvenir précis de cette espèce (« dont les grands individus atteignaient la taille d'un enfant ») et évoquaient une période ancienne de plus grande fréquence qui remonterait donc au début du XXe siècle. Aujourd'hui, *Arius gigas* est devenu encore plus rare qu'au temps des études de Daget, bien qu'un individu capturé ait été observé en 1990 lors des études GP DCN et que deux autres l'aient été plus récemment (en 1994-95) aux environs de Batamani (40 km nord Mopti) lors des suivis de l'observatoire de la pêche.

S'il n'est pas exclu que ces deux espèces aient pu représenter dans un lointain passé une part significative des captures, cela ne peut plus être vérifié ni même vraiment discuté aujourd'hui. Tout au plus peut-on rappeler que le premier boom de l'exploitation halieutique (augmentation de l'effort de pêche) remonte à la fin des années 1920 (Fay, 1994). Ces deux espèces, de grande taille et de niveau trophique élevé, ont pu être les victimes précoces du franchissement d'un premier palier de pression anthropique, mais elles ont également pu pâtir d'autres phénomènes non élucidés (climatiques, pathologiques ou autres) et il est aujourd'hui bien difficile de tirer de quelconques conclusions concernant l'évolution négative qu'elles ont subie.

Espèces ayant subi une forte diminution durant la période historiquement connue de la pêche dans le delta

Trois espèces ou taxons ont fortement baissé depuis les études de Daget (années 1945 à début 1960) et plus particulièrement depuis les années soixante : il s'agit de *Gymnarchus niloticus*, de *Parachana obscura* (ex *Parophiocephalus obscurus*) et d'*Heterotis niloticus* et de trois espèces du genre *Polypterus (P. senegalensis, P. bichir et P. endlicheri).*

Pour ce qui concerne la première (*G. niloticus*), le phénomène est d'autant plus remarquable qu'il s'agissait d'une espèce « pas rare dans certaines parties du delta central » et « même très commune au nord, à hauteur de Niafunké » (Daget, 1954). Sans être abondante, elle était très prisée par la pêche et par les consommateurs mopticiens jusqu'aux années soixante[3]. Ce poisson de grande taille, à l'allure et aux mœurs très particulières (vivant dans les grandes herbes aquatiques, construisant un gros nid et capable de le défendre par un comportement agressif, y compris vis-à-vis des humains…), semble avoir subi de plein fouet la réduction de son biotope palustre, constitué d'eaux calmes bordées d'une ceinture de graminées sauvages et dont on peut dire qu'il est aujourd'hui devenu fort restreint dans la région deltaïque. À partir des années 1980, elle disparaît des statistiques de commercialisation à Motpi (Quensière *et al*., 1994). Un individu a toutefois été observé lors des études du GP DCN (1989-91). La pêche n'a certes pas joué dans le sens du maintien des populations deltaïques de cette espèce. Mais, le fait que cette espèce soit aujourd'hui régulièrement capturée dans les régions plus amont du bassin (lac de Sélingué, Haut-Niger guinéen) qui subissent, pour certaines d'entre elles, une forte pression de pêche laisse penser que le facteur environnemental a joué un rôle prépondérant dans la baisse constatée. Quoiqu'il en soit, compte tenu de ce qui vient d'être écrit, il n'y a pas lieu d'être inquiet dans l'immédiat pour l'avenir de cette espèce puisqu'elle reste bien implantée dans le bassin et qu'elle conserve, en certaines zones hors delta, d'importantes populations.

Le cas de *Parachana obscura* semble présenter certaines similitudes avec le précédent, mais il est mal connu. Selon Daget (1954), « cette espèce n'est pas très fréquente », sauf « dans les herbes qui entourent certaines mares ». À vrai dire, cette espèce très discrète n'a jamais du être importante dans les captures et n'a d'ailleurs jamais donné lieu à une rubrique dans les statistiques de débarquement à Mopti, même à la fin des années 1960 et au début des années 1970 (c'est-à-dire avant la sécheresse). Elle n'est pas signalée non plus dans les données récentes de Laë (études du GP DCN, 1990-92) ni dans celle de l'observatoire de la pêche (1994-2001).

Le cas d'*Heterotis niloticus* est mieux connu. Cette espèce apprécie les eaux permanentes stagnantes ou calmes avec un attrait particulier pour la présence de fonds vaseux et d'une abondante végétation de rive. Comme ce type de milieu est devenu rare dans le delta, il n'est pas étonnant de constater que cette espèce ait diminué en abondance – mais dans une moindre mesure que la précédente puisque des

3 Notons aussi que cette espèce semble bien correspondre aux descriptions faites par René Caillé concernant un poisson allongé, à peau lisse sombre et à chair rouge, communément pêché et consommé au début du XIXe siècle dans les régions mandingue et soudanienne (aujourd'hui Guinée et Mali).

débarquements sont encore régulièrement enregistrés dans les enquêtes de terrain et au port de Mopti. Cependant, *Heterotis niloticus* est en même temps devenu l'une des espèces « piliers » de l'ichtyofaune des milieux aquatiques nouvellement créés comme les grands canaux de l'Office du Niger. Contrairement à *Gymnarchus*, elle semble en effet apprécier l'environnement des rizières modernes. D'autre part, elle est en relative abondance présente dans le bassin amont (lac de Sélingué et Haut-Niger guinéen). Dans ces différentes zones, cette espèce suscite une pêche intensive avec d'excellents résultats (forte proportion d'individus de grande taille). L'avenir de cette espèce semble donc assuré dans la partie malienne du bassin du Niger, mais seulement là où seront maintenus des milieux naturels favorables à son développement qu'ils soient naturels ou artificiels.

Les trois espèces de *Polypterus (P. senegalensis, P. bichir et P. endlicheri)* ont souffert de la réduction des milieux palustres permanents. Cependant, si les deux dernières qui étaient déjà « assez rares » à l'époque de Daget ne sont pratiquement plus observées de nos jours, *P. senegalensis* reste localement commune là où ce type de milieu s'est maintenu, par exemple aux environs de Korientzé (nord du delta). Elle y a été observée à de nombreuses reprises dans les captures des pêcheurs lors des enquêtes de l'observatoire de la pêche, entre 1994 et 2001.

D'autres espèces, telles que Bryenomirus niger (ex Gnathonemus niger), Brycinus macrolepidotus, Citharinus citharus, Distichodus spp., Marcusenius senegalensis et Clarotes laticeps se sont considérablement raréfiées durant les années de grande sécheresse, comme le constataient Quensière et al. (1994) puis Laë (1995, et al. 2004) à partir de sources de données différentes. Mais les populations des quatre dernières citées ont repris beaucoup de vigueur depuis 1994 (d'après la base de données de l'observatoire de la pêche) avec le retour de crues moyennes voire bonnes. Les deux premières restent toutefois rares.

Enfin, le groupe des *Synodontis* a connu une baisse quantitative importante de sa contribution aux captures commercialisées depuis la fin des années 1960, sans toutefois connaître de « disparition » dans les espèces rencontrées.

En résumé, la liste des espèces couramment pêchées dans le Niger moyen malien s'est peu modifiée au cours des trois ou quatre dernières décennies. Les deux seuls cas de disparition ou quasi-disparition constatés semblent être intervenus de façon plus ancienne, entre le début du XXe siècle et les années 1960. Pour les autres cas, il s'agit plutôt de disparitions locales (liées notamment à la quasi-disparition d'un type de milieu particulier : les ceintures palustres de hautes graminées sauvages autour de pièces d'eau permanentes de type « mares ») ou bien de simples fluctuations quantitatives en relation assez évidente avec les changements hydroclimatiques.

Des espèces qui augmentent dans les captures, et d'autres qui fluctuent

Le fait que des espèces contribuent significativement aux captures débarquées aujourd'hui alors qu'elles en étaient absentes (ou n'y étaient pas explicitement signalées) hier ne signifie certes pas qu'elles soient nouvellement apparues dans l'écosystème du fleuve Niger. En effet, il est admis que l'intensification de l'exploitation provoque un élargissement du spectre d'espèces ciblées par les pêcheurs

(Laë *et al.*, 2004) pour le cas des lacs de Sélingué et Manantali. Cependant, il est intéressant de constater qu'un certain nombre d'espèces telles que les *Chrysichtis spp.* apporte aujourd'hui une contribution notable aux captures commercialisées alors qu'elles y étaient très peu représentées à la fin des années 1960.

Dans le même ordre d'idée, il semble que la part relative des *Clarias spp*. – qui a, certes, été toujours notable – tend à s'accroître encore au fil des décennies, passant de 2 % à la fin des années 1960 à 10-18 % dans les années 1990.

Quant aux *Labeo spp*. et aux *Cichlidae* (les « tilapias » *lato sensu*), ils restent des piliers de la ressource halieutique avec des fluctuations mineures de leur contribution relative aux captures qui restent toujours très importantes (entre 8 % et 20 %). Le *Tilapia zilli* se montre en particulier très dynamique dans la reconquête de terrains « difficile » tels que les lacs du nord-est au moment de leur remise en eau fin 1994 ou bien les casiers endigués de l'Office Riz de Mopti lors de leur mise en eau chaque année.

Un cran en dessous dans l'ordre d'abondance, un certain nombre d'espèces se maintient bien : les grands *Mormyridés* (notamment *Mormyrus rume*), les poissons-chiens (*Hydrocynus spp.*), le capitaine *Lates niloticus*, les *Auchenauglanis spp.* et les *Bagrus spp*. Quant aux petits *characidae* pélagiques (*Alestes spp., Brycinus nurse, B. leuciscus*), ils peuvent être très abondants mais seulement lors des campagnes qui suivent les bonnes crues. Ils connaissant par conséquent de fortes variations interannuelles.

Conclusions sur les changements intervenus et sur la diversité actuelle des captures

La liste des espèces capturées est relativement stable à l'échelle du Niger malien (delta et Niger amont) depuis la fin des années 1960 malgré des fluctuations dans les rapports de quantité. Il faut noter que cette liste reste longue puisqu'elle comporte toujours plus de quatre-vingt espèces et que la diversité des captures reste remarquablement élevée. En effet, si l'on se base sur les données de Laé (1995) ou de Kodio *et al.* (2002), on constate qu'il faut lister 13 ou 14 espèces pour obtenir 80 % des quantités capturées dans le delta intérieur du Niger alors que, dans d'autres milieux, ce chiffre se situe plutôt autour de 7 (lac de Manantali) ou de 9 (lac de Sélingué) (Laë *et al*., 2004). On peut donc dire que la ressource halieutique reste diversifiée dans la région du delta, traduisant une richesse de milieu encore élevée malgré les atteintes portées, de façon certaine, par les années de sécheresse et, peut-être, par l'emprise de la riziculture intensive.

Quels indicateurs de l'évolution de la richesse/diversité spécifique ?

Pour apprécier l'évolution de la composition ichtyfaunistique, deux indicateurs simples mériteraient d'être suivis à l'avenir.

1- « La richesse des captures en nombre d'espèces ». Cet indicateur pose cependant des problèmes dans la mesure où quelques espèces sont peu fréquentes, rares ou même très rares, et que cela crée une relation entre le nombre d'observations (nbre d'enquêtes de retour de sortie de pêche réalisées) et le nombre d'espèces enregistrées

(*cf.* problème classique de la courbe aire/espèce en écologie terrestre). On pourrait convenir que cette richesse est déterminée, en une zone donnée, par le nombre d'espèces trouvées au cours d'un nombre fixé n (deux cent ?) d'enquêtes de capture réparties sur toute la gamme de techniques, sur toutes les saisons et dans les quatre principaux milieux (fleuve, plaine, chenal-bras, mare).

2- « L'assise biologique de la pêche », dont on vient de proposer supra une définition possible et aisément calculable : le nombre d'espèces qu'il faut prendre en compte pour obtenir 80 % des quantités débarquées.

Évolution des abondances et des structures démographiques

Quel phénomène de baisse ?

La « baisse des ressources halieutiques » ou « l'épuisement des ressources halieutiques » sont des lieux communs des communications de presse et de radio sur l'environnement du fleuve Niger. Et l'invocation de « la surexploitation » comme cause majeure de tels phénomènes supposés se retrouve citée dans presque tous les cas.

Il est important de clarifier cette notion de « baisse de la ressource » pour pouvoir en discuter les causes possibles et pour pouvoir émettre des explications causales à partir des faits observés et des données disponibles.

Précisons tout d'abord que, compte tenu de la durée de vie (brève) et de la fécondité (élevée) des poissons de la province nilo-soudanienne, la ressource poisson dans un fleuve à régime tropical comme le Niger est davantage assimilable à un « flux » de biomasse constamment renouvelé (approximativement à l'échelle d'un turn-over/an) qu'à un « stock », mot qui évoque un renouvellement lent comme cela peut être le cas pour certaines nappes phréatiques ou pour les stocks ligneux constitués des forêts de grands arbres.

La première cause envisageable d'une « baisse de la ressource » doit donc être recherchée du côté d'une éventuelle baisse du flux de la production naturelle de biomasse.

Or, en examinant toutes les données disponibles (à savoir celles des études par enquêtes échelonnées sur de nombreuses années sur les zones de pêche, comme celles obtenues par traitement de la longue série de statistiques de commercialisation à Mopti, OMP) on constate que la productivité en poisson du delta ne se détériore pas de façon particulière, dans le sens où elle reste strictement corrélée à l'indice de crue (figure 30). Les valeurs observées concernent, certes, la production annuelle halieutique débarquée et non pas le flux de production naturelle *stricto sensu*. Mais, seule l'hypothèse d'une production naturelle se maintenant aussi bien que la production débarquée peut expliquer la persistance sur une aussi longue période (atteignant le tiers de siècle) de la qualité de la relation statistique entre indice de crue et capture débarquée totale ou entre surface inondée et capture débarquée totale.

Depuis 1994, les indices de crue sont, en moyenne, un peu meilleurs que durant la période 1973-93 et ils sont surtout assez irréguliers d'une année sur l'autre

(figure 31). Ce qui permet de vérifier le bon « fonctionnement » de la relation crue-captures, soit avec les observations de quantité en transit à Mopti (statistiques OPM), soit avec les observations de capture par effort sur les zones de production (données de l'Observatoire de la Pêche).

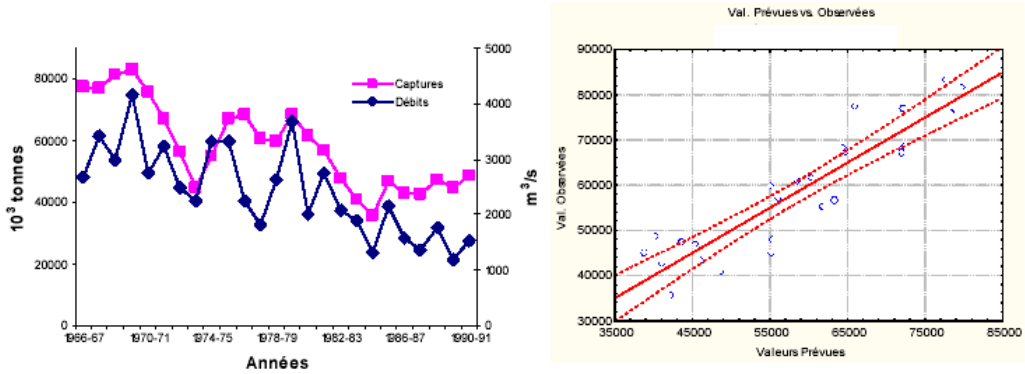


Figure 30 - Évolution des débits et des captures totales estimées dans le delta intérieur du Niger, entre 1966-67 et 1990-91. Un modèle statistique empirique peut être écrit ainsi : « Capture totale/an = A.Débit annuel + B ». Les valeurs de capture prévues par ce modèle sont exposées figure de droite en regard des valeurs observées. Le modèle est manifestement prédictif

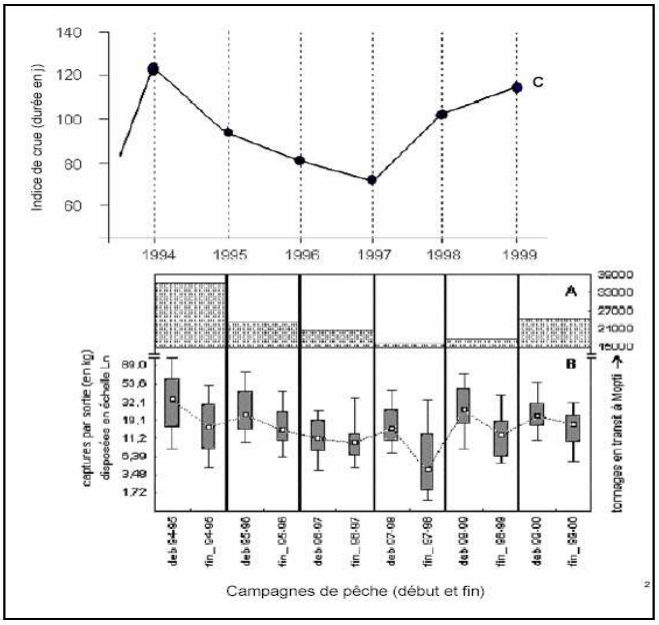


Figure 31 - En haut, courbe C : indices de crue (en nombre de jours au-dessus de 4,50 m à Mopti) pour les crues des différentes années. En bas, courbe A : quantités en transit commercial à Mopti par campagne lato sensu (de décembre chaque année « t » à novembre de l'année « t+1 »), en tonnes d'équivalent poids frais. En bas, courbe B : évolution des CPUE (captures par sortie) enregistrées par l'Observatoire de la Pêche sur les zones de production, pour chaque moitié de campagne active (respectivement début de campagne active : 1er décembre - 15 mars ; fin de campagne active : 15 mars, 31 juillet). La ligne pointillée joint les valeurs médianes des distributions observées, les limites inférieures et supérieures des boîtes sont aux niveaux des percentiles 25 et 75 % et celles des « moustaches » aux niveaux des percentiles 10 et 90 %. Les résultats des campagnes (courbes A et B) sont clairement corrélés aux indices de crue au-dessus (courbe C)

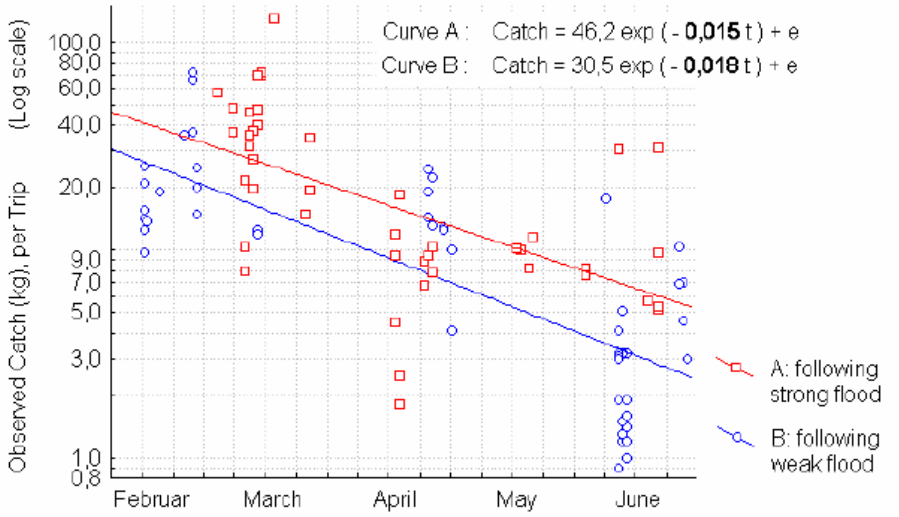
L'hypothèse de détérioration du flux annuel produit par unité de surface active (aquatique) d'écosystème étant écartée, il reste à s'interroger sur ce que recouvre le sentiment de baisse « ressenti » par les pêcheurs. Cette baisse peut être appréciée et discutée à partir de données objectives : les captures par unité d'effort (CPUE) ou quantités de poisson capturées par unité d'effort de pêche (par exemple par sortie d'un jour avec un certain type d'engin). La CPUE étant une donnée facile à observer, les hypothèses qui concernent ses variations sont faciles à discuter et à vérifier (ou à réfuter). Que peut-on dire à ce sujet :

- plus il y a de pêcheurs (et donc de sorties de pêche), moins la production capturée par pêcheur ou par sortie est élevée, pour une production totale annuelle donnée ;
- si la production naturelle totale baisse pour une année donnée, par exemple à la suite d'une crue très faible ne permettant guère d'inondation, alors la CPUE baissera mécaniquement par effet de ratio si le nombre annuel de pêcheurs et de sorties de pêche reste constant (*cf.* figure 31 et infra) ;
- à l'intérieur d'une même campagne annuelle de pêche (entre décembre et juin) qui équivaut comme on l'a écrit par ailleurs (*cf.* infra et Kodio *et al*., 1999) à la « récolte » d'une génération de poisson, la CPUE baisse au fur et à mesure de l'avancement de la campagne, un peu comme pour une récolte agricole : en fin de récolte il ne reste plus que quelques épis épars au sol ! Le phénomène est particulièrement intéressant à suivre entre février et juin (figure 32) puisque le volume d'eau est alors approximativement constant. Ce qui fait que la pente de la courbe de décroissance exponentielle donne pratiquement le taux de réduction journalier de concentration de la ressource (qui atteint 1,5 à 1,8 % par jour) dont la majorité est sans doute imputable à la pêche et le reste à la prédation (notamment par les oiseaux).

Les trois phénomènes qui viennent d'être décrits constituent les trois explications majeures des baisses d'abondance ressenties par les pêcheurs et relayées par les medias. Mais ils sont bien distincts :

- le premier agit à long terme et apparaît sous l'effet de la tendance pluridécennalle d'accroissement de la population : il y a deux fois plus de pêcheurs aujourd'hui qu'il y a trente ou quarante ans. Par conséquent, pour une production totale donnée, la production annuelle par pêcheur (ou par unité de travail de pêcheur) est forcément plus faible, en moyenne, et ceci suffit amplement à justifier le sentiment de baisse d'abondance des poissons (et surtout des revenus) dont se plaignent les pêcheurs ;
- le second agit à l'échelle interannuelle et provoque les constats de baisse drastique de CPUE lors des campagnes de pêche qui suivent les crues déficitaires : si la production naturelle baisse mécaniquement avec le déficit de surface inondée, alors la production capturée, et par suite la production par pêcheur (ou par unité de travail de pêcheur), baissera dans les mêmes proportions (en faisant l'hypothèse que le nombre de pêcheurs et leur quantité de

travail sont restés constants : ce qui est approximativement le cas si l'on considère un intervalle court d'une année sur l'autre)[4] ;



Source : Morand et Kodio, 2004

Figure 32 - Courbe de déplétion des CPUE pour les filets dormants durant l'étiage, sur la base des données de 1995 à 2000.
Étiages de 1997 et de 1998 (qui suivent de faibles crues) : courbe bleue ; Etiages de 1995, 1996, 1999 et 2000 (qui suivent des crues moyennes ou bonnes) : courbe rouge

- le troisième agit à l'échelle saisonnière : en fin de campagne de pêche, c'est-à-dire vers fin mai et juin (voire même début juillet si les pêcheurs tentent de prolonger la campagne), la déplétion de la ressource est très forte : les poissons nés lors de la crue précédente ont déjà été capturés (pour les 2/3 ou les 3/4 d'entre eux) et ceux de la génération suivante ne sont pas encore nés ou sont encore à l'état de larves ou de juvéniles non capturables. Il s'ensuit que, pour quelques semaines, il n'y a plus rien dans l'eau ou presque (sauf quelques gros poissons cachés dans les trous, trop vieux et trop expérimentés pour se laisser prendre !). Par conséquent, les prises par sortie sont catastrophiques, tombant parfois aux alentours de 2 ou 3 kg/sortie seulement ! Ce phénomène est évidemment très provisoire, mais il peut être perçu et relaté sur un mode dramatique (à l'instar, d'ailleurs, de l'ensemble du tableau environnemental sahélien en fin de saison sèche) par des observateurs peu expérimentés.

Bien que tout à fait distincts, ces trois phénomènes alimentent, de façon confondue, les cris d'alarme sur l'état des ressources halieutiques du fleuve Niger. Ceci est très dommageable, car cela conduit à de nombreux travers dans les perceptions (par le grand public) et les appréciations (par les gestionnaires).

4 Mais ce phénomène peut agir aussi dans l'autre sens : si la crue est forte, la capture totale et les CPUE seront meilleures lors de la campagne qui suit. Il reste que la psychologie humaine est ainsi faite que les pêcheurs préfèrent diffuser l'information sur ce qui leur est défavorable et rester discrets sur ce qui leur est agréable.

- Il y a le risque, d'une part, d'un effet anesthésiant de type « crier au loup » qui démobiliserait le public à force de cris d'alarme (« y'a plus de poisson dans le fleuve ») régulièrement démentis par les faits lorsqu'une bonne crue se présente et qu'elle est suivie quelques mois plus tard par des quantités de poissons débarquées en masse au port de Mopti. Si bien que, lorsque de vrais problèmes de préservation se poseront, le public, blasé, pourrait ne plus être prêt à se mobiliser.
- Il y a la confusion, d'autre part, entre les phénomènes qui ne permet pas aux gestionnaires de bien identifier les types de solutions qui doivent être recherchées.
  - Sur le premier point, il s'agit d'un problème à long terme et démographique : que peut-on faire pour éviter que la croissance du nombre de pêcheurs suive la courbe démographique ?
  - Sur le second point, il existe deux parades : la première est de mieux prévoir (pour permettre aux acteurs d'anticiper les variations de quelques mois et de ne pas investir à tort), la seconde est de faire en sorte que les pêcheurs ne soient pas privés de leur possibilité de flexibilité d'activité (pêche/riziculture) en fonction des conditions hydroclimatiques et, également, de leur autoriser une certaine mobilité géographique.
  - Sur le troisième point, il s'agit d'un problème de régulation de l'effort pour éviter le phénomène de « course au poisson ». Une politique de laisser-faire conduit en effet les pêcheurs à s'équiper de plus en plus et à développer une activité débridée dès le démarrage de la campagne pour prendre le poisson avant que les autres pêcheurs n'en fassent autant : ce qui fait que les prises (et les CPUE) s'effondrent ensuite en deuxième moitié de campagne. Avec une activité régulée et plus étalée dans le temps, on pêcherait, avec un équipement plus modeste, une quantité équivalente de poissons (sur la durée totale de la campagne), sans doute un peu plus gros en termes de taille individuelle moyenne (donc avec un prix spécifique plus élevé) et on fournirait plus régulièrement le marché en évitant le pic de surproduction de janvier et la chute des prix qui l'accompagne. La solution passe donc par une meilleure gestion/répartition de l'effort au niveau de la campagne annuelle. Ceci suppose que des accords sur une certaine régulation de l'activité soient établis et appliqués, notamment avec la participation des organisations professionnelles.

Structures démographiques : baisse des tailles et rajeunissement des populations de poissons

Moins médiatisé que la baisse de la ressource halieutique, le phénomène de raréfaction des individus de grande taille est régulièrement évoqué (au titre des doléances) par les pêcheurs et les mareyeurs lors des enquêtes de terrain ou au cours des ateliers participatifs. Ce phénomène est patent et incontestable si l'on compare les structures de taille actuelle et passée dans le delta, pour des espèces précises (figure 34), ou bien si l'on trace les distributions de taille actuelle dans le delta en regard de ce qu'elles sont ailleurs dans le bassin du Niger, notamment dans des zones plus en amont subissant une pression de pêche plus récente ou plus faible (figures 33a et 33b).

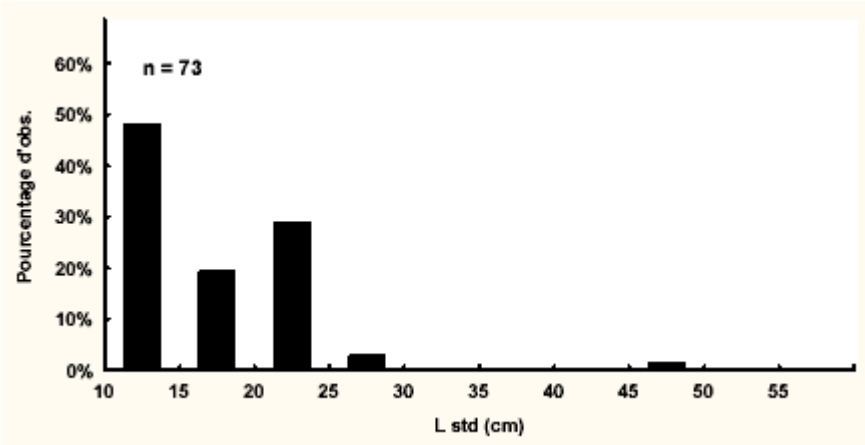


Figure 33a - Structure de taille (longueur standard) des Lates niloticus mesurés dans les échantillons de capture de l'Observatoire de la Pêche, entre 1994 et 2000, dans le delta intérieur du Niger

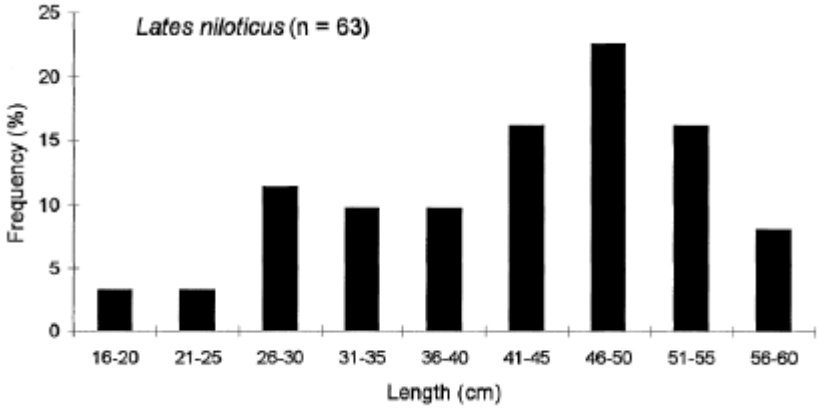
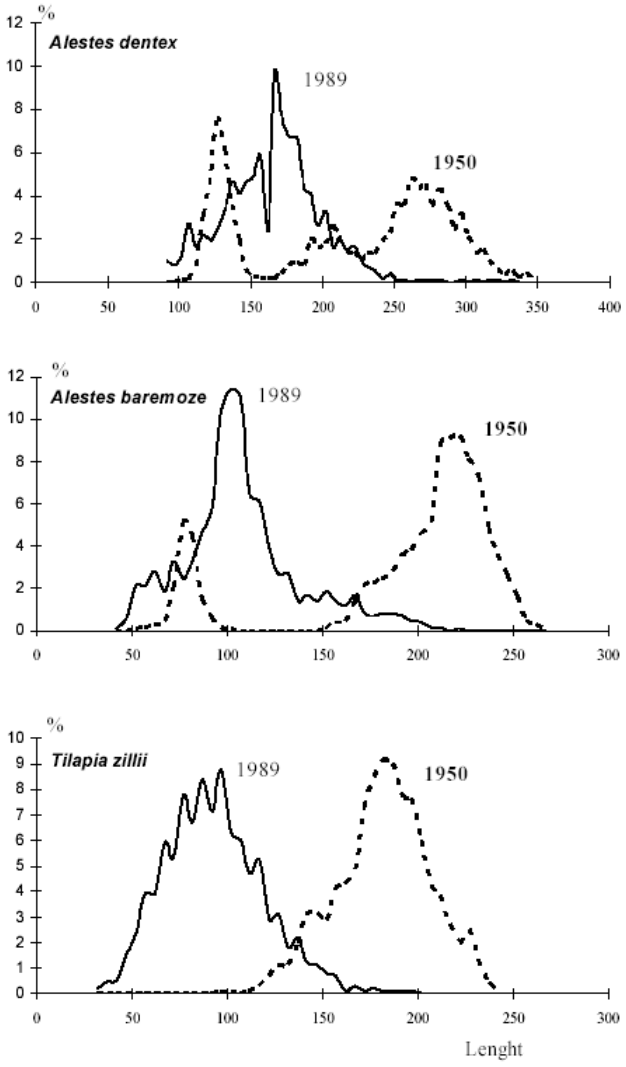


Figure 33b- Structure de taille (longueur standard) des *Lates niloticus* mesurés dans les enquêtes de retour de pêche réalisées en 1996 dans le Niger supérieur guinéen

Compte tenu de ce que l'on sait des courbes de croissance des différentes espèces, on peut d'ailleurs évaluer la proportion d'individus d'âge supérieur à 1 an à moins de 30 % des captures, toutes espèces confondues ; ce qui signifie que la majorité des poissons sont pêchés au cours de leur première année, c'est-à-dire alors qu'ils appartiennent à la classe d'âge « 0+ ». L'explication de ce phénomène de réduction des tailles est bien connue (Morand et Bousquet, 1994 ; Welcomme, 1999) : les populations naturelles intensivement exploitées voient baisser l'espérance de leurs individus et, par conséquent, chuter la proportion d'individus âgés, lesquels sont aussi les plus gros puisque les poissons ont une courbe de croissance quasi-illimitée. Au terme du processus d'intensification d'exploitation, la pêche se transforme par conséquent en une activité de « fauche » précoce des jeunes individus, souvent dans leur première année, comme c'est le cas aujourd'hui dans le delta intérieur du Niger. Cela ne nuit pas à la production naturelle et cela peut même la favoriser dans la mesure où les populations jeunes comportent davantage d'individus en pleine croissance et capables d'un taux d'assimilation élevé. C'est ce qui explique, finalement, le maintien de la production par unité de surface aquatique, alors même que l'effort de pêche ne cesse de s'accroître

dans le delta depuis plusieurs décennies : tout se passe comme si l'on n'atteignait jamais la « surexploitation vraie » au sens d'une atteinte aux capacités de renouvellement de la ressource. Car, du fait de la haute fécondité de la plupart des espèces de ces milieux[5], il y a toujours suffisamment de reproducteurs survivants en juin, en fin de campagne de pêche, pour assurer le remplacement des générations en produisant la progéniture capable d'exploiter pleinement des possibilités biotiques (offres de nourriture) offertes par la crue suivante.



Source : Laë *et al.*, 2004

Figure 34 - Évolution des structures de taille de plusieurs espèces d'intérêt halieutique entre les années 1950 (études de Daget) et les années début 1990 (études GP DCN)

5 Cette dernière assertion, valable pour un grand nombre d'espèces, ne l'est pas de façon absolue pour toutes : celles qui pondent peu d'œufs, notamment celles qui font des nids et s'occupent de leurs jeunes, ont moins de capacité de reconstituer leur population en cas d'exploitation intensive. Il faut noter d'ailleurs que plusieurs de ces espèces (comme Gymnarchus, Polypterus spp) semblent en effet être en difficulté (voir supra). Il apparaît que la taille au niveau du mode (pic de la distribution) est aujourd'hui deux fois plus faible que dans les années 1950.

Si le phénomène de résistance, ou résilience, de la ressource apparaît très solide, il n'a cependant pas que des avantages : les poissons de petite taille ont une valeur spécifique (par unité de poids) moindre, dans la mesure où ils ne sont pas commercialisables en frais (en 2002, un gros Capitaine valait 600 Fcfa/kg, un Tilapia de 12 cm n'en valait que 300 et un *tineni* 150). À égalité de poids total, mieux vaut produire de gros poissons que des petits !

Quels indicateurs de l'abondance de la ressource et de sa structure démographique ?

Les indicateurs sont, ici, bien connus par les spécialistes et ce sont ceux qui sont utilisés dans la présente étude : tonnages capturés ou commercialisés par année, CPUE (moyenne ou médiane), structure de taille des individus capturés (taille moyenne ou bien position du mode).

Conclusion

L'examen des données disponibles sur les poissons du fleuve Niger au niveau du delta et du Mali montre que la ressource halieutique présente aujourd'hui un aspect différent, dans sa structure spécifique et dans sa structure de taille, de celui qu'elle avait dans les années 1950 et même à la fin des années 1960. Si très peu d'espèces ont disparu (et sans doute de façon locale), certaines se sont considérablement raréfiées tandis que la part relative d'autres espèces a augmenté. Par ailleurs, les populations de poisson ont acquis une structure « rajeunie » caractérisée par une dominance des individus jeunes de faible taille alors que les gros individus sont devenus rares. Si les changements qualitatifs semblent surtout liés à la perte de certains types de milieux naturels, les changements de structure démographique semblent, quant à eux, être bien le résultat direct de la pêche.

Mais on constate aussi que, pour l'instant, ces différents changements ne semblent en rien menacer la ressource en tant que « machine à produire des protéines » : la production (en tonnes par an) ne baisse pas, ou du moins elle est toujours proportionnelle à l'inondation. Les « baisses de ressource » régulièrement annoncées ou dénoncées ne sont que des phénomènes provisoires ou bien des artefacts liés à la méthode d'appréciation (par exemple, l'excès de focalisation sur les captures par unité d'effort).

Toutefois, il existe un certain nombre de « dommages » liés à ces évolutions :

- on peut regretter, d'une part, pour des raisons éthiques, la perte ou la raréfaction forte de certaines espèces qui avaient souvent des types bio-écologiques originaux même si elles n'étaient pas « performantes » ni « résistantes » en tant que ressource ;
- on peut diagnostiquer, d'autre part, de façon certaine, une perte de valeur économique de l'ordre de 30 % par baisse des tailles moyennes des individus capturés.

Une gestion plus précautionneuse de la pêche est donc nécessaire. Cependant, cette gestion de la pêche – qui se fera d'abord dans l'intérêt immédiat des pêcheurs (en faisant remonter les CPUE) – doit absolument être accompagnée d'une préservation des

milieux naturels du delta, notamment des plaines inondables librement accessibles aux poissons. Car, c'est bien la réduction ou la disparition de ces milieux qui pourrait porter, dans les années à venir, une vraie atteinte à la ressource dans sa fonction majeure qui est celle de produire des protéines prélevables.

Tendance des ressources et de l'environnement abiotique

Problématique de l'ensablement dans le bassin du Niger

Les habitants des villages et des villes le long du fleuve sont en particulier inquiets, d'une part, par l'envahissement des champs et des habitations par le sable éolien après les tempêtes de sable et, d'autre part, par la formation rapide de bancs de sable et d'îles sableuses dans le chenal principal du fleuve par érosion hydrique. Les dunes bordant le fleuve se sont déplacées de plusieurs dizaines de mètres dans le lit majeur, réduisant l'espace agricole traditionnellement consacré à la riziculture irriguée par submersion naturelle. Cette situation est aggravée par les rares cours d'eau temporaires coulant en saison pluvieuse et qui déversent une bonne quantité de sable dans le lit majeur.

Du fait de la réduction des zones inondées, les paysans ont installé de nouveaux champs dans le lit mineur du fleuve en détruisant la végétation naturelle, ce qui a entraîné une plus forte érosion des berges et du lit dans plusieurs biefs.

Les causes et conséquences de l'ensablement du fleuve Niger sont diverses ; elles se renforcent les unes et les autres. On peut retenir parmi les plus importantes : la sécheresse, la désertification et la pression de l'homme et du bétail sur l'environnement. Parmi les effets directs, on peut citer des villes et des villages menacés, des espaces agricoles réduits, une plus forte migration des populations et du bétail vers des régions plus humides et plus riches en ressources naturelles et une navigation rendue plus difficile sur le fleuve.

La démarche adoptée pour aborder la problématique de l'ensablement se base sur une démarche « bassin versant » qui prend en compte à la fois l'ensemble des ressources naturelles, leurs modes d'exploitation et les facteurs de la dégradation. Il ne s'agit donc pas seulement, ici, de traiter *stricto sensu* de l'ensablement du lit du fleuve (qui se remarque, entre autre, par la dégradation et l'éboulement des berges, la formation/déplacement de bancs de sable, la formation d'îlots de plus en plus nombreux, etc.), mais, aussi, de tenir compte des facteurs (naturels et/ou d'origine anthropique) de dégradation qui sont à l'origine de l'accélération des processus d'érosion éolienne et hydrique et de l'ensablement des mares, lacs et cours d'eau, des habitats et des terres de cultures dans le bassin du Niger.

Facteurs de dégradation

D'une manière générale, la problématique de l'ensablement des terres de culture, des mares, des lacs et des lits des cours d'eau dans le bassin du Niger est fortement liée aux spécificités d'un fleuve qui traverse plusieurs régions climatiques distinctes et qui fait une boucle vers le nord en zone aride sur une très longue distance avant de pénétrer à nouveau en zone soudanienne plus humide. Elle s'explique aussi par l'importance vitale des ressources naturelles (eau, sol, couvert végétal, faune) qui sont partout fortement dégradées et menacées.

La dégradation généralisée des ressources naturelles est due à plusieurs facteurs connus qui sont d'ordre :

- climatique (baisse de la pluviométrie, irrégularité spatiale et temporelle des pluies utiles, diminution des débits et des zones inondées, aridification du climat et déplacement des isohyètes vers le sud, etc.) ;
- et anthropique (augmentation des besoins en eau, en sols et en ressources sylvo-pastorales, concentration des populations et des troupeaux autour des points d'eau, surexploitation des ressources naturelles, extension des cultures sur des terres marginales, déboisement, braconnage, etc.).

La conjonction de ces facteurs naturels, climatiques et anthropiques, a pour conséquence directe, entre autre : la disparition des habitats naturels (faune) et, en de nombreux endroits, du couvert végétal, la diminution, voire la raréfaction, des ressources en eau (de surface et souterraines) et en sols, une modification profonde des équilibres biologiques et des écosystèmes naturels, etc. Le corollaire est l'accélération et l'amplification des impacts de l'érosion hydrique et/ou éolienne, plus particulièrement dans le triangle sahélo-saharien où le processus s'accompagne d'une remise en mouvement des cordons dunaires et des dunes.

En termes de bassin versant, il est évident que ces différents facteurs de dégradation s'enchaînent d'amont en aval et s'amplifient en fonction des conditions topographiques et climatiques locales. Ainsi, si la diminution de la pluviométrie et les périodes de sécheresse ont une conséquence directe sur les débits et sur les superficies des plaines inondées, le défrichement abusif notamment des têtes de bassin et des versants pour les cultures agricoles ou pour le bois favorisent à son tour l'érosion hydrique et le décapage des sols dénudés dont les particules fines sont charriées et déposées en aval.

Problématique de l'ensablement dans les différents sous-bassins

D'une manière générale, l'ensemble du bassin versant du fleuve Niger est touché à des degrés divers par l'érosion hydrique et par l'érosion éolienne, par la dégradation des berges et par l'ensablement des habitats, des terres de culturesdes mares et des lits des cours d'eau. Il importe dès lors de bien sérier les spécificités et contraintes propres à chaque sous-bassin, tout en gardant à l'esprit la notion de priorité, de solidarité et de concertation entre tous les usagers (ressources partagées).

Haut bassin du Niger

Depuis la Haute Guinée, la dégradation des ressources naturelles et du couvert végétal est importante et les feux de brousse sont particulièrement dévastateurs dans toute cette partie du bassin. On observe, en de nombreux endroits, des signes alarmants d'érosion hydrique dont les risques sont accentués par le défrichement des têtes de bassin et des versants et par la dégradation des berges. La ville de Kankan (sur le Milo) est actuellement menacée par l'ensablement. Au Mali, les phénomènes d'érosion des berges et d'ensablement commencent à prendre de l'importance dans cette partie du bassin qui abrite plusieurs grandes agglomérations ou villes (concentration des hommes et des troupeaux) comme Banankoro, Tamani, Macina, Diafarabé et Bamako. Entre Koulikoro et Ségou, l'apparition récente de bancs de sable dans le lit du fleuve contribue notamment à rendre difficile la navigation.

Delta intérieur et moyen Niger

Le delta intérieur, la zone lacustre, le tracé particulier de la boucle du Niger en zone aride et le bassin du moyen Niger dans sa partie sahélienne sont caractérisés par des conditions éco-climatiques beaucoup plus sévères : faiblesse et caractère aléatoire de la pluviométrie, vitesse des vents et températures moyennes élevées, forte évapotranspiration et présence proche du Sahara et d'un stock très important de sable mobilisable. Le triangle sahélo-saharien du Mali est, de loin, la zone la plus touchée par le processus d'ensablement. En effet, au niveau de ces régions, le fleuve est le plus souvent constitué de vastes plaines d'inondation dominées par des plateaux gréseux en voie d'altération, des cordons dunaires et des hautes dunes ou des terres de glacis devenues incultes.

Au Mali, le processus d'érosion éolienne et d'ensablement est intense. On constate une remise en mouvement des dunes qui étaient plus ou moins stabilisées et qui avanceraient de plusieurs dizaines de mètres par an, menaçant directement les points d'eau et le fleuve ainsi que les habitats. Certaines hautes dunes qui surplombent directement le fleuve de part et d'autre (notamment entre Rharous et Gao) constituent un risque majeur pour la sauvegarde du fleuve et le maintien des écoulements vers l'aval. L'érosion des berges, accentuée par le transport du sable et la vitesse des courants lors des crues, provoque le grignotement de la base des dunes et favorise les éboulements : des éboulements et des avalanches de sable directement dans le fleuve sont visibles toute l'année. Ils sont à l'origine de la formation de nombreux bancs de sable et d'îlots qui entravent à leur tour la navigation et diminuent les superficies inondées.

Dans le cercle d'Ansongo qui bénéficie d'une pluviométrie plus élevée (300 mm/an), les cours d'eau temporaires (les *koris*) coulant en saison pluvieuse déversent une bonne quantité de sable dans le lit majeur du fleuve, réduisant ainsi les terres agricoles. L'érosion hydrique combinée à l'érosion éolienne, à l'aridification du climat et à la destruction du couvert végétal provoque des ravinements importants à partir des plateaux et le développement exponentiel des *koris*. Ceux-ci, en l'absence de techniques de conservation des eaux et des sols, charrient à leur tour d'énormes quantités de sable vers le fleuve. Par effet d'entraînement, les berges et les terres de cultures sont également érodées et détruites peu à peu. Les habitats et autres infrastructures socio-économiques (ponts, routes, périmètres hydroagricoles, etc.) sont fortement menacés.

Dans ces parties du bassin, le phénomène d'ensablement et la diminution des débits ont eu des conséquences désastreuses pour les populations locales et les activités économiques qui en dépendent :

- baisse de la nappe phréatique, réduction des surfaces traditionnellement inondées (estimée entre 30 et 50 % entre Mopti à Gao) ;
- diminution drastique de la production halieutique, pastorale et agricole ;
- augmentation de la pression sur les ressources naturelles et forte concurrence (nombreux conflits) dans la satisfaction des besoins pour la pêche, pour l'agriculture et pour l'élevage (diminution des bourgoutières et des pâturages naturels, disparition des couloirs de passage, etc.) ou encore pour la faune sauvage et pour les espèces protégées comme les hippopotames ou les lamantins ;
- diminution des possibilités de navigation ;
- prolifération des plantes aquatiques flottantes (jacinthe, laitue d'eau) qui entravent la navigation, la pêche et les cultures irriguées et qui constituent une menace grave pour la santé humaine ;
- impact sur les barrages et sur les écoulements et les ressources en eau en aval.

La période de sécheresse qui a commencé en 1970 a entraîné des déficits pluviométriques de l'ordre de 30 % et un déplacement des courbes isohyètes de près de 200 km vers le sud.

Depuis 1970, le débit moyen annuel du Niger ne représente plus, dans les régions Nord, que 61 % de ce qu'il était avant. Les mois de janvier à juillet sont les plus affectés par la sécheresse récente. Le maximum qui se produisait en janvier, avant 1970, est observé deux mois plus tôt, en novembre, pour la période après 1970.

Les ressources forestières du bassin du fleuve sont en diminution à cause de leur surexploitation (défrichage pour des fins agricoles et demande croissante de biens ligneux : conséquences logiques de l'accroissement démographique et des effets conjugués des feux de brousse et de la désertification). Cette situation expose les sols à l'érosion hydrique et éolienne, provoque la baisse du niveau des nappes et bouleverse le régime des cours d'eau déjà fragilisés par les sécheresses successives.

Indicateurs proposés pour suivre le phénomène d'ensablement

D'une manière générale, l'accélération du processus d'ensablement (qui s'observe notamment par la remise en mouvement des dunes mortes ou stabilisées) et l'aggravation de l'érosion éolienne et hydrique résultent de la conjonction des conditions climatiques sévères et de la dégradation/destruction du couvert végétal par l'homme et par les animaux (surpâturage, exploitation abusive des ligneux, etc.). Il est donc proposé les indicateurs ci-après décrivant :

- le mouvement des dunes de sable en direction du fleuve ;
- le mouvement de sable dans le lit du fleuve ;
- la perte en superficies inondées et en terres de cultures ;

- la longueur des chenaux ensablés ;
- le degré de dégradation/destruction du couvert végétal ;
- l'évolution de la population et du bétail dans le bassin du Niger ;
- l'évolution du débit du fleuve et de ses affluents ou défluents.

Indicateurs sur le régime du fleuve Niger et sur l'évolution de son environnement

« Pour résoudre ces problèmes, le Gouvernement, avec l'appui des partenaires au développement, a fait des efforts considérables qui ont débouché en 1992 sur l'élaboration du Schéma Directeur d'utilisation des Ressources en Eau (SDRE). Malgré ces efforts, le fleuve Niger est fortement menacé par les pollutions de toutes origines, le gaspillage de l'eau, la sédimentation, l'ensablement, la dégradation des écosystèmes et la prolifération des végétaux flottants tels que la jacinthe d'eau et le tiphas, d'où l'idée de la création d'une Agence du fleuve Niger. » [6]

Cette partie est la conclusion de la question 3 : De quelles connaissances validées dispose-t-on sur le régime du fleuve Niger et sur les processus d'évolution de l'environnement à moyen et à long terme ?

À partir d'une synthèse des contributions de P. Givone, S. Traoré, M. Diallo, L. Diarra, P. Morand, K. N'Diaye, H. Maïga et D. Orange, on s'attachera précisément ici à réfléchir sur les indicateurs mobilisables pour suivre l'évolution de l'environnement du fleuve Niger à moyen et long terme.

Notons d'abord que l'idée d'un réseau d'observation pour la surveillance de la qualité des eaux du bassin du fleuve Niger et de son environnement au Mali est débattue depuis longtemps. Elle a déjà été abordée très concrètement à l'occasion de nombreuses réunions de l'ABN (Autorité du Bassin du Niger) bien sûr, mais aussi à l'occasion du montage (1995-99) de l'observatoire hydrologique régional d'Afrique de l'ouest et centrale, initié par l'IRD puis co-financé par la Banque Mondiale et différentes coopérations étrangères sur demande motivée de l'OMM, puis au moment du colloque « *Sauvegarde du fleuve Niger* » organisé à Bamako en avril 1999 par le gouvernement malien et l'ONU-DAES où le consultant du FEM[7] (Fonds pour l'environnement mondial) a donné tout son appui pour un tel réseau. Enfin, la table ronde sectorielle sur l'environnement organisée par le Ministère de l'Environnement malien à Bamako les 27-29 mai 1999 avait permis de remobiliser cette question[8]. Il faut noter également

6 *In* : *Termes de référence pour l'étude sur la mise en place d'une agence de bassin du fleuve Niger*, Ministère de l'Environnement, Bamako, 1999.
7 Monsieur D. Laroche, 5-7 avril 1999 à Bamako.
8 Discussion entre Claude Sauveplane (ONU-DESA), Pierre Icard (DG Coopération Française), Alain Gerbe (Ministère Environnement du Mali) et Didier Orange (IRD).

l'existence à la DNH (Direction nationale de l'hydraulique) du projet Ghenis sur financement de la coopération néerlandaise (de 2000 à 2002) pour le suivi éco-hydrologique du bassin supérieur du Niger (des sources guinéennes à Koulikoro au Mali) et dont un des objectifs a été l'installation de stations de mesures « qualité » automatiques et télétransmises.

Nous devons également mentionner les nombreux réseaux ou observatoires ayant existé ou existants (tableau 18) qui sont autant de banques à indicateurs. Évidemment, la recherche a également participé à cet effort de synthèse pour la surveillance ou l'observation de l'environnement. Ainsi, par exemple, à la faveur du projet de recherche Gihrex de l'IRD, de nombreuses études et initiatives ont été réalisées pour promouvoir l'idée d'une gestion intégrée des ressources naturelles via des systèmes d'information (Orange, 1999 ; Marie, 2000 ; Dzéakou *et al*., 2002 ; Morand *et al*., 2002a et 2002b ; Gerbe et Bouaré, 2002 et la fiche synthétique de l'OSED décrivant une proposition d'observatoire socio-écologique du delta).

Système	Sous-ensemble	Catégorie	Nom de l'indicateur	Description	Commentaires	CT/MT/LT	Suivi actuel
Environnement	Abiotique	Forçage climatique	Pluviosité	Pluie, intensité		CT/MT/LT	DNM
	Ressources naturelles	Ressources en eau de surface	Hydraulicité	Débit, hauteur d'eau	quantité	CT/MT/LT	DNH
			Pollution	Biologique (DBO, DCO), chimique (conductivité)	qualité	CT	DNH…
		Ressources en eau souterraine	Potentiel	Volume, profondeur statique	quantité	CT/MT/LT	DNH
			Pollution	Biologique (DBO, DCO), chimique (conductivité)	qualité, URGENT	CT/MT/LT	DNH
		Flore	Biodiversité	Suivi des espèces	qualité	MT/LT	oui
			Répartition	Superficie des forêts, production de bois de chauffe et de charbon, superficie des plantes inondables	quantité	MT/LT	oui
		Faune	Biodiversité	Suivi des espèces	qualité	MT/LT	oui
			Répartition	Zones de nidification, production de chasse	quantité	MT/LT	oui
		Poisson	Biodiversité	Suivi des espèces	qualité	MT/LT	oui
			Répartition	Zones de pêche	quantité	MT/LT	oui

		Fertilité des sols et salinisation	Qualité du sol	Rendement agricole, chimie du sol	qualité	MT/LT	oui
		Érosion et sédimentation	Érosion	Matières en suspension, turbidité des eaux	quantité	MT/LT	oui
		Ensablement	Ensablement fluvial	Navigabilité, exploitation de sable fluvial	qualité	MT/LT	oui
			Ensablement terrestre	Rendements agricoles	qualité	MT/LT	oui
	Activités humaines	Agriculture	Cultures	Superficies cultivées	quantité	MT/LT	oui
			Production	Rendements agricoles	quantité	MT/LT	oui
		Cheptel	Production	Production UBT, prix de vente	quantité	MT/LT	oui
		Pêche	Production	Tonnage capturé, CPUE, structure de tailles, prix de vente, étangs,…	quantité	MT/LT	oui
Société	Population	Forçage démographique	Population	Population, genre, âge, catégories socio-économiques		MT/LT	oui
	Économie	Richesses	Revenus	Revenus agricoles, aménagements hydrauliques, forages,…	quantité	MT/LT	oui

Tableau 18 - Quelques indicateurs de suivi du régime du fleuve Niger et de l'évolution de son environnement

Enfin, cette note de synthèse sur les indicateurs fait tout particulièrement référence aux travaux du groupe de concertation pluridisciplinaire CERDIN pour la définition du projet EIDES (Orange, 1999) puis aux différents textes issus du séminaire international sur la « *Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales* » tenu à Bamako, 20-23 juin 2000, sous le haut patronage du Ministre chargé de l'Environnement et du Ministre du Développement Durable (Orange *et al*., 2002).

Rappel sur les connaissances validées

Avertissement méthodologique (d'après le texte de Pierrick Givone)

La contribution de P. Givone précise bien que la « construction de modèles explicitant la dynamique à LT des systèmes environnementaux (forcément) complexes est un défi posé à la recherche ». On peut encore aller plus loin en disant qu'il est sûrement illusoire de vouloir expliciter les comportements de systèmes environnementaux dans leur dynamique globale qui associe à la fois les phénomènes

physiques et les comportements sociaux. Aussi, il est important de préciser ici que les « modèles » et leurs couplages devraient servir ou être utilisés comme plateforme de discussion entre les différents partenaires, c'est-à-dire comme « outils-médiateurs » (Morand *et al.*, 2002b ; Orange, 2002).

Grands forçages communs : tendances climatiques et tendances démographiques

Le travail sur cette question a commencé par un état des tendances sur les grands forçages puis s'est poursuivi par un examen de la situation des différentes composantes de l'écosystème anthropisé qui s'étend autour du fleuve Niger. Les grands forçages à prendre en considération sont de deux types : les tendances climatiques, d'une part, et les tendances démographiques, d'autre part.

Tendances climatiques (d'après le texte de Pierre Sibiri Traoré)

Le continent ouest-africain est une des régions les plus critiques climatiquement. Les modèles y sont très sensibles et ne permettent pas d'envisager une tendance à long terme. Les différents scénarios réalisés à partir des modèles globaux de circulation atmosphérique fluctuent entre –20 % et +40 % d'anomalie pluviométrique à 2100. Jusqu'en 2040, nous serions en période normale légèrement excédentaire. La grande sensibilité des modèles est notamment liée au large impact rétro-actif de la qualité de la couverture du sol sur l'évolution des températures de surface qui devraient augmenter.

Cette impossibilité de pouvoir aujourd'hui donner une tendance à long terme de l'évolution climatique en zone sahélo-soudanienne obligera à prendre en considération plusieurs scénarios de forçage climatique pour la réalisation de scénarios prospectifs. Signalons sur le sujet le programme international de recherche AMMA-Catch.

Tendances démographiques (d'après le texte de Mamadou Diallo)

La population actuelle du Mali est de l'ordre de 10 millions d'habitants Cette population est inégalement répartie sur l'étendue du territoire national. En 1987, 65 % de population vivait sur 25 % du territoire national. En 1998, ce contraste s'est encore accentué puisque seulement 30 % du territoire national renferment 91 % de la population résidente. La densité moyenne sur le territoire national est passée de 6,2 habitants au km^2 en 1987 à 7,9 habitants au km^2 en 1998, avec de fortes disparités selon les régions. En effet, si l'on relève dans la région de Tombouctou une densité de 0,9 habitant au km^2, on note dans la région de Ségou 25,9 habitants au km^2 en 1998. Enfin, le taux d'accroissement naturel était de 3,7 % entre 1976 et 1987. Ce rythme de croissance de la population est considéré comme élevé car, en dehors de tout phénomène de migration, il aboutit à un doublement de la population tous les 19 ans. Cette forte croissance est cependant contrebalancée par une forte émigration de la population : ce qui semble faire du Mali un pays à faible croissance générale de la population. En effet, la population résidente a augmenté de 1,8 % en moyenne entre 1976 et 1987. Ce taux a été de 4,5 % pour le milieu urbain et de 1,2 % pour le milieu rural. En 2025, la population est estimée entre 16 et 20 millions selon les scénarios : la population rurale ne représenterait plus que 51 % du total (environ 9 millions) pour 73 % aujourd'hui. Les plus fortes augmentations de population auront lieu à Bamako où la population sera doublée et dans les villes du Nord. Mais, en valeur absolue, la région

de Bamako et celle de Ségou-Mopti resteront les plus fortes concentrations du pays, respectivement 2,9 millions et 2,4 millions pour 0,9 million et 0,6 million en 1995.

Les conséquences sur l'approvisionnement alimentaire sont importantes. À l'exception des céréales où la consommation urbaine atteindra environ 40 % de la production nationale, les marchés urbains à eux seuls absorberont la plus importante part (55 à 75 %) de la production de poisson, de viande et de fruits et légumes en 2025, contre moins de la moitié en 1995. La consommation alimentaire des villes en produits locaux augmentera ainsi 3,5 fois plus vite que celle du milieu rural au cours des trente prochaines années. La production de céréales, de poisson, de fruits et légumes et de viande devra donc doubler, voire tripler. La productivité agricole doit alors augmenter au moins dans le même ordre de grandeur. Enfin, cette expertise souligne que dans le domaine de l'environnement, aussi bien en ville qu'à la campagne, les maliens se trouveront confrontés à des problèmes cruciaux hypothéquant sérieusement le développement économique et social du Mali. Ces problèmes sont : la pollution, l'insalubrité, la mauvaise gestion de l'espace, les nuisances sonores, la désertification et l'érosion éolienne et hydrique.

Indicateurs sur les tendances des ressources de l'écosystème

Indicateurs sur les tendances des ressources en eau (d'après les textes de Almoustapha Fofana, Didier Orange et Mamadou Diallo)

Les eaux de surface sont, en quantité, directement dépendantes du forçage climatique (pluviométrie), c'est-à-dire qu'elles présentent, d'une part, de fortes variations saisonnières (crue - décrue) et, également, de fortes variations interannuelles (années humides - années sèches) indépendamment des tendances sur le long terme liées au forçage climatique (*cf.* paragraphe ci-dessus). On ne note pas de problèmes majeurs en termes de qualité, si ce n'est des pollutions ponctuelles et épisodiques pouvant cependant représenter un risque majeur pour l'environnement et pour l'homme.

Les eaux souterraines existent en grande quantité. Elles sont caractérisées par un flux de renouvellement annuel de 55 milliards de m^3 sur lesquels 105 millions de m^3 seulement sont exploités (soit à peine 0,2 %), mais elles subissent localement de graves problèmes de qualité bactériologique et parfois chimique (cas de pollution de la nappe profonde au niveau du bief de Bamako).

Les indicateurs de quantité et de qualité sont nombreux, de même que les réseaux de suivis, souvent centralisés au niveau de la DNH (*cf.* tableau 18). On peut noter :

- le Bulletin hebdomadaire multidisciplinaire du GTPA d'assistance agro-météorologique, pour le débit et la hauteur d'eau,
- la DNH et la DNSP réalisent des suivis de qualité des eaux de surface,
- le réseau Sigma pour la qualité des eaux souterraines (Simonot et Walraevs, 1991 ; Tall, 1999).

Indicateurs sur les tendances des ressources naturelles biotiques

La flore et les cultures (d'après les textes de Lassine Diarra et de Mamadou Diallo)

D'une façon générale, on ne constate pas d'effet majeur de la sécheresse sur la biodiversité en termes de présence/disparition d'espèces.

La superficie des formations ligneuses a connu au cours des quinze dernières années une baisse annuelle de 0,05 % (87 km^2/an, soit plus de 1 000 km^2 en 15 ans), diminution surtout liée à la baisse de la pluviométrie avec une disparition de certaines forêts mais leur repousse avec le retour de la pluie.

La consommation de bois de chauffe a enregistré au cours des dix dernières années une croissance moyenne de 1,6 %, dont 2,8 % pour le milieu urbain et 1,4 % pour le milieu rural. Celle du charbon, réservée au milieu urbain, est de 30 000 t avec une croissance moyenne de 4,14 % par an.

Le taux de croissance des productions issues des cultures vivrières (mil, maïs, sorgho, riz, blé, fonio) a été de 4,9 %, en notant que cette augmentation est davantage imputable à l'extension des superficies cultivées qu'à la hausse des rendements.

Enfin, on note une extension importante de la jacinthe d'eau durant les années de sécheresse, mais la lutte biologique est maintenant efficace.

Les indicateurs sont : le suivi des espèces, la superficie des forêts, la production de bois de chauffe et de charbon, la superficie des zones inondables, des bourgoutières et des vétiveraies hautes…

La faune terrestre et le cheptel (d'après le texte de Lassine Diarra)

Il n'y a pas de forte diminution de la biodiversité malgré la disparition ou la raréfaction de quelques espèces (les lamentins). Mais on note un problème important de disparition des lieux de nidifications des espèces migratrices (surtout dans le delta intérieur) et des possibilités de pullulations d'oiseaux et de rongeurs pouvant engendrer des dégâts importants dans les récoltes.

La diminution des pâturages sous l'effet de l'emprise croissante de l'agriculture sédentaire ne favorise pas la sécurité alimentaire du cheptel bovin qui diminue dans certaines régions proches du fleuve.

C'est ainsi que l'élevage malien est en train de se déplacer lentement vers le sud du pays : à Sikasso, l'effectif du troupeau bovin est passé de 336.000 UBT en 1970 à 741.000 UBT en 1995, soit + 121 % (-1 4 % à Mopti).

Les indicateurs sont : le suivi des espèces, les UBT, le suivi des lieux de nidifications…

Les poissons et la pêche (d'après le texte de Pierre Morand)

On constate toujours un bon fonctionnement des mécanismes de renouvellement de la ressource poisson attesté par le fait que la production a beaucoup augmenté depuis

l'épisode de sécheresse et qu'elle répond toujours aussi bien à l'inondation réalisée par la crue précédente (c'est-à-dire selon la même courbe–réponse). Elle a, par exemple, été très élevée, c'est-à-dire supérieure à 100 000 t, pour les campagnes de pêche 1994-95, 1998-99, 1999-2000 et 2003-04, qui ont suivi de bonnes crues. Ce « bon fonctionnement » est toutefois conditionné par le maintien de l'écosystème fleuve-plaine en état de bonne santé.

On constate cependant la raréfaction de certaines espèces sans doute due, en premier lieu, à la réduction de certains types de milieu (zones de haute végétation palustre permanente). Toutefois, cela ne nuit pas à la production totale car ces espèces n'avaient pas une grande importance dans le total des captures et elles sont, de toute façon, remplacées par d'autres dont les captures se sont considérablement accrues.

On constate également une perte de valeur économique très significative (jusqu'à 30 %) du fait d'un effort de pêche excessif qui entraîne, d'une part, une baisse des captures par unité d'effort (et conséquemment par unité de coût d'exploitation) et, d'autre part, une baisse de la taille moyenne des individus capturés (donc de leur prix au kg).

Le potentiel de développement de la pisciculture villageoise en étang est important.

Les indicateurs sont bien connus des spécialistes et très largement utilisés et diffusés : tonnages capturés ou commercialisés, CPUE, structure de taille des individus capturés.

Indicateurs sur les tendances de l'environnement abiotique

Fertilité des sols et salinisation (d'après le texte de Kabirou N'Diaye, d'Hamady N'Djim et de Jean-François Bélières)

La baisse de la fertilité des sols est l'une des contraintes majeures à l'accroissement des productions agricoles. D'une façon générale, elle est davantage liée à la pression démographique (réduction des temps de jachères) qu'à l'érosion hydrique (voire éolienne). En effet, ces phénomènes d'érosion sont souvent associés à des processus de redistribution locale de la fertilité des sols.

Le problème de salinisation des sols dans les grands périmètres irrigués existe, mais il est maintenant bien contrôlé. Ce problème a surtout été étudié dans l'Office du Niger où la fertilité des sols est non seulement affectée par une augmentation de l'alcalinité mais aussi par une baisse de leur fertilité organique et minérale (potassium) dont l'impact commence à se faire sentir, notamment dans la zone du Macina. Cependant, malgré une situation relativement satisfaisante, les évolutions actuelles sont marquées par une aggravation des facteurs de risque liés :

- à l'extension des superficies cultivées et à une diminution des volumes d'eau disponibles limitant le lessivage ;
- au développement des cultures de contre-saison augmentant la recharge de la nappe dont le niveau reste en permanence à proximité de la surface ;

- au développement d'aménagements sommaires concernant le planage et le réseau de drainage.

Les indicateurs sont : les rendements agricoles, la chimie du sol…

Érosion et sédimentation (d'après le texte de Didier Orange et d'Housseini Maïga)

Le fleuve Niger a un transport de sédiments très faible tout au long de son cours.

Cependant, l'érosion par ravines et l'érosion des berges peuvent être localement importantes, surtout dans la partie haute et moyenne de sa vallée, mais peu de matières érodées arrivent au chenal principal du fleuve.

La qualité des sédiments transportés par le fleuve est de type argileux. Le delta amont représente une plaine d'inondation où se déposent ces sédiments fertiles.

Enfin, il est important de remarquer que le lac Débo subit actuellement un comblement par un bouchon vaseux amenant de nouvelles conditions écologiques de ce lac. À la faveur des nombreuses années successives de sécheresse, le bourgou a pu s'installer durablement sur les berges du lac et les crues récentes plus fortes n'ont pas eu les compétences de détruire ces nouvelles bourgoutières.

Un indicateur simple est le suivi par la DNH du taux de matières en suspension dans les eaux du fleuve.

Ensablement ou non ? (d'après le texte d'Housseini Maïga et de Didier Orange)

En règle générale, les populations le long de la vallée du fleuve Niger sont inquiètes quant à l'ensablement du lit majeur du fleuve du fait, d'une part, d'une impression de formation rapide de bancs de sable et d'îles sableuses dans le chenal principal du fleuve et, d'autre part, de l'envahissement des champs et des habitations par le sable éolien après les tempêtes de sable.

L'apparition des bancs de sable est avant tout liée à la baisse du niveau des eaux.

Par ailleurs, ce sentiment populaire est accentué par les problèmes de navigation sur le fleuve,très largement liés à l'absence de dragage d'un fleuve dont le fond est essentiellement constitué de sable. Les bancs de sable sont effectivement mobiles, mais le suivi de la dynamique des matières en suspension a montré que le lit majeur du fleuve Niger ne subissait pas d'ensablement en tant qu'ajout de sable.

Il y a « ensablement » en tant que gêne croissante de certains usagers par la présence de sable, mais les données scientifiques montrent qu'il n'y a pas d'augmentation du stock total de sable dans le lit du fleuve sur sa partie amont (des sources guinéennes à la sortie du delta).

Il existe par contre des problèmes de perte de plages et de désensablement du lit provoquant la déstabilisation de certaines berges, du fait de l'exploitation intensive du sable dans le lit du fleuve à proximité des zones urbaines qui conduit à des impacts

écologiques dangereux pour la vie du fleuve (disparition d'espèces de poissons, diminution des stocks…).

Sur la boucle du Niger (après le delta), le mouvement des dunes par érosion éolienne et la création récente d'un nouvel erg sont des évidences vécues par les populations et observées par de nombreux programmes de recherche et de développement. Le transport éolien de sable stérilise alors certaines zones de cultures sur berge et le mouvement induit des dunes menace par endroits la vallée du fleuve Niger.

Un indicateur est le suivi des accidents de navigation.

Cadre théorique de la définition d'indicateurs de suivi

Depuis la prise de conscience récente de la dégradation de l'environnement et de l'épuisement de certaines ressources par les activités humaines, les différents organismes nationaux et internationaux préconisent la mise en place de systèmes de suivi de l'environnement. Les recommandations de la déclaration de Rio (1992) vont dans ce sens et encouragent la conception d'indicateurs qui permettraient d'apprécier le degré de durabilité d'un développement et, en d'autres termes, de mesurer l'interaction entre les sociétés et leur environnement. C'est la raison pour laquelle, ces dernières années, les projets d' «observatoires de l'environnement » se sont multipliés.

Un observatoire a pour objectif de produire régulièrement et sous de faibles délais des informations normalisées et de les diffuser vers des bénéficiaires extérieurs, et tout cela de façon durable. Un observatoire correspond donc à un processus d'accumulation, d'organisation et de restitution de l'information. À terme, il doit pouvoir participer ou aider à la gestion de l'environnement en proposant un ensemble d'outils d'aide à la décision. Dans ce cadre, l'indicateur peut être défini de la façon suivante : les indicateurs sont avant tout des outils de communication destinés à transmettre une information de la façon la plus synthétique possible.

Les indicateurs de suivi de l'environnement doivent répondre à un certain nombre de conditions afin d'assurer la fiabilité et la durabilité du système de suivi. Un indicateur doit être parfaitement défini, de qualité connue et constante et il doit se conformer autant que possible à des normes internationales. La Banque Mondiale précise que de bons indicateurs doivent satisfaire les propriétés suivantes :

- être développés dans un cadre conceptuel faisant l'objet d'un consensus ;
- être clairement définis et faciles à comprendre ;
- être agrégeables : pouvant être exprimé à différentes échelles ;
- être objectifs et reproductibles : indépendants de celui qui collecte les données ;
- ne pas exiger trop de données nouvelles (privilégier les données existantes ou aisées à mobiliser) ;
- pouvoir être appropriés par les utilisateurs ;
- être limités en nombre ;

- porter à la fois sur les activités, les processus, les résultats et les impacts.

Le choix des indicateurs se fera donc en fonction des données existantes, de la facilité d'acquisition des informations et autant que possible de la conformité aux qualités énumérées ci-dessus. Il dépendra également du coût d'acquisition (il dépend donc du contexte financier, technique et humain). Ainsi, de nombreux indicateurs théoriques s'avèreront rapidement irréalisables pour des raisons économiques et pratiques.

Conformément aux recommandations de la Conférence de Rio (1992), le définition d'indicateurs du développement durable a été l'objet, durant ces dernières années, de multiples travaux, particulièrement en termes de cadrages et de méthodologies. Des groupes d'experts ont cherché à mettre au point des canevas méthodologiques permettant de définir le jeu d'indicateurs le plus approprié et le plus efficace pour suivre et caractériser l'évolution d'un couple quelconque Société-Environnement. Ainsi, par exemple, la Commission du développement durable des Nations Unies (1996) propose une liste de 134 indicateurs classés selon deux entrées croisées : d'une part une catégorisation en 4 domaines (social, économique, environnemental, institutionnel), d'autre part, une déclinaison en trois natures : pressions, états et enfin réponses apportées par les sociétés.

Mais il n'existe pas encore de cadre de référence unanimement reconnu, malgré les travaux de la FAO et le projet « Indicateurs du développement durable » du programme international « SCOPE » (Scientific Committee on Problems of the Environment) des Nations Unies lancé en 1994. L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a développé en 1993 un modèle conceptuel Pression-État-Réponse (modèle PER) qui est sûrement le plus connu et le plus utilisé. Il est basé sur les impacts négatifs du « système anthropique » sur le « système environnement naturel ».

Dans le cas du suivi du régime du fleuve Niger et de l'évolution de son environnement, la définition d'un système de suivi de l'état de l'environnement passe donc par l'analyse des relations Société-Environnement. Les indicateurs devront caractériser les relations de la société à son environnement dans le bassin fluvial du Niger, selon un jeu constant de pression-réponse (figure 35).

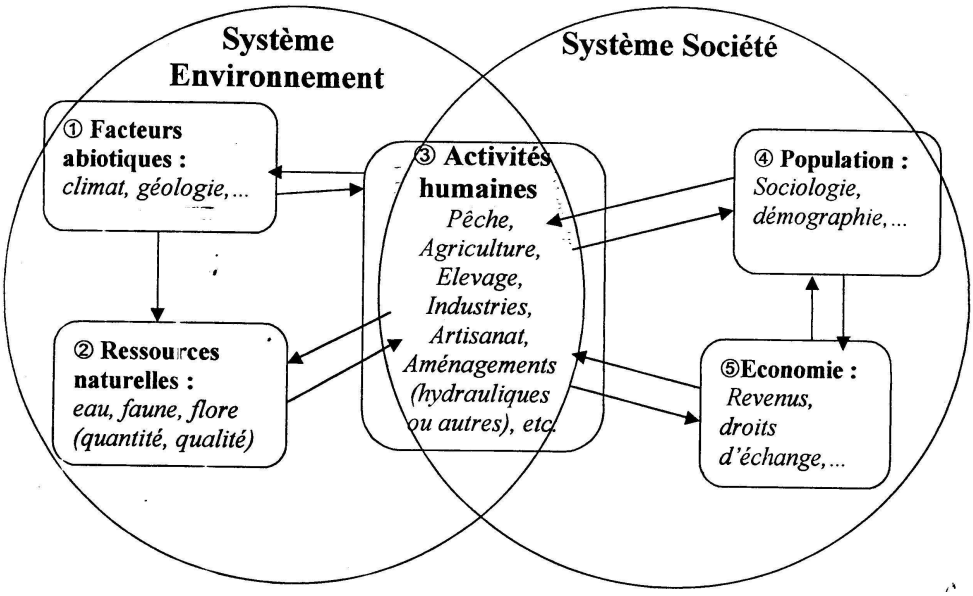


Figure 35 - Modèle Société-Environnement pour le choix des indicateurs de suivi du régime du fleuve Niger et de l'évolution de son environnement

Chaque compartiment interagit avec les autres, ce qui est représenté dans la figure ci-dessus par des flèches dans les deux sens. Ces relations correspondent à des pressions positives ou négatives exercées d'un compartiment sur l'autre. Notons que, contrairement aux modèles PER classiques, les pressions ne traduisent pas forcément une action néfaste. Ainsi, les activités humaines vont exercer une pression sur les ressources naturelles qui, elles-mêmes, exercent une pression sur les activités humaines. Par exemple, le prélèvement de poissons (ou quantité de poissons pêchés) dépend de la disponibilité en poissons qui est liée directement à la quantité de poisson à un endroit donné, et cette disponibilité en poissons va également influencer l'activité de pêche en conditionnant les migrations des pêcheurs.

Indicateurs mobilisables pour le suivi du régime du fleuve Niger et de l'évolution de son environnement

Les indicateurs de suivi du régime du fleuve Niger et de son environnement caractériseront donc les 5 sous-ensembles suivants (selon le modèle de la figure 35).

- Les facteurs abiotiques de l'environnement : facteurs physiques, géologiques, climatiques, … ;
- Les ressources naturelles : qualité et quantité de l'eau, de la faune, de la flore (biodiversité, …) ;
- Les activités humaines : résultats d'exploitation (rendements agricoles, tonnages de poissons, …) ;
- La population : sociologie, démographie, ethnie, … ;
- L'économie : revenus des ménages, nombre d'habitants.

Conclusion

Nous avons listé dans le tableau 18 (infra) des indicateurs permettant de définir des tendances d'évolution du régime du fleuve Niger et de son environnement. Dans un second temps, ces indicateurs pourraient participer à la structuration fonctionnelle d'un système d'information environnementale (SIE), ce qui renvoie à la question 6 et à l'annexe 2 de cette note.

Enfin, pour conclure, nous proposons le tableau ci-dessous pour résumer les tendances à moyen et à long terme caractérisant aujourd'hui le régime du fleuve Niger et l'évolution de son environnement (tableau 19).

	MT	LT	Observations	Indicateurs de suivi
Ressources en eau	>0	?	Eaux souterraines peu utilisées, SIE « alerte »	Q, H, Conductivité, DCO, BCO
Flore	=<0	?	Contrôle possible de la jacinthe d'eau	Suivi des espèces, Surfaces cultivées
Faune	=<0	?	Opposition entre développement agricole et développement élevage	Suivi des espèces, UBT
Poissons	=<0	?	Développement piscicole en étang	Suivi des espèces, CPUE
Fertilité des sols et salinisation	<0	<0	Contrôle possible de la salinisation	Rendement agricole
Erosion et sédimentation	=<0	=<0	Fertilité des plaines d'inondation, stabilisation des berges	MES
Ensablement	=<0	=<0	Draguage du fleuve, SIE « exploitation du sable »	Navigabilité

Tableau 19 - Les tendances à moyen (MT) et à long terme (LT) du régime du fleuve Niger et de l'évolution de son environnement

© IRD éditions 2007

ANNEXE 1 - SYSTEME D'INFORMATION (Source : A. Fofana, DNH)

Domaines	Nom du système d'nformation	Rattache-ment institution-nel	Informations collectées	Informations produites	Niveau de pérennisation	Niveau de couverture	Niveau d'informatisation
Eaux de surface	Radio, téléphone, BLU, PCD (Plate forme de Collecte des Données), Poste et réseau hydrométrique	- MMEE - DNH	Hauteurs et débits des cours d'eau	*Bulletins (mensuels, décadaires, hebdomadaires) * Note sur la crue, annuaires hydrologiques	Hebdomadaire Décadaire Semestriel Annuel	National (100 stations hydrométriques)	Logiciels : GESTRA, GHENIS Logiciels spécialisés : HYDROM, SAFARHY IDRISI, HYDRACCESS Logiciels courants Messagerie électronique
Eaux souterraines	Réseau piézométrique	- MMEE - DNH	Niveau statique	*Annuaire piézométrique	Bi-annuel	National	Logiciels courants
Hydraulique urbaine, adduction d'eau	Suivi technique et financier	- MMEE - DNH	* Financières et techniques * Nombre de villes dotées de réseau AE * Volumes d'eau mobilisé	Rapport de suivi semestriel	Contrat de 5 ans	60 systèmes AEP	Logiciels courants

 © IRD éditions 2007

Aménagement hydraulique	Aménagement des cours d'eau	- MMEE - DNH	* Débits * Pluviométrie * Étude Géotechnique * Levées topographiques * Données topographiques	Rapports techniques (ensablement du chenal navigable, pose de balise, réparation des quais, protection des berges)	Continue	National	Logiciels courants Logiciel spécialisé
Hydraulique rurale	Réalisation des forages et des puits	- MMEE - DNH	* Nombre d'ouvrages réalisés * Nouveaux forages * Nouveaux puits * Réalisation en équipement de pompe * Réhabilitation	Tableau de bord rendu hebdomadairement à la direction Rapport trimestriel Rapport mensuel Rapport annuel	Continuel	Tout le territoire	Logiciel courant
Qualité des eaux (*cf.* tableau 19)	Qualité des eaux	- MMEE -DNH -LQE (DNH)	Paramètres physico-chimiques et bactériologiques	Certificat d'analyse d'eau	Journalier	National	Logiciels courants
Météorologie	GTPA (Radio, Télé, Journaux, BLU)	- MTIC - DNM	* Pluviométrie * Niveau d'eau * État des cultures * Pâturages * État Phytosanitaire * État zoo sanitaire * Pêche	Bulletins décadaires Bulletins mensuels	Saison des pluies Saison sèche	National	Logiciel spécialisé CLIMBASE Logiciels courants
	Agro météo	- MTIC - DNM	Nombre de paysans suivis	Champs suivis Champs non suivis	Saison des pluies		

 © IRD éditions 2007

	Système d'information destiné aux usagers	- DNM	* Pluviométrie * Température (maxi mini, moyen) * Vent (direction, vitesse) * Insolation, * Évaporation, ETP	Annuaire Climatologique Prévision saisonnière	Annuel Juillet, août, septembre	Tout le pays	100 %
Environnement	Information sur la forêt	- MEA - DNCN	* Quantité de bois exploité au niveau des forêts classées * Potentiel des ressources ligneuses * Composition floristique des forêts	Rapport trimestriel Rapport annuel Bulletin sahel vert	continue	Tout le pays	
	Information sur la faune	- MEA - DNCN	Nombre et diversité des espèces existantes		continue	Tout le pays	
Navigation	RAC	- MET	* Transport fret, passagers * Position des unités	Tonnage et nombre de passagers Programmation des unités	Campagne 6 mois Campagne 6 mois	Koulikoro à Gao	Billetterie, transport, fret et passagers, secrétariat
	Téléphone Fax		Étiage Mopti - Koulikoro		12 mois		
DNACPN : Assainissement	Assainissement, contrôle des pollutions et des nuisances	- MEA	Pollution par : - eaux usées domestiques - eaux usées artisanales - eaux usées industrielles - jacinthe d'eau	Information, sensibilisation, éducation, application des textes	Rapport mensuel, trimestriel, semestriel, annuel	District de Bamako	Connections Internet, dnacpn@datatech.toolnet.org

© IRD éditions 2007

DNAMR : Développement rural	Bureau de documentation courant	- MA	Bilan de la campagne agricole du Mali : * superficies emblavées * superficies semées * production * quantité des intrants * rendement	Rapport d'activité, émission radio et télévisée * réalisation * comparaison à l'année précédente	Bibliothèque et production régulière *Rapport mensuel *rapport décadaire *rapport annuel	Répertoire de la documentation informatisée zonale nationale et régionale	Messagerie électronique Logiciel courant de traitement des données

 © IRD éditions 2007

DNAER / Aménagements des ressources naturelles : - 1. Potentiels aménageables et aménagés - 2. Normes techniques des aménagements hydroagricoles - 3. Schémas Directeurs et plans d'aménagement Documentation Informations documentaires	Répertoire régionalisé des ressources aménagées et aménageables du Mali Référentiel national des normes techniques d'aménagement Plans et schémas Répertoire de documentation	Bureau statistique suivi-évaluation Division études et planification Division études et planification Bureau de documentation et de communication	Caractéristiques des ressources aménageables et aménagées Normes techniques des aménagements hydro agricoles Planification des ressources aménageables Indexations documentaires	Extraits de la base de données Références techniques Élaboration de schémas et de plans directeurs d'aménagements des différentes zones du territoire national Recueil des index documentaires	Actualisation périodique - DNAER - Bureaux d'études - ONG - DNAER Réseau de documentation du MAEP	Tout le pays Tout le pays Tout le pays Tout le pays	Base de données ACCESS Centralisation des données Pas informatisé pour l'instant La base de données existe
CMDT	Compagnie de production du coton	- MA	* Rapport bilan * Rapport de commercialisation * Rapport d'achat	* Superficies * Exploitation * Production * Commercialisation * Évacuation du coton * Égrenage * Population	Conservation des archives de la base jusqu'à la direction à condition que le système d'encadrement soit durable	* Toute la région de Sikasso * Une partie de la région de Kayes * Une partie de la région de Ségou	* Toute la direction générale * La région pour la comptabilité générale et la trésorerie générale.

 © IRD éditions 2007

IER	Études et recherches agricoles	- MA - MEP	Études et recherches sur les systèmes de production agricole	État d'évolution des systèmes agraires	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	Logiciels courants Logiciels spécialisés Logiciels de gestion des données SIG Tableurs
			Recherches thématiques	Développement variétal des productions agricoles	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	
			Évolution des systèmes agraires	Nouvelles orientations de la politique agricole	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	
			Analyse des politiques agricoles	Tendance des filières agricoles	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	
			Étude des filières agricoles	Développement des techniques de préservation des ressources naturelles	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	
			Recherche et Développement	Amélioration génétique des productions animales	Pluriannuel et annuel	Zonal National Régional	
Santé animale	RAC, FAX	-MEP	Maladies infectieuse de la liste A et B de l'OIE	Natalité, Mortalité	Continue	National	Messagerie électronique Logiciel de traitement
				Quantité de vaccins disponibles	Rapport mensuel, rapport annuel	National	Messagerie électronique Logiciel de traitement
Pêche	Capture de poisson	-MEP	* Quantité de poisson pêché par variétés * Quantité de poisson commercialisée	Quantité de poisson frais, fumé, brûlé et séché	Rapport mensuel, rapport annuel	National	Messagerie électronique Logiciel de traitement
Protection civile	Sécurité des personnes et des biens	- MSPC (Ministère de la Sécurité et de la Protection Civile)	* Pertes en vie humaine suite aux inondations	Évaluation des dégâts	Rapport annuel	National	Messagerie électronique Logiciel de traitement

 © IRD éditions 2007

			* Pertes en bien matériel				
Industrie	Recensement industriel	- MIC - DNI (Direction Nationale des Industries)	*cf.* page ci-après	Aucune publication	6 recensements réalisés	National	SPSS, EXCEL, WORD ACCESS, EPI INFO 70 %
	Enquêtes industrielles		*cf.* page ci-après	Aucune publication			
	Suivi des projets industriels		*cf.* page ci-après	Aucune publication	Le suivi des projets est permanent, tous les trimestres		

Informations collectées (complément au tableau)		Abréviations du tableau
1 - Sur les entreprises industrielles a- Identification des unités industrielles : Nom, raison sociale, statut juridique, adresse du siège social, année de création et de démarrage ; Numéro fiscal et numéro statistique, régime de propriété, nationalité des propriétaires. b- Établissements de l'entreprise c- Branches d'activité : activités principales, secondaires d- Financement et investissement : Capital social, dettes à moyen et à long terme ; Investissements réalisés, immobilisations incorporelles, corporelles, financières. e- Chiffre d'affaires global f- Élément de la valeur ajoutée : frais de personnel, impôts et taxes, frais financiers, dotations aux amortissement, excédent brut d'exploitation g- Consommation intermédiaires h- Emploi : effectif total, par axe, par catégorie i- Coûts d'achat des matières premières j- Principales productions effectuées en volume et en valeur k- Productions vendues l- Difficultés déclarées par l'entreprise m- Adhésion à la démarche qualité	2 - Sur les projets industriels agréés a- Désignation du projet b- Référence de l'arrêté d'agrément c- Capacité théorique de production d- Montant total de financement dont fonds propres et emprunts e- Effectif total à employer f- Branche d'activité g- Origine du financement : national ou étranger h- Lieu d'implantation du projet i- Observations sur la situation de réalisation du projet	- MMEE = Ministère des Mines de l'Énergie et de l'Eau - MIC = Ministère des Industries et du Commerce - MA = Ministère de l'Agriculture - MEP = Ministère de l'Élevage et de la Pêche - DNH = Direction Nationale de l'Hydraulique - DNM = Direction Nationale de la Météorologie+ - DNACPN = Direction Nationale de l'Assainissement, du Contrôle des pollutions et des Nuisances - DNCN = Direction Nationale de la Conservation de la Nature - DNAMR = Direction Nationale d'Appui au Monde Rural - DNAER = Direction Nationale d'Aménagement et de l'Équipement Rural - CMDT = Compagnie Malienne du Développement des Textiles - OIE = Organisation Internationale des Épizooties - LQE = Laboratoire de la Qualité des Eaux. - GTPA = Groupe de Travail Pluridisciplinaire d'Assistance à l'Agro-météo

 © IRD éditions 2007

Annexe 2 - Liste des paramètres chimiques analysés au Laboratoire de Qualité des Eaux (DNH, Bamako) et matériel correspondant

Paramètre	Unité	Matériel disponible		Indicateur potentiel de pollution		
		Terrain	Laboratoire	domestique	Industrielle	agricole
Paramètres physico-chimiques						
Conductivité électrique	$\mu S.cm^{-1}$	X	X	X	X	X
PH	Sorensen	X	X		X	
Turbidité	UNT	X		X	X	X
Matières en suspension	$mg.l^{-1}$		X	X	X	X
Température	℃	X	X		X	
Couleur	UCV		X		X	
Oxygène dissous	$mg.l^{-1}$	X		X	X	
Éléments majeurs	$mg.l^{-1}$					
Calcium (Ca)	$mg.l^{-1}$		X			
Magnésium (Mg)	$mg.l^{-1}$		X			
Sodium (Na)	$mg.l^{-1}$		Photomètre à flamme		X	
Potassium (K)	$mg.l^{-1}$				X	X
Sulfate (SO_4)	$mg.l^{-1}$		X		X	
Carbonate (CO_3)	$mg.l^{-1}$		Titrimétrie burette digitale			
Bicarbonates (HCO_3)	$mg.l^{-1}$					
Chlorures	$mg.l^{-1}$		Spectromètre		X	
Composés azotés						
Nitrates	$mg.l^{-1}$			X		X
Nitrites	$mg.l^{-1}$		Spectromètre	X		X
Ammonium	$mg.l^{-1}$			X	X	X
Azote Kejdahl	$mg.l^{-1}$			X		
Paramètres organiques						
DBO	mg $O_2.l^{-1}$l					
DCO	mg $O_2.l^{-1}$		X			
COT	$mg.l^{-1}$					
Pesticides	$\mu g.l^{-1}$		Chromatographe en phase gazeuse et liquide en panne			
Hydrocarbures totaux	$\mu g.l^{-1}$					
Phénols	$\mu g.l^{-1}$					
Paramètres microbiologiques						
Coliformes totaux		X	X			
Coliformes fécaux		X	X			
Métaux						
Manganèse (Mn), Fer (Fe), Aluminium (Al), Cuivre (Cu), Plomb (Pb), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Cadmium (Cd), Zinc (Zn), Chrome (Cr), Argent (Ag)	$\mu g.l^{-1}$		Spectromètre à absorption atomique non fonctionnel			
Métalloïdes et divers						
Fluorures (F) ,Iodures (I), Cyanures (CN), Arsenic (As),	$\mu g.l^{-1}$					
Orthophosphates (PO_4)	$Mg.l^{-1}$		Spectromètre			