

## UN MODELE D'ECOLOGIE DES PECHEES POUR LE DELTA CENTRAL DU NIGER

Etude par simulation de la dynamique d'une ressource ichthyologique et de son exploitation dans un espace fluvial tropical

Pierre Morand<sup>(1)</sup>, Francois Bousquet<sup>(2)</sup> et Christophe Cambier<sup>(3)</sup>

(1) ORSTOM BP 2528 Bamako, Mali

(2) LIA, ORSTOM Bondy

(3) LAFORIA, Paris 6

---

### RESUME

Nous avons développé un modèle de simulation pour représenter et étudier les dynamiques d'interaction entre, d'une part, un assemblage de populations de poissons vivant au sein d'un environnement fluvial hétérogène et changeant et, d'autre part, une exploitation halieutique plus ou moins intense et plus ou moins complexe. Les résultats des simulations tendent en premier lieu à confirmer la thèse de la grande résistance de ce type de ressource vis-à-vis de l'intensification de la pêche. En second lieu, nous montrons l'importance de la structure physique de l'espace-support, et singulièrement de son degré de fragmentation, dans la genèse des dynamiques de réponses de la ressource à l'exploitation. Finalement, la prise en compte d'éléments d'intelligence et d'adaptativité dans la représentation de l'activité de pêche nous a permis de simuler des phénomènes de régulation dans les rapports pêcheurs-ressource.

### ABSTRACT

We have developed a model with the view to simulate the interactions between fish assemblages dynamic and fishing activity in a tropical floodplain. The model takes spatial heterogeneity and environmental fluctuations into account. At first, results of simulation experiments agree with the thesis that such continental aquatic resources exhibit a strong ecological adaptive response to exploitation stress. Moreover, the results suggest that physical structures of the patchy environment, namely the connectivity pattern, play a major role in determining the shape of this resource response towards the fishing mortality. Eventually, we have introduced understanding and dynamic features in the simulation of fishing activity in order to study an example of regulation dynamic of the whole fishery.

## I - INTRODUCTION, JUSTIFICATION ET PRESENTATION DU MODELE.

Les modèles de dynamique des populations exploitées (notamment ceux de Schaefer, de Beverton & Holt et de Ricker, voir Laurec et Le Guen - 1981) sont utilisés depuis plus de trente ans par l'halieutique pour calculer, sur la base de connaissances biologiques, des régimes d'exploitation "optimaux" définis en fonction de critères ou d'objectifs - par exemple : maximiser de façon durable les captures ou la rentabilité économique. Lorsque, vers la fin des années 70, un accroissement de l'intérêt de la recherche pour les pêches artisanales s'est fait jour, c'est d'abord à ces mêmes outils que les halieutes ont cru bon de faire appel. Mais, après quelques tentatives, il s'est avéré que certains des caractères majeurs de ces pêcheries, en particulier leur grande richesse-diversité et leur remarquable dynamique adaptative, conduisaient à des difficultés et parfois à des aberrations lorsqu'on souhaitait les décrire et les étudier au travers des modèles précités. La situation était virtuellement plus inconfortable encore du côté des pêches continentales fluviales, du fait des traits d'hétérogénéité, de fragmentation et même d'instabilité (Amoros et Petts, 1993) qui caractérisent dans leur cas la structure de l'espace physique de support. Mais, au-delà de la prise de conscience des rigidités des modèles halieutiques "classiques" et de leur difficulté d'adaptation à des contextes variés, c'est davantage encore sur le plan du propos et des objectifs que s'est fait sentir, au cours des dernières années, le besoin d'un renouvellement (Chaboud et Charles-Dominique, 1991). En particulier, une tendance forte s'oriente vers la recherche d'une meilleure prise en compte du caractère dynamique de l'exploitation, et notamment de ses capacités de (re)déploiement incessant dans l'espace. Cet élargissement des ambitions de la modélisation est déjà en cours de concrétisation du côté de l'halieutique maritime et ne se limite pas aux pêches artisanales et côtières; on peut citer notamment les travaux de Charreau et coll. (1986), Allen & Mac Glade (1986), Laloë & Samba (1990) et ceux du CSTP (voir Souplet, ce volume). En écho à cette mouvance, nous avons développé un modèle adapté à la représentation des ressources halieutiques et de leur exploitation dans les hydrosystèmes fluviaux. La vocation de ce modèle est bien d'autoriser le traitement de nouvelles questions : en effet, il s'agit de pouvoir discuter non seulement "du niveau et de la structure d'effort qui permettent d'obtenir durablement un maximum de prises" mais aussi et surtout "de la façon dont tel ou tel système de règles d'accès à un espace-ressource hétérogène et fragmenté peut contribuer à préserver la diversité de la ressource, ou bien à stabiliser les captures globales dans un environnement fluctuant, ou bien encore à sécuriser un minimum de revenu pour chacun des pêcheurs..." Et pour aborder ce genre de questions dans le contexte des pêches artisanales continentales, il fallait bien-sûr concevoir un modèle qui ne fasse pas l'impasse sur les caractères structurels majeurs de ces pêcheries : variabilité temporelle de l'environnement, hétérogénéité et fragmentation de l'espace, diversité et souplesse adaptative de la ressource et des pêcheurs.

### 1.1 - Un modèle "d'espace-ressource" exploité et en perpétuel changement.

Le développement du modèle a commencé en 1990. Nous nous sommes appuyés sur les connaissances et les questions engrangées par les chercheurs du programme Delta Central du Niger, qui avait débuté en 1986 (voir Quensière, 1993), et nous avons utilisé des méthodes informatiques assez récentes, développées au LIA de l'ORSTOM-Bondy et au laboratoire LAFORIA de l'Université Paris 6. Ces méthodes s'appuient sur la représentation en systèmes multi-agents (voir par exemple Le Fur, ce volume) : on observe à l'échelle de l'écosystème artificiel le résultat des interactions entre les différents agents qui le composent - des groupes de poissons et des pêcheurs "contenus" dans des portions d'espace. Le simulateur est écrit dans un langage orienté objet : Smalltalk-80. C'est en fait un véritable outil de synthèse puisqu'il permet de générer des expériences de mise en interaction de différentes sortes de connaissances (Bousquet et al., 1993).

Cette orientation méthodologique a été accompagnée de deux choix conceptuels fondamentaux :

- Tout d'abord, loin de rechercher des solutions par intégration analytique, nous nous sommes résolument engagés dans la voie des simulations dynamiques. Ainsi, on n'aura jamais de difficulté à prendre en compte explicitement les variations de l'environnement. De plus, le système pourra évoluer de façon largement autonome. En contrepartie, il faut accepter de ne plus pouvoir aboutir à des solutions ou à des prévisions mathématiquement consistantes et démontrables; c'est plutôt l'accumulation raisonnée des expériences simulatoires et leur analyse comparée qui constitueront la matière des résultats, à l'instar de ce qui se pratique en biologie d'observation. Mais le critère de la scientificité reste : les hypothèses (ou lois de comportement) proposées après analyse des résultats seront bien-sûr réfutables ! Car on pourra effectuer des contre-expériences simulatoires pour tester leur degré de validité.

- En second lieu, nous avons introduit l'espace au centre du modèle : on sait en effet que l'action des pêcheurs sur la ressource passera forcément, à un moment ou à un autre, par une portion de cet espace; d'ailleurs, n'est-il pas juste de dire que la pêche se pratique avec un engin, sur un milieu et en un site plutôt que sur une cohorte ! C'est pourquoi nous préférons définir notre modèle comme un modèle d'écologie des pêches plutôt que de biologie des pêches. A la limite, on peut dire que les caractéristiques de l'espace, véritable "espace-ressource", deviennent aussi (ou même plus) importantes que les paramètres vitaux des poissons - en effet, ces paramètres n'interviennent qu'au second plan, comme une information qui contrôle les mécanismes (ré)générateurs de la richesse de l'espace-ressource.

## 1.2 - La richesse de l'espace-ressource (ré)générée par des mécanismes biologiques.

Les mécanismes (ré)générateurs de l'abondance des poissons dans les différentes portions de l'espace-ressource ont été décrits selon le point de vue classique de l'écologie dynamique des populations. Croissance, reproduction, migration et mort en constituent les fondements au niveau de l'individu, et c'est à partir des connaissances relevant de ce niveau que l'on va engendrer des dynamiques.

Tout d'abord, la croissance (ou l'amaigrissement) réalisée par chaque poisson durant un intervalle de temps résulte de la différence entre la consommation réalisée (affectée d'un coefficient d'assimilation) et les dépenses de maintenance, d'activité et, le cas échéant, de reproduction :

$$\Delta W/\Delta T = (\text{coeff. d'assimil.} \times \text{CONSOM}) - (\text{Dépenses maintenance} + \text{Dépenses de reproduction})$$

La consommation réalisée (CONSOM) dépend du poids du poisson, affecté d'un exposant allométrique, mais aussi de la disponibilité de nourriture dans le milieu, selon une réponse fonctionnelle de type "saturante". La disponibilité de nourriture se décrit comme un ratio entre la quantité de nourriture "offerte" par le milieu (ou portion d'espace) et la demande de consommation exercée par les autres poissons présents dans ce même milieu.

Ainsi, la croissance individuelle n'est pas fixée au départ; elle dépend des fluctuations trophiques mais aussi de l'abondance des poissons, avec, comme conséquence, des effets de freinage densité-dépendants.

Parvenu à un certain âge et ayant atteint une certaine taille, l'individu-poisson peut se reproduire. Chez certaines espèces, cette reproduction se limite toutefois à des moments particuliers de l'année (crue par exemple). La masse de la ponte est proportionnelle au poids de l'individu, et elle correspond à un nombre d'oeufs d'autant plus grand que le poids unitaire des oeufs est faible. A l'issue de la ponte commence la vie embryonnaire et larvaire, représentée dans le modèle par six semaines de processus intangible. Au terme de cette phase, la probabilité d'être encore en vie est plus forte chez les individus issus de gros oeufs que chez ceux issus de petits oeufs. Les individus "entrent" alors dans le modèle général de croissance évoqué *supra*.

Les poissons peuvent se déplacer dans les différentes portions de l'espace, soit de façon pré-déterminée (par exemple : montée dans les plaines inondables à la crue), soit de façon opportuniste (par exemple : fuite vers une autre portion de l'espace si la disponibilité locale de nourriture est trop faible). Ces déplacements sont bien-sûr assujettis à une condition de connection hydraulique entre les portions d'espace impliqués.

Au cours du temps, les poissons subissent différentes sources de mortalité, parmi lesquelles la prédation-consommation par d'autres poissons et le prélèvement halieutique. Dans ces deux cas, la mortalité est calculée explicitement, en cohérence avec les autres processus du modèle (principe de conservation de la matière). Pour les autres causes, nous avons supposé que l'impact de la mortalité était inversement proportionnel à la taille du poisson.

Le simulateur peut gérer, en les traitant par groupes, d'énormes quantités de poissons appartenant à différentes espèces. Dans les simulations effectuées jusqu'à présent, nous nous sommes contentés de représenter trois espèces de poisson : deux au niveau trophique inférieur, qui puisent dans la seule nourriture "offerte" par les milieux et une troisième, qui est prédatrice des deux autres. Les paramètres vitaux de ces trois espèces ont été choisis pour évoquer quelques grands archétypes (sortes de "groupes fonctionnels" - Barbault, 1993) parmi les stratégies adaptatives connues de l'ichtyofaune soudano-sahélienne (Benech et Quensièrre, 1987).

### **1.3 - L'espace-ressource comme lieu d'exercice de l'action d'un grand nombre de pêcheurs.**

Au sein de l'espace-ressource et de ses multiples milieux, les poissons rencontrent parfois l'engin de pêche. Celui-ci peut être de différentes natures, il peut être aussi plus ou moins efficace selon les saisons et les milieux. Du point de vue du poisson, la probabilité de se faire prendre par un engin durant un intervalle de temps et en un milieu donné est une capturabilité; du point de vue du pêcheur, la capacité de l'engin à prendre les poissons présents dans le milieu est un "pouvoir de capture".

L'engin de pêche rencontré par le poisson n'est évidemment pas là par hasard : c'est un pêcheur qui a décidé de l'utiliser à ce moment précis et dans ce milieu particulier. Ce choix a été fait sur la base de connaissances (qui peuvent être, le cas échéant, partagées avec d'autres pêcheurs) et en fonction de possibilités matérielles et sociales, à savoir la possession effective de l'engin en question et la jouissance du droit d'accès à cette portion particulière de l'espace-ressource. Ce pêcheur peut être, tout comme ses collègues, plus ou moins libre et plus ou moins "intelligent". Nous ne développerons pas ici les multiples possibilités qui s'offrent (et se discutent !) quant à la formalisation et à la programmation des règles d'action des pêcheurs. De grands progrès restent à faire sur ce point. Mais nous présentons les deux cas d'école extrêmes : celui où les pêcheurs n'ont aucune liberté, ce qui revient à imposer totalement la structure de l'effort de pêche qui se déploie sur l'espace-ressource, et celui où le pêcheur est libre d'organiser au mieux son activité, en ne subissant que la seule contrainte de viabilité économique : il disparaît s'il n'a plus d'argent pour vivre ni

d'engins pour pêcher. Car il faut rappeler ici que l'on pêche pour gagner de l'argent, que les engins ont un prix (et une longévité) et que la subsistance du pêcheur a un coût. Précisons que tout cela figure explicitement dans le simulateur et peut être modifié à volonté.

#### 1.4 - Réaliser des simulations comparables autour du concept élargi de "fishing up process".

L'ampleur des possibilités d'exploration offertes par le modèle-simulateur exige en contre-partie une réflexion approfondie sur son mode d'utilisation. Il faut éviter en particulier la multiplication désordonnée des expériences simulatoires. C'est pourquoi nous avons décidé de définir toutes ces expériences autour d'une idée commune : simuler un espace-ressource sur lequel l'activité halieutique s'accroît au cours du temps. Selon les cas, il s'agira soit d'un effort global que l'on intensifie d'année en année (sa structure étant alors imposée - cf. § 1.3), soit d'un accroissement de nature démographique : chaque année, quelques pêcheurs supplémentaires sont "injectés" dans la simulation. Dans tous les cas, la durée de l'intensification s'étale sur quelques décennies. Cette échelle de temps a été choisie car elle correspond aux phénomènes qui ont marqué l'évolution récente de la pêche dans le Delta Central du Niger. Nous admettons que l'adoption de cette forme singulière de scénario ne peut pas être présentée comme un choix neutre : faire explicitement ce choix, c'est au contraire assumer clairement la temporalité des choses du vivant, en renonçant à certaines prétentions généralisatrices. Du point de vue de leur signification, les scénarios d'intensification d'exploitation nous ont paru être les plus intéressants pour trois raisons :

- Ils évoquent des cas nombreux d'évolutions de pêcheries, observables un peu partout dans le monde, du fait de l'explosion démographique et du progrès technique. Cela a d'ailleurs entraîné depuis 20 ans le recours fréquent au concept de fishing-up process, notamment du côté des pêches continentales (Regier & Loftus, 1972-Wellcomme *et al.*, 1989).

- L'intensification d'activité halieutique sur un espace-ressource présente une signification véritablement ambivalente: soit l'activité de pêche se développe sur un espace-ressource de taille constante, soit l'activité cherche simplement à se maintenir alors que l'espace-ressource rétrécit. Si l'on raisonne en termes de structures et de dynamiques (sans référence aux niveaux), les deux phénomènes sont similaires du point de vue de l'accroissement des interactions homme-poisson. Or, l'évolution récente de la pêche dans le Delta Central du Niger semble justement être marquée par une combinaison des deux phénomènes.

- Enfin, si l'effort augmente régulièrement au cours du temps, on n'aura aucune difficulté à proposer des graphiques de simulation où figureront en abcisses à la fois le

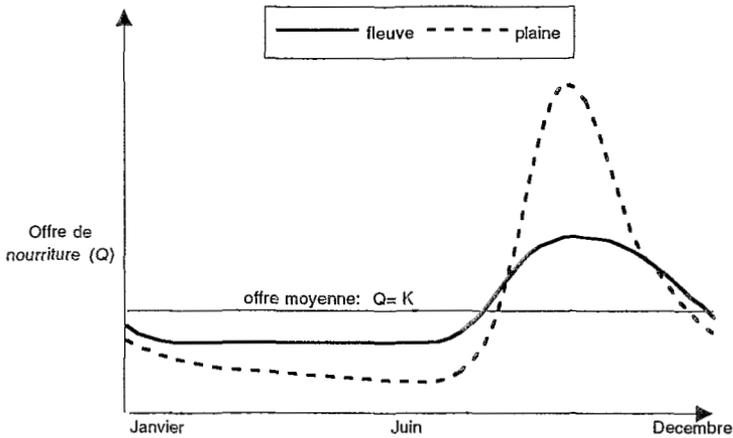
temps et l'effort. Si l'on porte en ordonnée des valeurs comme les captures, les captures par effort ou la biomasse, on obtiendra des figures ressemblant beaucoup à celles produites par un modèle global. Les comparaisons ainsi rendues possibles sont évidemment du plus grand intérêt -toutefois, il ne faut pas oublier qu'elles ne sont qu'à demi légitimes, puisque la dimension temps n'est pas réellement présente dans un modèle de type "Schaefer", alors qu'elle est au coeur de nos simulations dynamiques.

## 2 - LES SIMULATIONS: RESULTATS, DISCUSSION.

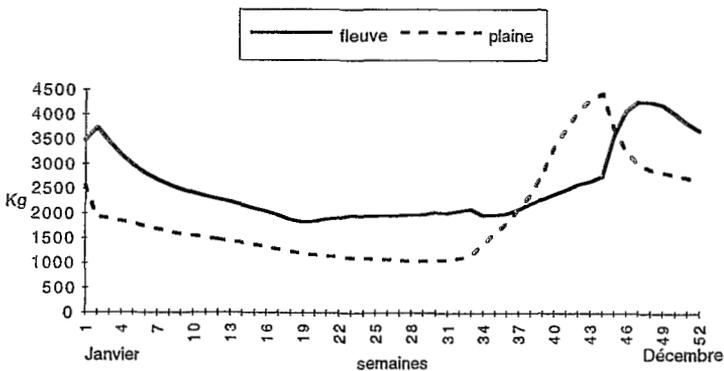
### 2.1 - L'espace-ressource et ses cycles naturels.

Nous commencerons par simuler ce qui se passe dans l'espace-ressource lorsque l'activité halieutique est nulle. Au départ, on peuple au hasard l'espace-ressource de quelques effectifs de toutes tailles et de tous ages des trois espèces de poisson. On soumet les milieux de cet espace à une fluctuation cyclique de l'offre de nourriture aux poissons, autour d'une valeur moyenne  $K$  (figure 1). Dans la plaine (à laquelle sont associés les marigots et les mares), la nourriture est surabondante en période de hautes-eaux mais l'appauvrissement en fin d'étiage est drastique. Quant au fleuve, il suit un régime d'allure comparable, avec toutefois une amplitude atténuée, ce qui lui permet de jouer un rôle de "refuge" pour les poissons en étiage. Soumises d'années en années à ce même régime hydrobiotique, la dynamique et la répartition des poissons (et donc la richesse de l'espace-ressource) finissent par se stabiliser autour d'un cycle annuel régulier (figure 2), dont on a pu montrer qu'il était indépendant des conditions initiales. La qualité de cette dynamique naturelle doit être discutée du point de vue de son réalisme biologique. Ainsi, on peut faire apparaître la structure en poids des trois populations de poisson à un moment particulier de l'année (par exemple en juin), vérifier l'âge des individus appartenant aux différents modes et constater que la croissance des individus se déroule de façon réaliste (Cf. figure annexe 1).

C'est cette dynamique naturelle de l'espace-ressource que l'on va perturber, d'abord faiblement puis de plus en plus fortement, soit par l'application d'un effort de pêche (cf. § 2.2 et § 2.3), soit par l'injection de pêcheurs (cf. § 2.4).



**Figure 1 :** Cycle annuel forçant de l'offre de nourriture dans les deux milieux de l'espace-ressource (fleuve et plaine). Chacun des deux cycles est modélisé par l'addition d'une forme de déviation saisonnière (à somme nulle) sur un niveau moyen  $K$ . Remarque : l'unité de surface de la modélisation n'est pas précisée explicitement; on pourrait toutefois la définir comme la surface d'espace-ressource nécessaire et suffisante pour fournir aux poissons le niveau annuel moyen  $K+K$  d'offre de nourriture (respectivement dans le fleuve et la plaine).



**Figure 2 :** Simulation du cycle annuel de la biomasse "pêchable" (individus de taille supérieure à 8 cm, chez les trois espèces cumulées) dans les deux portions de l'espace-ressource, après stabilisation de la dynamique et hors exploitation.

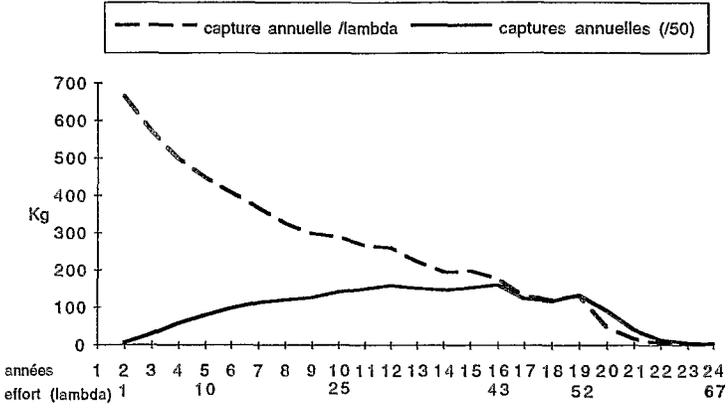
## 2.2. Un effort de plus en plus intensif appliqué sur un espace-ressource simple.

Dans cette série de simulations, l'espace-ressource est défini comme la simple juxtaposition d'un fleuve et d'une plaine inondable. Une première simulation voit l'effort de pêche réparti uniformément sur ces deux milieux et sur toute l'année (figure 3a, avec le paramétrage décrit au tableau 1 en annexe 2). On augmente linéairement l'intensité totale de l'effort au fur-et-à-mesure des années qui passent. Ce processus conduit d'abord à une augmentation des captures puis à un infléchissement progressif à l'approche d'un maximum. Ce maximum se prolonge en fait en un véritable "plateau", avec des prises qui restent constantes malgré la poursuite de l'intensification de l'effort - et ce jusqu'à un facteur x2 ou plus. Enfin, et seulement au-delà de valeurs très élevées de l'effort, un effondrement des captures se produit. Quant à la prise par effort, elle diminue régulièrement tout au long de ce processus. La réalisation d'autres simulations a montré que cette allure de réponse (caractérisée par l'existence d'une phase "plateau") est vraiment robuste, c'est-à-dire qu'on l'observe de façon systématique même si l'on introduit quelques modifications dans la configuration expérimentale (figures 3 b, c, d).

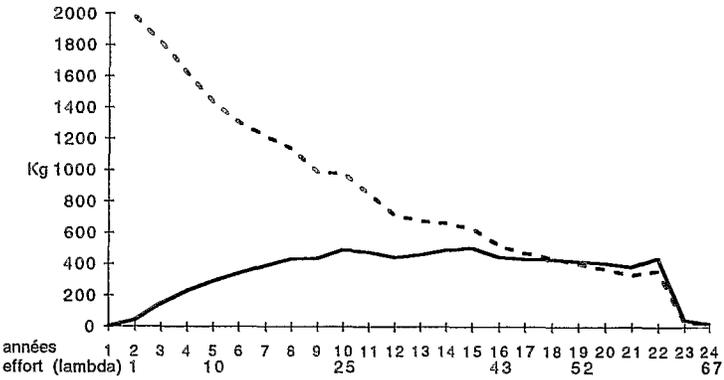
De tels résultats ne sont pas vraiment étonnants; ils correspondent bien à ce que l'on observe dans les pêcheries continentales et ils étaient déjà exprimés de façon littérale dans les travaux de Welcomme *et al.* (1989). Plusieurs interprétations se confortent pour expliquer l'effet "plateau". Ainsi, la théorie classique (et le modèle de Schaefer en particulier) prévoyait déjà que, avec plusieurs espèces dont les niveaux optimaux d'exploitation sont différents, on puisse aboutir par aggrégation à une relation globale effort-capture en forme de parabole très écrasée et étirée selon l'axe des efforts. En termes écologiques, on invoquera plutôt l'accroissement de la productivité naturelle du peuplement de poisson lorsque le prélèvement et la mortalité qu'il subit augmentent (ceci est d'ailleurs très visible dans nos simulations - figure 4), en précisant que ce phénomène est lié au déclenchement de mécanismes compensateurs agissant à différents niveaux : soit démographique (rajeunissement de la structure des populations), soit trophique (raréfaction relative des prédateurs).

Ainsi, cet espace-ressource assez simple (trois espèces dans un fleuve et une plaine) montre une grande résistance dans sa capacité à fournir des poissons en quantité approximativement constante malgré des niveaux d'exploitation très variables. Nous nous sommes demandés si la prise en compte d'autres caractéristiques pouvait remettre en cause ou au contraire accentuer cette conclusion. Dans ce but, nous avons introduit une importante modification : la fragmentation de l'espace-ressource.

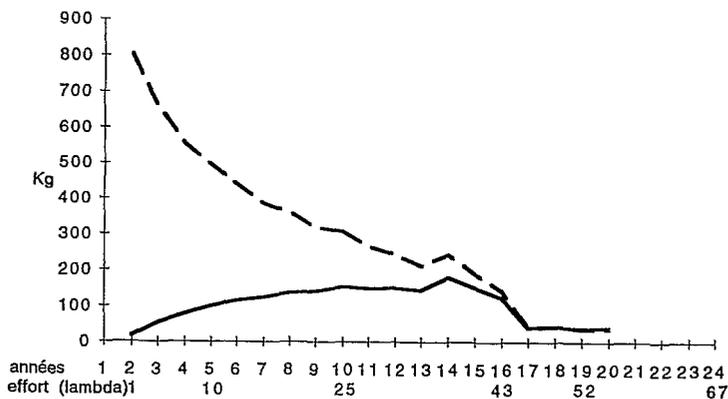
(a)



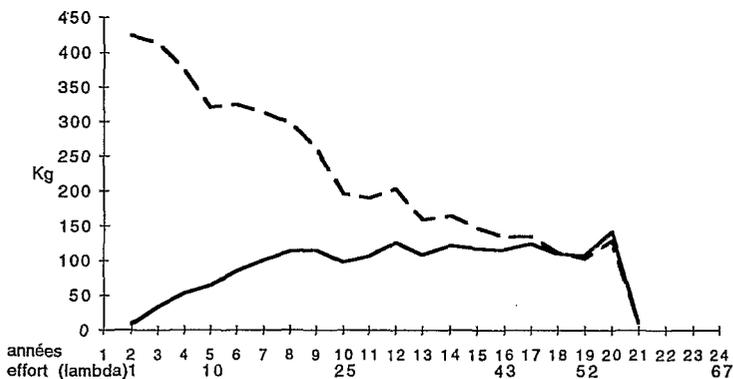
(b)



(c)



(d)



**Figure 3 :** Simulation des réponses de la prise et de la prise par effort à l'intensification d'exploitation. Le paramètre de contrôle de l'effort global ( $\lambda$ ) s'accroît de une unité la première année puis de trois unités les années suivantes; le changement de valeur intervient chaque année au passage de la 29<sup>ème</sup> semaine (mi-juillet). Les quatre simulations (a, b, c et d) correspondent à divers cas de figure paramétriques :

a : configuration "de base" (cf. texte + tableau 1).

b : idem, sauf que le niveau moyen K de l'offre alimentaire est relevé de 50%.

c : idem que (a), sauf que le diagramme d'exploitation est différent, avec un effort concentré en grande partie sur les mois de décrue et d'étiage.

d : idem que (a), mais avec une variabilité interindividuelle de la croissance des poissons.

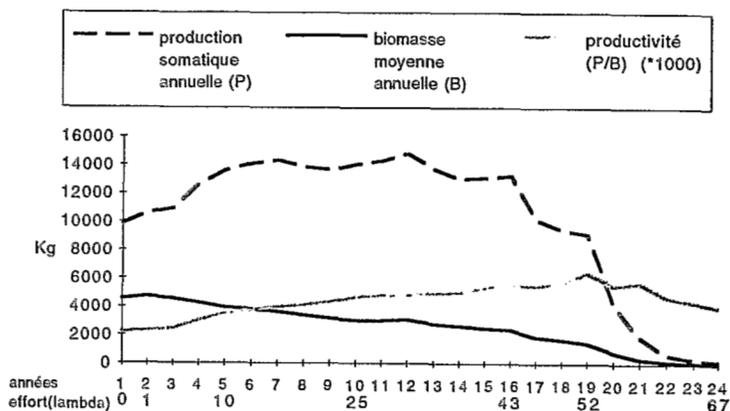
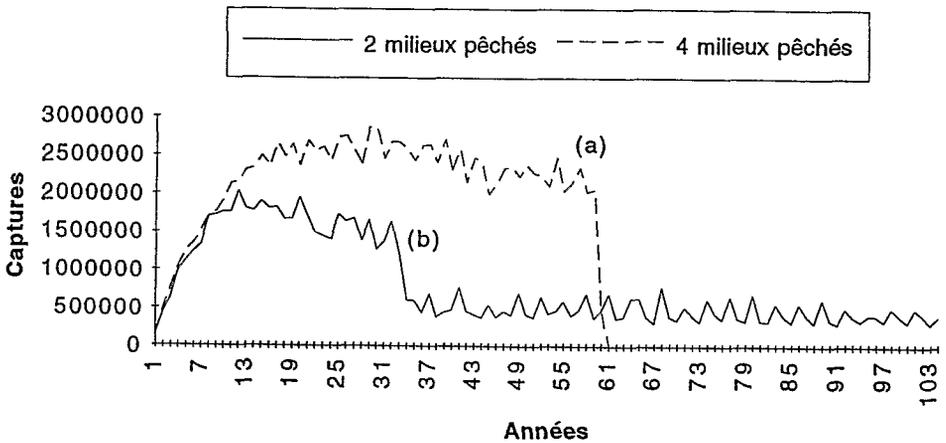


Figure 4 : Simulation de la réponse bio-énergétique de la ressource à l'intensification d'effort. La configuration paramétrique est la même que pour la figure 3a.

### 2.3. Un effort de plus en plus intensif appliqué sur un espace-ressource fragmenté.

Les régions aquatiques continentales apparaissent souvent comme une juxtaposition de milieux aquatiques différents ou similaires, plus ou moins interconnectés. De ce point de vue, la représentation utilisée jusqu'ici (c'est-à-dire une plaine attenante à une portion de fleuve) était simpliste car trop monolithique. Nous allons faire un pas vers davantage de réalisme en fragmentant l'espace-ressource : dorénavant co-existeront deux ensembles fleuve-plaine, de proportions respectives 3/4 et 1/4, connectés l'un à l'autre par leurs portions de fleuve respectives. Sur l'espace-ressource ainsi redéfini, nous allons simuler à nouveau des efforts de pêche croissants. Mais il existe cette fois deux façons de répartir ces efforts : soit sur la totalité de l'espace-ressource, soit sur l'un seulement (par exemple le plus grand) des deux ensembles fleuve-plaine. Les résultats montrent que, dans le premier cas, on retrouve une courbe réponse qualitativement semblable à celles que nous avons observées avec un espace-ressource simple : une montée des captures, puis un plateau (qui s'étend sur un facteur x4 d'accroissement de l'effort) et enfin un effondrement brutal et total (figure 5, courbe a). Par contre, dans le second cas, c'est-à-dire lorsque l'effort est concentré sur un seul des deux ensembles fleuve-plaine, la courbe réponse est très

différente : alors que le plateau est plus bas et plus bref, l'effondrement des captures qui survient ensuite n'est que partiel (figure 5, courbe b). On observe en effet un "palier" ultime non nul qui semble pouvoir se prolonger à l'infini, c'est-à-dire jusqu'à de gigantesques valeurs d'effort. Ces résultats rappellent ceux obtenus par Laloë (1989) avec un modèle global modifié et dans lequel une fraction de la ressource était considérée comme inaccessible. Tout ceci nous semble d'une grande importance pour analyser et gérer les pêcheries continentales. Ainsi, on peut avancer que le risque d'extinction de la ressource est d'autant plus faible que l'espace-ressource est fragmenté et que la pêche ne s'y déploie pas de façon homogène. Plus généralement, ces simulations montrent qu'un changement très simple de la structure physique de l'espace-ressource, associée à une répartition particulière de l'exploitation, peut modifier la dynamique de la réponse écologique de façon majeure - et probablement bien plus que ne le ferait la modification de tel ou tel paramètre biologique de l'une ou l'autre des trois espèces de poisson.



**Figure 5 :** Simulation des réponses de la prise à l'intensification d'effort, lorsque l'espace-ressource est fragmenté. Courbe a : l'effort est réparti sur les quatre portions (deux fleuves et deux plaines) de l'espace-ressource. Courbe b : l'effort est concentré sur deux portions seulement (fleuve et plaine attenante), qui représentent les 3/4 de l'espace-ressource.

## 2.4. De plus en plus de pêcheurs pour se partager la richesse produite par l'espace-ressource

Il fallait bien reconnaître enfin que la notion d'effort imposé (en structure et en niveau) était un pis-aller provisoire pour représenter des pêcheries dont on s'accorde généralement à vanter la grande souplesse adaptative. C'est pourquoi nous avons élaboré une nouvelle simulation dans laquelle l'intensification de l'exploitation n'est plus étroitement contrôlée mais seulement induite, de façon plus ou moins prévisible, par la croissance démographique humaine. [Nous précisons que, par souci de ne pas cumuler les complications, nous reprenons ici un espace-ressource simple, c'est-à-dire non fragmenté, comme au § 2.2.] Les pêcheurs progressivement "injectés" dans la simulation achètent des engins et les emploient de leur mieux, en suivant un système de règles, pour gagner l'argent nécessaire à leur subsistance et au renouvellement de leur panoplie d'engins. Comme le nombre de pêcheurs s'accroît d'année en année, la simulation se concrétise forcément, dans un premier temps, par une augmentation de l'effort total (ici représenté par le nombre de sorties, figure 6). La taille de l'espace-ressource (et donc l'offre de nourriture aux poissons) étant limitée, on aboutit bien vite au "plateau" de captures en même temps qu'à un affaissement des quantités moyennes capturées par sortie. Cette évolution engendre un appauvrissement des pêcheurs, donc des difficultés dans le renouvellement des panoplies d'engins, d'où finalement une quasi-stabilisation du nombre de sorties.

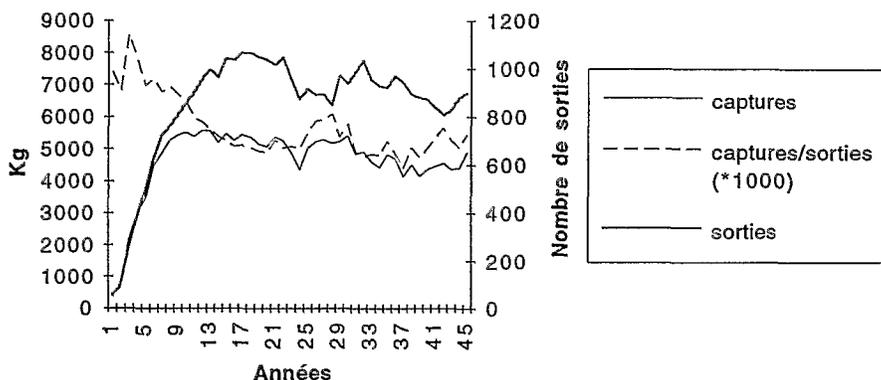


Figure 6 : Evolution simulée de l'effort (nombre de sorties) et des captures au cours du temps, avec un accroissement progressif du nombre de pêcheurs.

Malgré quelques oscillations, il semble que l'on n'atteigne jamais, par la suite, le niveau d'effort nécessaire pour provoquer l'effondrement des captures. Mais les pêcheurs sont évidemment de plus en plus pauvres puisque de plus en plus nombreux à se partager une même quantité globale de captures.

On pourrait, au-delà de ce banal exemple de régulation, et éventuellement en introduisant quelques variantes, étudier des questions de grand intérêt, telles que :

- Comment évolue la hiérarchie financière des pêcheurs au cours de ce processus d'appauvrissement général ? Cette hiérarchie est-elle stable ? Y-a-t-il une différenciation accrue ou un resserrement des niveaux de richesses ou de gains ? Y-a-t-il une diversification ou au contraire une tendance à l'homogénéisation des panoplies d'engins utilisées ?

- Si l'espace-ressource exploité par les pêcheurs est fragmenté (comme dans le § 2.3), et que l'on introduit des inégalités entre les pêcheurs du point de vue des possibilités d'accès aux différentes portions de cet espace, comment est-ce que cela influe sur les réponses aux questions précédentes ?

De plus, observe-t-on alors un plateau de captures plus faible ou plus élevé, davantage oscillant ou plus stable, davantage (ou moins) sensible à des fluctuations du niveau annuel moyen  $K$  (cf. figure 1) de l'offre de nourriture ?

On mesure donc l'étendue des possibilités exploratoires ouvertes par ce genre de modèle. Il faut cependant éviter qu'un tel potentiel n'aboutisse à une explosion de simulations gratuites et vides de sens. C'est pourquoi une réflexion halieutique de plus en plus serrée et de plus en plus "théorisée" doit être développée en parallèle. On retrouve ainsi la finalité du travail du modélisateur, qui est de stimuler et d'accompagner les spécialistes disciplinaires dans leurs efforts de problématisation.

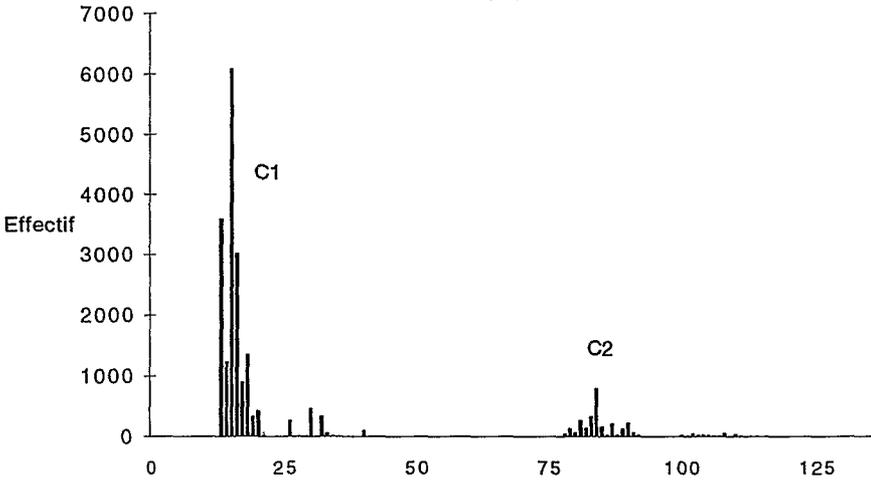
## REFERENCES

- Allen P.M. et J.M. Mac Glade (1986) : Dynamics of discovery and exploitation : the Scotian shelf Fisheries. *Can. J. of Fish. and Aquat. Science*, 43(6).
- Amoros C. et G.E. Petts (1993) : Hydrosystèmes fluviaux. *Masson. coll. d'Ecologie*. 295 pp.
- Barbault A. (1993) : Une approche écologique de la biodiversité. *Natures-Sciences-Sociétés*, 1(4), 322-329.
- Benech V. et J. Quensièrre (1987) : Dynamique des peuplements ichthyologiques de la région du Lac Tchad (1966-1978). Influence de la sécheresse sahélienne. *Thèse Doct. d'Etat de l'Université des Sciences et Techniques de Lille*.
- Bousquet F., C. Cambier, C. Mullon, P. Morand, J. Quensièrre et A. Pavé (1993) : Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *Journal of Biological Systems*, 1 (2), 199-214.

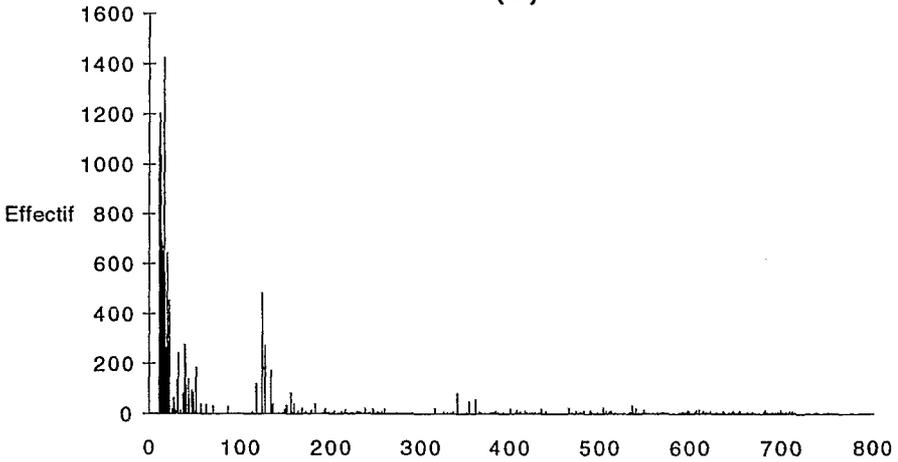
- Chaboud C. et E. Charles-Dominique (1991) : Les pêches artisanales en Afrique de l'Ouest : état des connaissances et évolution de la recherche, in "La recherche face à la pêche Artisanale", *Symp. Int. ORSTOM-IFREMER*, Montpellier France, 3-7 juillet 1989, J.R. Durand, J. Lemoalle et J. Weber (eds.). Paris, ORSTOM, 1991, t. 1 : 99-141.
- Charuau A. et coll. (1986) : Etude d'une gestion optimale des pêcheries de langoustine et de poissons démersaux en Mer Celtique. Rapports CEE/IFREMER. 3eme phase. 109 pp.
- Laloë F. (1989) : Un modèle global avec quantité de biomasse inaccessible dépendant de la surface de pêche. Application aux données de la pêche d'albacores (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique Est. *Aquat. Living Resour.*, 2, 231-239.
- Laloë F. et A. Samba (1990) : La pêche artisanale au Sénégal : ressource et stratégies de pêche. *Editions de l'ORSTOM*. Coll. Etudes et Thèses. 395 pp.
- Laurec A. et J.C. Le Guen (1978) : Dynamique des populations marines exploitées. t. 1 : Concepts et modèles. *Public. du CNEXO*, Rapports Scientifiques et Techniques N° 45, 118 pp.
- Quensière J. (1993) : De la modélisation halieutique à la gestion systémique des pêches. *Natures-Sciences-Sociétés*, 1 (3), 211-220.
- Regier H.A. et Loftus (1972) : Effects of fisheries exploitation on salmonid communities in oligotrophic lakes. *J. Fish. Res. Bd. of Can.*, 29, 959-968.
- Welcomme R.L., R.A. Ryder et J.A. Sedell (1989) : Dynamics of fish assemblages in river systems - a synthesis. pp. 567-577 in D.P. Dodge (ed.) Proceedings of the International Large River Symposium. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 106.

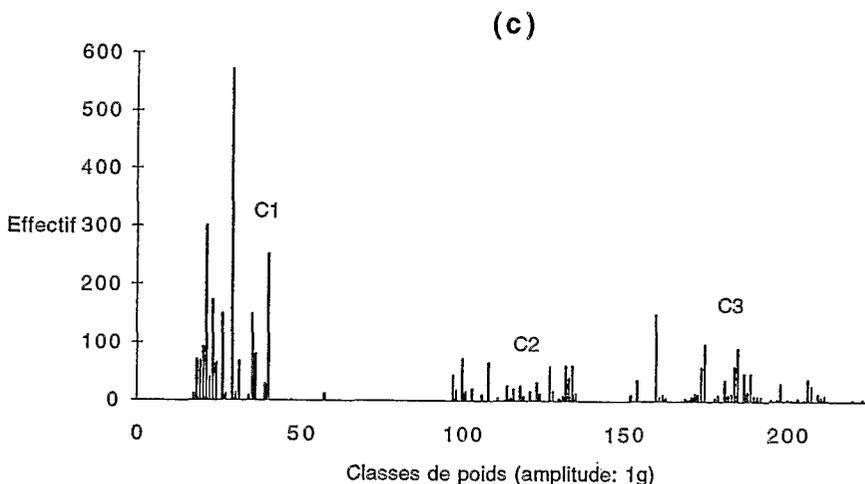
ANNEXE 1

(a)



(b)





*Structures de poids (simulées) en juin pour les individus de plus de dix grammes, chez les trois espèces (spA, spB, spC), en phase de dynamique naturelle stabilisée, avant exploitation.*

*a : on observe nettement deux cohortes chez cette espèce spA qui vit au plus trois ans, et dont la reproduction est réglée sur la crue. Toutefois, un certain étalement des structures apparaît, induit par les migrations étalées dans le temps (entre les deux milieux qui ont généralement des offres de nourriture différentes). La cohorte C1, constituée par les individus de 11 mois environ, a pour poids médian 15,7 grammes, ce qui correspond à une longueur de de 10,5 cm compte-tenu de l'allométrie taille-poids chez cette espèce. La cohorte C2, constituée par les individus de 23 mois, a sa médiane vers 83 grammes (longueur correspondante : 18,2 cm).*

*b : l'espèce spB peut se reproduire toute l'année et est capable d'une mobilité opportuniste. Ceci explique un très grand étalement des structures, prohibant pratiquement la reconnaissance de cohortes au-delà de l'âge d'un an.*

*c : comme l'espèce spA, l'espèce spC se reproduit avec la crue, mais sa longévité est supérieure et, surtout, elle est capable de fuir un milieu saturé. En conséquence, la structure de poids s'étire, même si l'on peut y reconnaître quelques cohortes : les deux premières (C1 et C2), qui sont constituées respectivement des individus de 11 et 23 mois, ont pour poids médians 27 et 120 grammes, ce qui correspond à des longueurs de 11 et 18,2 cm respectivement. La troisième classe apparente (C3) est beaucoup plus étalée car elle est constituée par l'ensemble des individus de 3 ans et plus.*

## ANNEXE 2

Tableau 1 : Paramètres du simulateur utilisés : notations, définitions et modalités

Paramètre/ Procédure	Définition-Contenu	Valeurs/ Modalités
P <sub>z</sub>	Coefficient de préférence pour un type z de nourriture (fraction fine : z=1 ; fraction grossière : z=2 ; poisson : z=3)	spA spB spC P <sub>1</sub> : .75 .25 0 P <sub>2</sub> : .25 .75 .25 P <sub>3</sub> : 0 0 .75
A	Contrôle du niveau de consommation	1.4/semaine
(-k)	Freinage de la consommation lorsque la disponibilité de nourriture diminue	0.175
m	Coefficient d'allométrie de la consommation	0.7
D	Contrôle du niveau des dépenses énergétiques	0.42/semaine
n	Coefficient d'allométrie des dépenses énergétiques	0.8
T <sub>m</sub>	Longueur minimale autorisant la reproduction	spA : 8 cm spB : 12 cm spC : 15 cm
A <sub>m</sub>	Age minimal autorisant la reproduction	spA : 6 mois spB : 6 mois spC : 18 mois
F <sub>sp</sub>	Fécondité spécifique (poids de la ponte, en % du poids de l'individu)	spA : 20 spB : 15 spC : 10
w	Poids unitaire des oeufs	spA : 0.01 gr spB-C : 0.05 gr
d	Délai minimal entre deux pontes	6 mois
M	Facteur de contrôle du niveau de la mortalité "de base" : $Morb = Mx(1/L)$ où L : longueur en cm	0.3
l	Longévité maximale	spA : 36 mois spB : 72 mois spC : 84 mois
a et b	Coefficients d'allométrie reliant le poids W (en gr.) à la longueur L (en cm) : $W = aL^b$	a b spA : .0135 3 spB : .044 3 spC : .020 3
C <sub>ij</sub>	Contrôle du niveau de capturabilité des poissons pour un milieu <sub>i</sub> et une saison <sub>j</sub> (fleure : i=1 ; plaine : i=2 ; crue et hautes-eaux : j=1 ; décrue et étiage : j=2)	j = 1, 2 i=1 1 4 i=2 2 8
cp	Facteur d'atténuation de la capturabilité des petits poissons (8 à 16 cm)	0.5

λ	Multiplicateur d'effort	variable (accroissement en cours de simul.)
REPR	Procédure qui régit la reproduction. Deux modalités : R1 : à dates fixes, un pic annuel sur les 5 premières semaines de crue ; R2 : opportuniste, avec une probabilité d'occurrence constante toute l'année, sous condition d'un bilan énergétique positif depuis 2 semaines au moins.	spA et C : R1 spB : R2
MIGR	Procédure qui régit la mobilité inter-milieux. Deux modalités : M1 : à dates fixes ; M2 : opportuniste	spA : M1 spB-C : M2