

LE GAM, UN OUTIL D'ESTIMATION DES BIOMASSES LOCALES. APPLICATION AU THON ALBACORE (*Thunnus albacares*) DE L'ATLANTIQUE.

Olivier MAURY⁽²⁾, Laurent MILLISCHER⁽¹⁾, Didier GASCUEL⁽¹⁾, Alain FONTENEAU⁽²⁾.

(1) ENSAR halieutique, 65 route de S^t Briec, F35042 Rennes cedex France.

(2) ORSTOM HEA, 911 av. Agropolis B.P. 5045, F34032 Montpellier cedex 1 France

résumé :

L'usage de données de CPUE (captures par unité d'effort de pêche) issues de la pêche commerciale comme indices d'abondance locaux de la ressource demande d'identifier les variations potentielles de la probabilité de capture des poissons par différents engins (capturabilité). Dans cette optique, on cherche à identifier et à caractériser l'influence de différents facteurs sur la capturabilité des thons albacore (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique aux flottilles de senneurs et de palangriers. On utilise des modèles additifs généralisés (GAM) pour étudier les relations non linéaires entre l'efficacité des navires de pêche et différents facteurs liés à la pêche et à l'environnement. On met en évidence des effets de l'effort de pêche et de la profondeur de la thermocline. Les relations obtenues sont discutées et interprétées.

abstract :

The use of commercial fishing CPUE data (catches per unit of effort) as local abundance indices requires the estimation of potential variations of the catchability by gear. In that purpose, we try to identify and to characterize the effects of various factors on atlantic yellowfin tunas (*Thunnus albacares*) catchability by both purse seiners and long liners fleets. We use generalized additive models (GAM) to study non linear relationships between fishing ships efficiency and different factors linked either to fishing activity or to the hydrological environment. We bring to the fore fishing effort and thermocline depth effects. Obtained relationships are discussed and interpreted.

INTRODUCTION

Les thons albacore (*Thunnus albacares*) sont répartis dans l'ensemble de l'Atlantique tropical. L'étude de la distribution spatiale de telles espèces à larges aires de répartition ne peut, aujourd'hui, se faire qu'en utilisant des données de captures commerciales. On utilise alors le rendement des navires (les captures par unité d'effort CPUE) comme une mesure de l'abondance locale des poissons. Le problème est que la capturabilité q (la probabilité pour une unité de biomasse d'être capturée par une unité d'effort de pêche) liant CPUE et biomasses locales ($CPUE=q.B$) est extrêmement variable, en fonction des tactiques utilisées par les pêcheurs pour localiser les poissons, et des conditions hydrologiques locales.

Dans cette étude, on analyse les relations non linéaires liant les CPUE des flottilles de senneurs français et de palangriers japonais aux efforts de pêche et à la profondeur de la thermocline (la thermocline est une zone de variation thermique brutale séparant les eaux de surface chaudes des eaux profondes plus froides). Pour caractériser ces relations sans hypothèse de linéarité, on utilise les techniques de modélisation GAM (Generalized Additive Models) (Hastie et Tibshirani, 1990).

MATERIEL ET METHODES

• Les données environnementales

Météo-France nous a fourni les données hydrologiques. Elles sont issues de simulations du modèle OPA7.1 (Delecluse *et al.*, 1993) développé au LODYC (Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie, Paris VI) dans le cadre du projet OPERA (Morlière, 1989 ; Morlière *et al.*, 1989). Le modèle est forcé par des champs de vents observés et simulés et il assimile des observations ponctuelles de paramètres océanographiques comme des profils thermiques. Dans ces conditions, un tel modèle numérique peut être considéré comme un très puissant interpolateur spatio-temporel d'observations océanographiques. Les données simulées couvrent l'ensemble de l'atlantique tropical de 20° de latitude nord à 20° de latitude sud. Le modèle n'est pas adapté à la circulation des eaux côtières pour lesquelles il ne fournit pas de données. Les frontières côtières du modèle correspondent donc aux frontières du plateau continental. La résolution spatiale est une grille horizontale régulière de 0,5°x 0,5° sur 16 niveaux bathymétriques. La résolution temporelle est de 5 jours de 1980 à 1995.

Les paramètres utilisés dans la présente étude sont la température de l'eau en degrés Celsius (à 5m de profondeur assimilée à la SST) et la profondeur de l'isotherme 20°C en mètres (Z20) qui est généralement utilisée pour approximer la profondeur de la thermocline dans l'océan Atlantique tropical. L'étude d'autres paramètres (Maury, 1998 ; Maury et Gascuel, soumis) n'est pas présentée ici.

• Les données de pêche

La Commission Internationale pour la Conservation des Thons de l'Atlantique (ICCAT) centralise les données statistiques concernant la plupart des pêcheries thonières dans l'ensemble de l'océan Atlantique. Dans cette étude, nous avons utilisé des données de CPUE en provenance de deux flottilles très différentes : la flottille de senneurs FIS (Franco-Ivoiro-Sénégalais) pendant la période 1980-1991 et la flottille palangrière japonaise pendant la période 1980-1993.

Ces deux flottilles ont été choisies pour leurs avantages respectifs :

- Les senneurs FIS visent principalement l'albacore (*Thunnus albacares*), le patudo (*Thunnus obesus*) et le listao (*Katsuwonus pelamis*) sur une grande étendue géographique, mais seulement dans l'Atlantique tropical Est. Pendant la période 1980-1991, cette flottille a gardé un diagramme d'exploitation relativement stable couvrant presque tout le spectre de taille des albacores de 30cm (âge 0) à 180cm (âge 5+) (Anon., 1997). Pour cette flottille, les données de CPUE ont été calculées par âge (0 à 5+) à l'aide de la méthode de décomposition polymodale des « clefs ajustées » (Gascuel, 1994) étalonnée avec la courbe de croissance estimée par Gascuel *et al.* (1992). La conversion des tailles en âges a été réalisée mensuellement. Les CPUE FIS par âge sont exprimées pour les six groupes d'âge en nombre de poissons par heure de recherche ($CPUE_{\text{âge, zone, période}} = \text{captures en nombre}_{\text{âge, zone, période}} / \text{effort}_{\text{zone, période}}$). Leur résolution spatiale est de 1° de latitude x 1° de longitude et leur résolution temporelle est 15 jours pour chacune des 12 années de 1980 à 1991.

- La flottille palangrière japonaise couvre l'ensemble de l'océan Atlantique, recouvrant totalement et excédant probablement l'aire de répartition des albacores. Les palangriers japonais pêchent en eau profonde (de 100 à 150m de profondeur pour les palangres traditionnelles pendant les années 80, à 300m de profondeur pour les palangres profondes des années 90) et visent principalement des patudos adultes et des thons rouges (*Thunnus tynguis*). Les albacores adultes constituent des captures accessoires importantes pour cette flottille pendant la période considérée (Anon., 1997). Leur diagramme d'exploitation est resté stable pendant la période 1980-1993, mais comme ils ne capturent que des albacores âgés dont la taille est comprise entre 110cm and 170cm (âge 4 et 5+), nous n'avons pas cherché à âger les captures. Les CPUE palangrières japonaises sont exprimées en tonnes par millier d'hameçons ($CPUE_{\text{zone, période}} = \text{captures en poids}_{\text{zone, période}} / \text{effort}_{\text{zone, période}}$). Leur résolution spatiale est 5°x5° et leur résolution temporelle est 30 jours.

• Choix des méthodes GAM

Différentes méthodes statistiques permettent la modélisation du lien entre une variable à expliquer et plusieurs variables explicatives. Schématiquement, elles peuvent être classées dans deux grandes catégories fondamentales (Causeur, 1998) (Fig. 1) : les méthodes paramétriques pour lesquelles la

relation recherchée est spécifiée de manière paramétrique *a priori* et les méthodes non paramétriques pour lesquelles elle n'est pas spécifiée *a priori*¹. Les méthodes paramétriques peuvent être soit linéaires comme les méthodes de régression linéaire dans le cadre gaussien ou linéaires généralisées à différentes lois de distributions des erreurs (GLM), soit non linéaires comme les méthodes de régression non linéaire par exemple. Parmi les méthodes non paramétriques, les méthodes additives sont fondées sur une interpolation linéaire des données par lissage non paramétrique avec hypothèse de distribution gaussienne des erreurs, les modèles GAM en sont une généralisation telle que la distribution du terme d'erreur puisse être choisie parmi l'ensemble des lois de distribution de la famille exponentielle (Hastie et Tibshirani, 1990). Les méthodes non paramétriques non additives comprennent, entre autre, les réseaux de neurones.

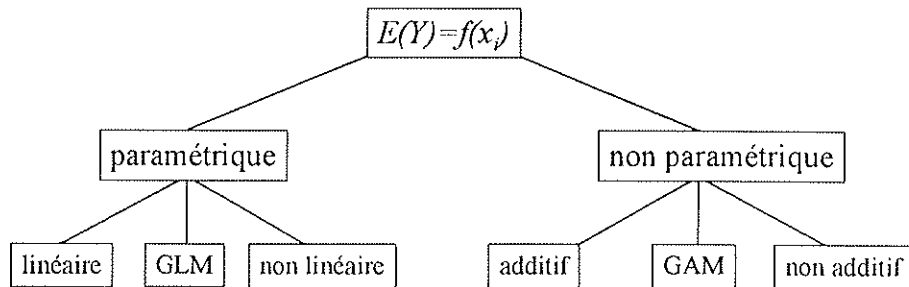


Fig. 1. : Classification schématique des 6 grandes catégories de méthodes de modélisation du lien entre variables explicatives et variable à expliquer (Causeur, 1998).

Nous ne connaissons rien *a priori* de la forme des relations que nous recherchons entre l'abondance des thons et l'environnement. Le cadre non paramétrique est donc adapté. Dans cette catégorie, le caractère paramétrique de l'hypothèse de distribution des erreurs des modèles additifs généralisés (GAM) permet l'usage de tests statistiques classiques. C'est donc les GAM que nous avons choisi d'utiliser pour modéliser les relations albacore-environnement.

Ces méthodes statistiques récentes commencent à être de plus en plus fréquemment utilisées en halieutique (Mendelsohn et Cury, 1987 ; Cury et Roy, 1989 ; Cury *et al.*, 1995 ; Swartzman *et al.*, 1992 ; Swartzman *et al.*, 1994 ; Swartzman *et al.*, 1995 ; Jacobson et MacCall, 1995 ; Welch *et al.*, 1995). Mais, à notre connaissance, elles n'ont jamais été appliquées à l'estimation de l'abondance locale à partir de CPUE commerciales, ni à l'étude des relations thons-environnement.

• Principe des GAM

Les modèles additifs généralisés sont des généralisations non paramétriques des régression linéaires multiples (Hastie et Tibshirani, 1990). Les méthodes GAM s'appuient sur des transformations empiriques des variables explicatives par des techniques de lissage locaux². La formulation générale d'un modèle additif est la suivante :

$$S(Y_j) = \sum_i T_i(X_i(j)) + \varepsilon(j)$$

avec Y_j la variable expliquée pour l'observation j ; X_i les variables explicatives ; S , une fonction paramétrique liée à l'extension du cadre gaussien à la famille exponentielle appelée fonction de lien ; T_i ,

¹ Le terme non paramétrique concerne ici la nature du lien entre variables explicatives et variable expliquée et pas le terme d'erreur (Hastie et Tibshirani, 1990). Comme l'écrit Gauthiez (1997) à propos des méthodes de lissage non paramétriques, « on peut en même temps formuler des hypothèses paramétriques en ce qui concerne la loi des erreurs. Il ne faut pas confondre avec les modèles semi-paramétriques ou non paramétriques au sens habituel de la statistique, où le caractère non paramétrique ou semi-paramétrique porte sur la modélisation des erreurs. »

² Parmi les différentes méthodes de lissage possibles, les méthodes de moyenne mobile dites « à noyau », la méthode des droites mobiles (loess), les approximations polynomiales type spline, sont les plus utilisées.

sont des fonctions non spécifiées estimées de manière non paramétrique par des techniques de lissages locaux et ε est une variable aléatoire dont la loi de distribution doit être choisie dans la famille exponentielle.

Dans les GAM, la loi de distribution de l'erreur peut être choisie dans toutes les lois de la famille exponentielle (qui comprend la loi normale, la loi de Poisson, la loi binomiale, la loi gamma, ...). Dans notre application, après examen des distributions, nous avons fait l'hypothèse d'une distribution normale de l'erreur. Dans ce cas, la fonction de lien S est simplement la fonction identité (Hastie et Tibshirani, 1990 ; Swartzman *et al.*, 1994). L'espérance de la variable Y conditionnellement aux variables X_i peut donc s'exprimer comme une somme de fonctions de lissage des variables explicatives :

$$E(Y / X_i) = \sum_i T_i(X_i)$$

Une transformation logarithmique a été utilisée d'une part pour symétriser la distribution dissymétrique des fréquences de CPUE et, d'autre part, en raison de la nature *a priori* multiplicative des processus considérés. En effet, pour pouvoir interpréter les CPUE comme des indices d'abondance locaux (des densités D), les effets liés à la capturabilité (q) doivent être identifiés et retirés. Ainsi, conformément à la formule générale $CPUE = q \cdot D$, la forme générale des GAM que nous avons ajustés est la suivante :

$$\ln(CPUE + 1) = \sum_i T_i(X_i) + \sum_j T_j(X_j)$$

avec X_i les variables explicatives liées à la capturabilité et X_j les variables liées à l'abondance locale des albacores.

Pour estimer les fonctions T , nous avons utilisé un lisseur spleen cubique implémenté dans le logiciel S-plus (© AT&T Bell Laboratories).

• Mise en oeuvre des GAM

Un grand nombre de modèles a été testé pour mettre en évidence le rôle des variables environnementales sur les densités locales d'albacores. Une approximation du test F permettant de tester la significativité de la contribution de chaque variable (Hastie et Tibshirani, 1990) a été systématiquement calculée. Dans chaque modèle, toutes les variables supposées être liées à la capturabilité ont été systématiquement prises en compte quand elles étaient significatives, associées à la variable environnementale étudiée. Des effets d'interaction avec d'autres variables environnementales ont été également ajoutés quand ils modifiaient la relation considérée. Un pseudo coefficient R^2 , défini comme la fraction de la déviance totale expliquée par le modèle, a été calculé systématiquement pour tous les modèles testés (Swartzman *et al.*, 1992). Bien que n'ayant pas grand sens dans l'absolu, ce coefficient permet de comparer différents modèles ayant la même structure. Une analyse de déviance a, enfin, été systématiquement réalisée pour avoir une idée de la part de l'inertie du modèle expliquée par chaque facteur.

- L'analyse des données de CPUE des senneurs FIS a été menée à la résolution spatio-temporelle de $1^\circ \times 1^\circ \times 15$ jours. Les données environnementales issues du modèle OPA7 ont été agrégées à cette échelle à l'aide d'une moyenne pondérée par la surface ; à l'inverse, les données CZCS ont été désagrégées à cette échelle. Le fichier de données obtenu contient 35725 observations. Le modèle ajusté a la forme générale suivante :

$$\begin{aligned} \ln(CPUE + 1) &= s(\text{année}) + s(\text{quinzaine} * \text{zone ICCAT}) + s(\text{effort}) + s(\text{vent}) + s(CI) + s(Z20) \\ &+ s(gZ20) + s(\text{variable environnementale}) + s(\text{effets d'interaction avec d'autres variables}) \\ &= A + s(\text{variable environnementale}) + s(\text{effets d'interaction avec d'autres variables}) \end{aligned}$$

A est la somme des transformations des variables supposées être liées à la capturabilité des albacores aux senneurs FIS. S est la fonction de lissage spline.

L'effet année est supposé prendre en compte les fluctuations de la biomasse totale et l'évolution tendancielle potentielle de la puissance de pêche qui a déjà été observée pour les pêcheries d'albacores de l'Atlantique (Gascuel *et al.*, 1993). Le terme (quinzaine * zone) mesure un effet spatio-saisonnier moyen sur la période considérée. Il permet de donner un poids égal à chaque zone et période, quelle que soit la répartition de la flottille de pêche.

Pour chaque effet considéré, une analyse générale sur l'ensemble du jeu de données et une analyse par zone ont été réalisées. Une analyse par âge a également été réalisée en considérant les 6 groupes d'âge usuels utilisés habituellement par le comité scientifique de l'ICCAT (âge 0 à 5+).

- L'analyse des CPUE des palangriers japonais a été menée à une résolution spatio-temporelle de 5°x5°x30 jours. Les données environnementales issues du modèle OPA7 ont été agrégées à cette échelle à l'aide d'une moyenne pondérée par la surface et les données CZCS ont été désagrégées à cette échelle. Le fichier de données obtenu contient 5035 observations. Le modèle ajusté a la forme générale suivante :

$$\begin{aligned} \ln(CPUE + 1) &= s(\text{année}) + s(\text{latit.} * \text{longit.} * \text{mois}) + s(\text{effort}) + s(Z20) \\ &\quad + s(\text{variable environnementale}) + s(\text{effets d'interaction avec d'autres variables}) \\ &= B + s(\text{variable environnementale}) + s(\text{effets d'interaction avec d'autres variables}) \end{aligned}$$

avec B , la somme des transformations des variables supposées être liées à la capturabilité des albacores aux palangriers japonais et s les fonctions de lissage spline.

Seules les relations concernant l'effort de pêche et la profondeur de la thermocline sont analysées ici. Les relations concernant d'autres variables, bien qu'incorporées aux modèles étudiés, ne sont pas détaillées ici.

RESULTATS

• Relation CPUE-effort

Pour les senneurs FIS comme pour les palangriers japonais, l'effort de pêche est systématiquement hautement significatif et explique la plus importante partie de la variabilité des CPUE pour tous les modèles considérés (93% pour les senneurs). La relation générale entre $\ln(CPUE+1)$ et l'effort de pêche est non linéaire pour les deux flottilles. Pour les senneurs, la courbe croît rapidement pour les valeurs d'effort inférieures à un seuil de l'ordre de 500 heures de pêche. Au delà, soit la courbe continue à croître plus lentement pour les poissons d'âge 0, 1, 2 et 3, soit elle décroît pour les poissons d'âges 4 et 5+ (Fig. 2).

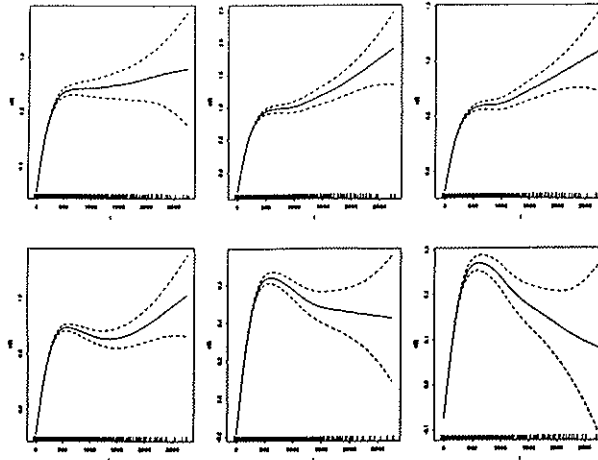


Fig. 2. : Résultats de la régression GAM (trait continu) de $\ln(\text{CPUE}+1)$ des senneurs FIS en fonction de l'effort de pêche (en heures de pêche) pour les 6 groupes d'âge (0 à 5+ de gauche à droite et de haut en bas) avec l'intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) en pointillé. Les tirets sur l'axe des x localisent les données.

Pour les palangriers, la courbe est continûment décroissante avec une forme exponentielle négative (Fig. 3).

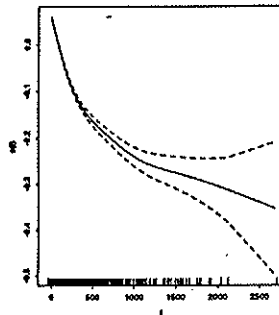


Fig. 3. : Résultats de la régression GAM (trait continu) de $\ln(\text{CPUE}+1)$ des palangriers japonais en fonction de l'effort de pêche (en milliers d'hameçons) avec l'intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) en pointillé. Les tirets sur l'axe des x localisent les données.

• **Relation CPUE/thermocline :**

Pour les senneurs FIS, la profondeur de la thermocline a un effet clairement négatif sur les CPUE pendant la période considérée (Fig. 4). Plus la thermocline est profonde, plus faibles sont les rendements. Les CPUE sont supérieures à la moyenne quand la profondeur de la thermocline est inférieure à 50m et elles sont plus faibles au-delà. Un tel effet est constant avec l'âge mais il explique une part plus importante de la variance chez les vieux poissons (âges 3, 4 and 5+) que chez les jeunes (âges 1 and 2).

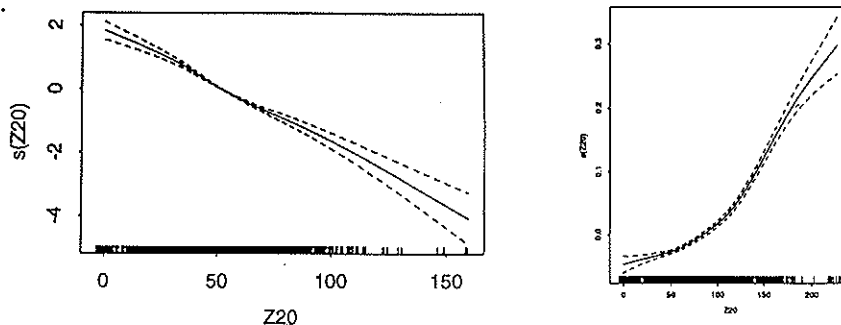


Fig. 4. : Résultats de la régression GAM (trait continu) de $\ln(\text{CPUE}+1)$ des senneurs FIS en fonction de la profondeur de la thermocline (en m) avec l'intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) en pointillé. A gauche, les senneurs FIS et à droite, les palangriers japonais. Les tirets sur l'axe des x localisent les données.

Il est important de prendre en compte les effets d'interaction entre la profondeur de la thermocline et la température de surface car ces deux facteurs ne sont pas indépendants : plus la thermocline est proche de la surface, plus la SST est basse et réciproquement. Sans l'effet d'interaction avec la température, la relation entre les CPUE et la profondeur de la thermocline n'est pas clairement discernable. Pour les palangriers japonais qui pêchent plus profondément que les senneurs, la profondeur de la thermocline a un effet monotone positif (Fig. 4) et explique une part importante de la variance du modèle (17,4%).

DISCUSSION : l'utilisation des CPUE comme un indice d'abondance local

La CPUE est l'indice d'abondance le plus fréquemment utilisé en halieutique. Pourtant, son emploi est délicat et pose des problèmes dus à la non linéarité de la relation CPUE/abondance. Un certain nombre de phénomènes bien connus sont à l'origine de cette non linéarité. Ils sont en général liés à l'hétérogénéité spatiale de la ressource et au comportement de recherche des navires (Hilborn et Walters, 1992 ; Gauthiez, 1997). Dans le cas des pêcheries thonières, l'utilisation des CPUE comme indices d'abondance locaux est encore compliquée par des phénomènes spécifiques responsables d'une non linéarité et d'une forte variabilité de la relation CPUE/effort locale :

- l'accroissement d'efficacité des flottilles de senneurs quand leur effort de pêche augmente ;
- les très forts taux d'exploitation locaux qui entraînent des phénomènes de surexploitation locale (Fonteneau *et al.*, 1997).
- les importantes variations spatio-temporelles de capturabilité dues à l'environnement et aux comportements migratoires et agrégatifs saisonniers.

Nos résultats aident à préciser ces différentes sources de biais des CPUE thonières.

• Interprétation des relations CPUE/effort

Il est vraisemblable que quand l'effort des senneurs augmente (*i.e.* le nombre d'heures de recherche), la puissance locale des navires s'accroît car les bateaux coopèrent (ou s'espionnent) pour repérer les mattes de thon. Elle atteindrait ensuite un palier quand le nombre total d'heures de recherche de l'ensemble des bateaux est suffisant pour repérer presque à tous les coups les plus fortes concentrations de thons de la zone considérée. Ce seuil serait d'environ 500 heures de recherche par carré de 1 degré pendant 15 jours (Fig. 2). Pour les jeunes poissons, très nombreux dans le milieu, les taux d'exploitation locaux demeurent faibles malgré l'augmentation de l'effort et les CPUE continuent à augmenter quand l'effort augmente. Pour les poissons âgés moins nombreux dans le milieu, l'augmentation de puissance locale entraîne un phénomène de surexploitation locale (Fig. 5) et les CPUE des navires tendent alors à décroître.

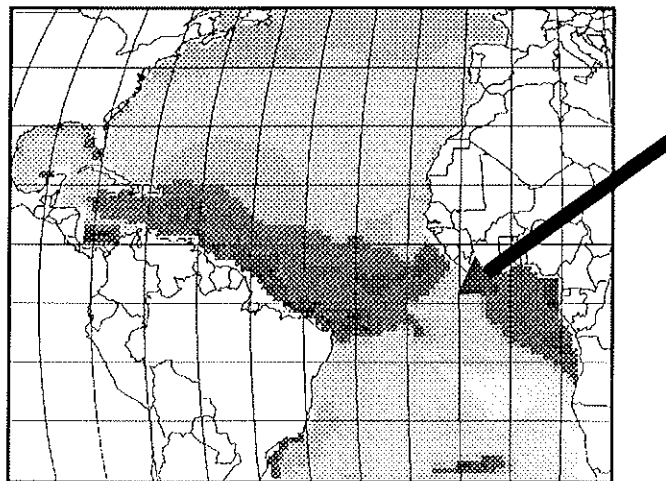


Fig .5. : Simulation par un modèle d'advection-diffusion forcé par l'environnement (Maury, 1998) de la répartition des albacores adultes (âge 5+ en février 1991) prenant en compte les captures réalisées par les senneurs FIS. Les très faibles concentrations observées au large du Golfe de Guinée (où est exercée une forte pression de pêche) sont dues au phénomène de surexploitation locale des albacores âgés.

De la même manière, les palangriers épuisent vraisemblablement localement leur zone de pêche quand ils sont nombreux et leurs rendements chutent quand leur effort local augmente. La diminution locale d'abondance qu'ils provoquent peut être compensée par l'arrivée de poissons par diffusion. Ces poissons proviennent alors d'une fraction « cryptique » de la biomasse (Fonteneau *et al.*, 1997) localisée dans des zones non exploitées (ou non exploitables).

La combinaison des deux facteurs antagonistes, coopération et surexploitation locale, est vraisemblablement responsable des relations non linéaires observées entre les CPUE et l'effort de pêche.

Dans cette optique, Maury (1998) et Maury et Gascuel (soumis) ont étudié à l'aide du simulateur SHADYS³ la non linéarité de la relation CPUE/effort pour des pêcheries thonières (Fig. 6). Ils ont montré qu'une telle relation non linéaire peut être, effectivement, interprétée en terme de stratégie de répartition et de coopération entre navires pour la partie ascendante de la courbe et de surexploitation locale pour la partie décroissante (Fig. 7).

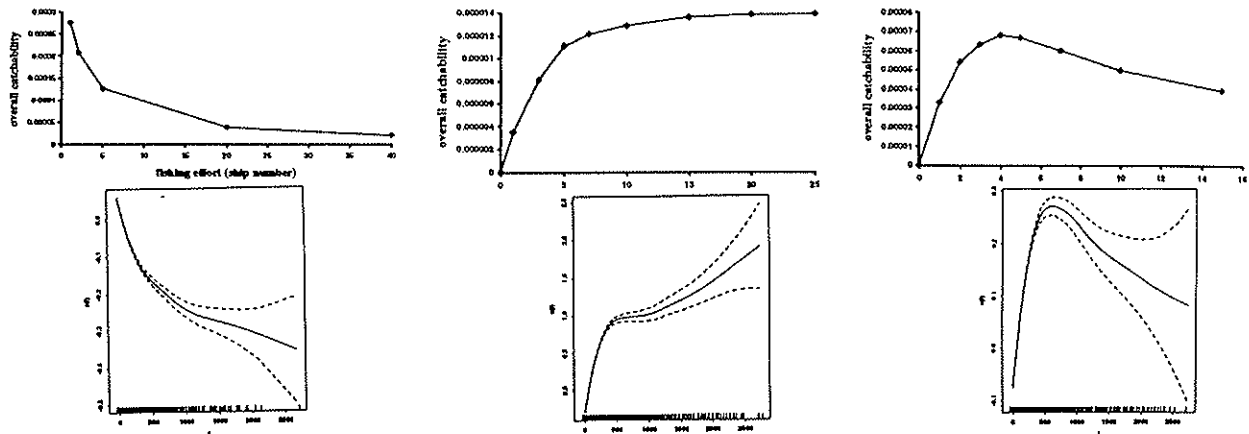


Fig. 6. : Comparaison des relations observées et simulées sous SHADYS (Maury, 1998 ; Maury et Gascuel, soumis). En haut, relations simulées dans SHADYS (voir texte). En bas, relations CPUE/effort obtenues par analyse GAM des CPUE (cf. quatrième partie). A gauche, courbe obtenue pour les palangriers japonais. Au milieu, CPUE des senneurs concernant les jeunes poissons. A droite, CPUE des senneurs concernant les albacores âgés.

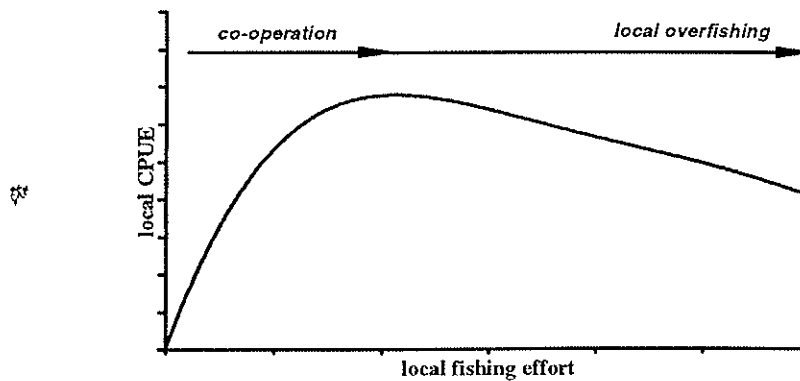


Fig. 7. : Relations théoriques entre CPUE locales et effort de pêche. La non linéarité de la relation est interprétée comme résultant de deux processus antagonistes : d'une part la coopération entre les bateaux (tactique) et la saisonnalité des choix de zones de pêche (stratégie) qui conduisent à une augmentation de l'efficacité de pêche et, d'autre part, la diminution locale de la biomasse qui explique la décroissance des rendements locaux.

³ Simulateur HALieutique de DYnamiques Spatiales fondé sur le couplage d'un modèle de l'environnement, un modèle d'advection-diffusion et un modèle de comportement des pêcheurs.

• Influence de la profondeur de la thermocline sur l'efficacité des flottilles

Pour les senneurs, il est bien établi que les facteurs environnementaux modifient la capturabilité (Fonteneau et Marcille, 1988 ; Marsac, 1992). Les résultats obtenus confirment une telle hypothèse et contribuent à préciser le rôle fonctionnel de la profondeur de la thermocline sur la capturabilité des albacores aux senneurs FIS pendant la période 1980-1991. Plus la thermocline est profonde et son gradient faible, plus les niveaux de capturabilité observés sont faibles. Un tel effet négatif de l'enfoncement de la thermocline sur la capturabilité est observé dans l'océan Pacifique par Inada *et al.* (1997) pour des profondeurs de la thermocline supérieures à 50m. Ce phénomène semble être dû au fait que la thermocline agit comme une barrière pour les albacores, particulièrement pour les jeunes qui ne sont pas encore capables de plonger rapidement dans les eaux froides (Fig. 8). Quand la thermocline est profonde ou faiblement marquée, les thons s'échappent facilement des sennes tournantes alors que quand elle est proche de la surface et très marquée, les thons sont pris au piège et ils ne peuvent s'échapper du filet (Sharp et Dizon, 1978 ; Evans *et al.*, 1981 ; Marsac, 1992 ; Fonteneau, 1996).

Un tel phénomène est probablement responsable, entre autre, des très faibles niveaux de captures réalisés au premier trimestre de 1984. En effet, cette année là, une anomalie environnementale comparable au phénomène *el Niño* a entraîné de faibles rendements des senneurs probablement liés à un enfoncement de la thermocline (Fonteneau, 1991). Le phénomène de baisse de la capturabilité semble être plus marqué quand la profondeur de la thermocline dépasse 60-70m, profondeur qui correspondait à la chute des sennes utilisées par les senneurs FIS pendant la période considérée. Les choses sont probablement différentes aujourd'hui, puisque les senneurs FIS utilisent des sennes beaucoup plus profondes (150 à 200 mètres de chute).

Pour les palangriers, la capturabilité des albacores est, également, manifestement liée à la profondeur de la thermocline, mais l'effet est inverse. En effet, plus la thermocline est profonde, plus les eaux profondes sont chaudes, plus les albacores peuvent descendre en profondeur et être accessibles aux palangres mouillées en profondeur pour capturer des patudos qui chassent en profondeur (Fig. 8).

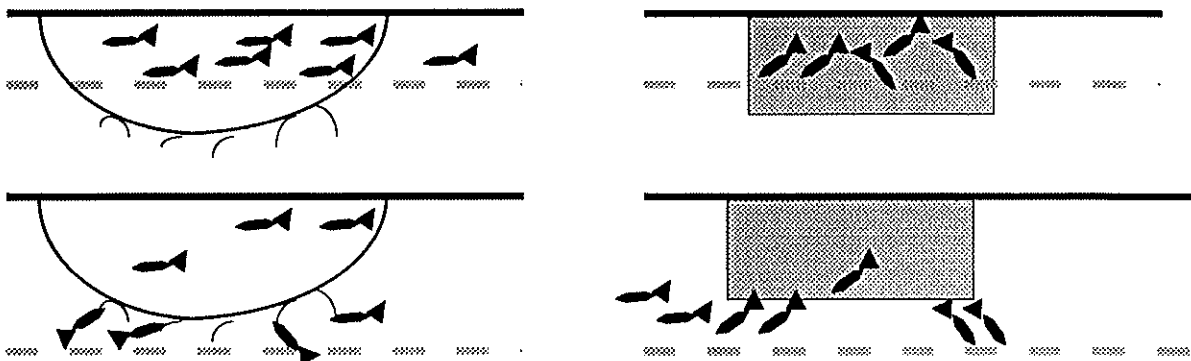


Fig. 8. : Schématisation de l'importance de l'effet « barrière » de la thermocline (en tireté gris) et de ses conséquences sur la capturabilité des albacores selon que la thermocline est proche de la surface (en haut) ou profonde (en bas). A gauche, la pêche à la palangre et à droite, la pêche à la senne tournante.

CONCLUSION

Malgré leurs limitations, les données provenant de pêcheries commerciales sont bien souvent le seul moyen d'estimer la répartition des thons à grande échelle. Pour cela, l'identification des relations entre la capturabilité et les facteurs liés à l'activité de pêche ou liés à l'environnement, est une étape nécessaire à l'utilisation des CPUE comme indices d'abondance locaux. Dans cette optique, les modèles GAM, permettant l'identification de telles relations non linéaires, constituent des outils extrêmement intéressants pour la recherche halieutique.

BIBLIOGRAPHIE

- Anon., 1997. Report of the working group on tropical tunas. *Rec. Doc. Scient. SCRS, ICCAT* Madrid.
- Causeur D., 1998. Modélisation des liens entre variables. Cours de statistique. Spécialisation d'écologie quantitative. ENSAR.
- Cury P. et C. Roy 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **46**, 670-680.
- Cury P., C. Roy, R. Mendelssohn, A. Bakun, D.M. Usby et R.H. Parrish, 1995. Moderate is better : exploring nonlinear climatic effects on the Californian anchovy (*Engraulis mordax*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*
- Delecluse P., M. Imbard, C. Lévy, G. Madec, 1993: OPA Ocean General Circulation Model, reference manual, 93/03.
- Evans R.H., D.R. McLain et R.A. Bauer, 1981. Atlantic Skipjack Tuna : Influences of Mean Environmental Conditions on Their Vulnerability to Surface Fishing Gear. *Marine Fisheries Review* **43**(6), 1-11.
- Fonteneau A., 1991. La surexploitation du stock d'albacore en 1984 : mythe ou réalité ? *Rec. Doc. Scient. ICCAT. Vol. XXXVI*, pp 348-379.
- Fonteneau A., 1996. Introduction aux problèmes des relations thons-environnement dans l'Atlantique. In : proceedings of the ICCAT Symposium, Les Açores, Juin 1996. Sous presse.
- Fonteneau A. et J. Marcille, 1988. *Ressources, pêche et biologie des thonidés tropicaux de l'Atlantique Centre-Est*. FAO document technique sur les pêches. Fonteneau A. Et Marcille J. Eds. 391p.
- Fonteneau A., D. Gascuel, P. Pallares Soubrier 1997. Vingt cinq ans d'évaluation des ressources thonières dans l'Atlantique : quelques réflexions méthodologiques. in : Ouvrage du Symposium ICCAT, Les Açores, Juin 1996. A paraître.
- Gascuel D., 1994. Une méthode simple d'ajustement des clefs taille/âge : application aux captures d'albacores (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique est. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **51**:723-733.
- Gascuel D., A. Fonteneau et C. Capisano, 1992. Modélisation d'une croissance en deux stances chez l'albacore (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique est. *Aquat. Living Resour.*, **5**(3), 155-172.
- Gascuel D., A. Fonteneau et E. Foucher 1993. Analyse de l'évolution des puissances de pêche par l'analyse des cohortes : application aux senneurs exploitant l'albacore (*Thunnus albacares*) dans l'Atlantique est. *Aquat. Living Resour.*, **6**(1), 15-30.
- Gauthiez F. 1997. Structuration spatiale des populations de poissons marins demersaux. Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques. Thèse de doctorat. ENGREF.
- Hastie T. and R. Tibshirani, 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall, London. 335p.
- Hilborn R., C. J. Walters 1992. Quantitative fisheries stock assessment. Choice, dynamics and uncertainty. Chapman and Hall, 570p.
- Jacobson L.D. et A.D. MacCall, 1995. Stock-recruitment models for Pacific sardine (*Sardinops sagax*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **52**, 566-577.
- Inada H., J. Sekine, H. Kim, M. Nemoto, S. Takeuchi, M. Kagoshi, Y. Anzai et K. Yabuki, 1997. The influence of environmental conditions on fish catches during purse seining operations for skipjack *Katsuwonus pelamis* and yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the western tropical Pacific fishing grounds. *Tokyo Suisandai Kempo*, **83**, 129-138.
- Marsac F. 1992. Etude des relations entre l'hydroclimat et la pêche thonière haitiène tropicale dans l'Océan Indien. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale. 353p.
- Maury, 1998. Modélisation spatiale en halieutique. Approche par simulateur sous SIG. Application à la modélisation hiérarchique de la population de thons albacore (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique. Thèse de doctorat de l'ENSAR. 350p.
- Maury and Gascuel (soumis). The local overfishing concept. Simulations in SHADYS. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Soumis.
- Mendelssohn R. et P. Cury 1987. Fluctuations of a fortnightly abundance index of the Ivorian coastal pelagic species and associated environmental conditions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **44**: 408-428.
- Morliere A., 1989: Climatologie mensuelle d'une simulation de l'océan Atlantique tropical, *Rapp Int. LODYC* 89/07, 76p.
- Morliere A., P. Delecluse, P. Andrich et B. Camusat, 1989: Une évaluation des champs thermiques océaniques par un modèle de circulation générale océanique dans l'Atlantique tropical, *Oceanol. Acta.*, **12**(1), 9-22.
- Sharp G.D. et A.E. Dizon 1978. The physiological ecology of tunas. Sharp and Dizon (eds.). Academic Press, New York: 485p.
- Swartzman G., C. Huang and S. Kaluzny, 1992. Spatial Analysis of Bering Sea Groundfish Survey Data Using Generalized Additive Models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**: 1366-1378.
- Swartzman G., W. Stuetzle, K. Kulman et M. Powojowski, 1994. Relating the distribution of pollock schools in the Bering Sea to environmental factors. *ICES J. Mar. Sci.*, **51** : 481-492.
- Swartzman G. E. Silverman, N. Williamson, 1995. Relating trends in walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) abundance in the Bering Sea to environmental factors. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **52** : 369-380.
- Welch D.W., A.I. Chigirinsky et Y. Ishida 1995. Upper thermal limits on the oceanic distribution of Pacific salmon (*Oncorhynchus spp.*) in the spring. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **52**, 489-503.