

**COOPÉRATION DES NAVIRES, SUREXPLOITATION LOCALE ET NON-LINÉARITÉ
DE LA RELATION PUE/EFFORT LOCALE DANS LES PÊCHERIES THONIÈRES À LA SENNE :
Simulations sur SHADYS (Simulateur HALieutique de DYnamiques Spatiales)**

SCRS/1997/083

Maury, O.¹

Col.Vol.Sci.Pap. ICCAT, 48 (2) : 261-264 (1998)

SUMMARY

SHADY's simulator allows to explore fisheries spatial dynamics at very small spatio-temporal scales. After a rapid presentation of SHADY's simulator, different characteristic scenarios of purse seine tuna fisheries are studied. Simulations seem to be coherent with real observations. In their perspective, local CPUE/effort relationships obtained by general additive modeling (GAM) can be interpreted as a consequence of the antagonistic effects of fishing effort distribution strategy and purse seiners' cooperation tactics (positive effects) on the one hand, and local over-fishing phenomena frequent in tuna fisheries where high local exploitation pressure occurs (negative effects) on the other hand. Such non-linear relationships could be systematically considered when local CPUE are used as fish abundance local index.

RÉSUMÉ

Le simulateur SHADYS permet d'explorer des scénarii de dynamique spatiale des pêcheries à très fine résolution spatio-temporelle. Après une rapide présentation du simulateur, différents scénarii caractéristiques des pêcheries thonières à la senne sont étudiés. Les résultats obtenus montrent une grande cohérence avec les observations réelles. Ils permettent d'interpréter les relations CPUE/effort locales obtenues par modélisation additive généralisée (GAM) comme résultant des effets antagonistes d'une part des stratégies de distribution de l'effort dans les zones poissonneuses et des tactiques de coopération des senneurs (effets positifs) et d'autre part des phénomènes de surexploitation locale fréquents dans les pêcheries thonières où sont exercés de forts taux d'exploitation locaux (effets négatifs). De telles relations non linéaires devraient être systématiquement prises en compte lors de l'utilisation des CPUE comme indice d'abondance local.

RESUMEN

El simulador SHADYS permite explorar la dinámica espacial de las pesquerías a escalas espacio-temporales muy pequeñas. Tras una breve presentación del simulador, se estudian diferentes escenarios característicos de las pesquerías de túnidos con cerco. Los resultados obtenidos muestran una gran coherencia con las observaciones reales. Permiten interpretar las relaciones locales CPUE/esfuerzo, obtenidas por medio de la modelización aditiva generalizada (GAM), como resultado de los efectos antagonistas de la estrategia de distribución del esfuerzo en los caladeros y de las tácticas de cooperación de los cerqueros (efectos positivos) por una parte, y por otra, de los fenómenos de sobrepesca local frecuentes en las pesquerías atuneras, donde existe una fuerte presión de explotación local (efectos negativos). Este tipo de relaciones no lineales, deberían ser tenidas en cuenta de forma sistemática cuando se utiliza la CPUE como índice de la abundancia local.

¹ ENSAR Halieutique, 65 rue de Saint-Brieuc, F-35042 Rennes Cedex, France.
(Tel. : 02.99.28.7532, Fax : 02.99.28.7535, E-mail : maury@roazhon.inra.fr)

INTRODUCTION

LA PUE est l'indice d'abondance le plus généralement utilisé en halieutique. Pourtant, son emploi est délicat et pose certains problèmes dus à la non linéarité de la relation PUE/abondance. Les principaux phénomènes responsables de cette non linéarité sont dus à la répartition hétérogène et densité-dépendante de la ressource et au comportement de recherche des pêcheurs (Hilborn et Walters, 1992 ; Gauthiez, 1997). Dans le cas des pêcheries thonières à la senne, l'utilisation des PUE comme indices d'abondance est encore compliquée par des phénomènes spécifiques responsables d'une non linéarité de la relation PUE/effort locale :

- l'accroissement d'efficacité des flottilles quand leur effort (mesuré en nombre d'heures de recherche) augmente (Foucher, 1994) ;
- les très forts taux d'exploitation locaux qui entraînent des phénomènes de surexploitation locale (Fonteneau *et al.*, 1997).

La présente communication cherche à mettre en évidence de manière simple les conséquences de ces deux phénomènes sur l'estimation des PUE. Pour cela, différents scénarii caractéristiques sont étudiés grâce au simulateur SHADYS (Simulateur HALieutique de DYnamiques Spatiales). Les résultats obtenus par simulations sont comparés aux relations empiriques entre PUE et effort des senneurs obtenues par modélisation additive généralisée (GAM) (De Rosa et Maury, 1997).

1. PRESENTATION DU SIMULATEUR SHADYS

SHADYS est un simulateur spatialisé de pêcheries utilisant comme interface un SIG (Savane © ORSTOM1995) qui permet de gérer et manipuler l'information spatiale. L'écosystème représenté est composé de sous-systèmes dont les dynamiques sont couplées. SHADYS met ainsi en relation 3 entités fondamentales de manière spatio-temporellement explicite :

● l'environnement qui est l'entité fondamentalement structurante de la répartition de la population de poissons dans l'espace-temps. D'un point de vue statistique, la répartition spatiale des éléments constitutifs de l'environnement n'est en général ni aléatoire (loi de poisson), ni uniforme. On observe au contraire des structures agrégatives (patch) et des structures de type gradients (Legendre et Fortin, 1989). C'est l'hétérogénéité structurale (Kolosa et Rollo, 1989). La combinaison de différents facteurs environnementaux répartis en taches et en gradients produit des structures spatiales complexes qu'on peut caractériser grâce à plusieurs grandeurs :

- la diversité des zones (de leur nature, de leur taille, ...),
- la fragmentation,
- la structuration,
- la connectivité des zones de même nature entre elles.

SHADYS permet de faire varier l'hétérogénéité de paysages environnementaux artificiels inspirés de biotopes marins.

Un gradient monotone se déplace à chaque pas de temps avec une vitesse sinusoïdale ; on peut considérer qu'il modélise les variations saisonnières d'une variable telle que la température, responsable de déplacements saisonniers à grande échelle. Par commodité, on le qualifie de gradient thermique. Après avoir longtemps considéré le milieu pélagique comme un désert biologique, on sait aujourd'hui que différents phénomènes d'enrichissement locaux ponctuent les eaux du large et constituent une véritable peau de panthère productive (Lemasson, 1989). Dans SHADYS, des patch sont répartis dans l'espace. Ils peuvent par exemple modéliser des « oasis » très productives parsemant le milieu pélagique globalement oligotrophe. Dans SHADYS, la distribution des patches est, au choix, soit connective, soit

non connective. Le gradient thermique est lui, par nature, totalement connectif.

SHADYS permet de faire varier la structuration spatiale de la distribution des patch, leur diversité et leur fragmentation selon des niveaux distincts. Un processus autoréférentiel analogue au développement d'une surface fractale permet de générer ces niveaux d'hétérogénéité et de les faire varier à l'aide d'un seul paramètre entier. La distribution des patch est ensuite bruitée de manière aléatoire pour éviter une trop grande symétrie (fig. 1).

Le paysage modélisé permet ensuite d'estimer en tous points de l'espace l'affinité biotique de l'environnement (hétérogénéité fonctionnelle, « favorabilité » locale telle qu'elle est perçue par les animaux) qui est représentée par une altitude. Plus l'altitude du paysage est basse, plus l'affinité biotique est forte (fig. 1).

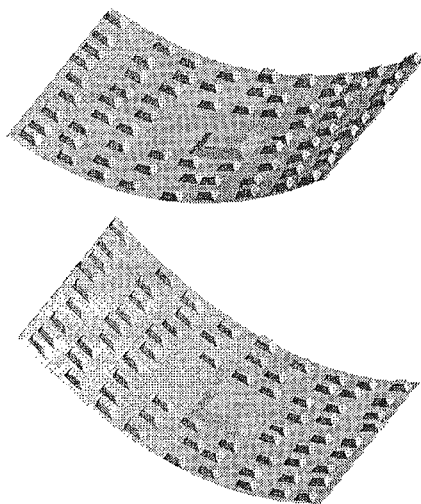


fig. 1 : Une sortie de SHADYS : le modèle numérique de paysage vital (MNPV) combinant hétérogénéité en patch et en gradient. Plus l'altitude est grande, plus le milieu est défavorable : comme un liquide, les poissons s'écoulent vers le fond des vallées du MNPV en fonction de l'information dont ils disposent localement. Le MNPV présenté est connectif, la population se déplace dans une matrice favorable et évite les bosses qui sont défavorables. Le MNPV utilisé dans le présent travail est non connectif, les bosses sont remplacées par des trous. Dans ce cas, la population se déplace dans une matrice défavorable et reste piégée dans des minimums locaux favorables. En haut, MNPV du premier janvier, en bas, du premier avril.

● Le modèle utilisé pour représenter la dynamique spatiale de la phase recrutée de la population est un modèle de diffusion-advection-réaction continu dans le temps et dans l'espace (Okubo, 1980 ; Sibert et Fournier, 1994) :

$$(1) \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial \left(D \cdot \frac{\partial N}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D \cdot \frac{\partial N}{\partial y} \right)}{\partial y} - \frac{\partial (uN)}{\partial x} - \frac{\partial (vN)}{\partial y} - (M + F) \cdot N$$

avec $N = N_{x,y,t}$ la densité de poissons au point (x, y) au temps t et à l'âge t , $D = D_{x,y,t}$ la diffusivité, $u = u_{x,y,t}$ et $v = v_{x,y,t}$ les coefficients d'advection, $M = M_{x,y,t}$ le coefficient de mortalité naturelle et $F = F_{x,y,t}$ le coefficient de mortalité par pêche. La résolution numérique de l'équation (1) est menée implicitement sur une grille carrée de 10 000 cellules (100x100). Tous les paramètres de forçage de la dynamique de la population sont potentiellement variables dans l'espace. Conformément à l'organisation en sous-systèmes couplés, leurs variations spatio-temporelles sont contraintes par l'hétérogénéité fonctionnelle de l'environnement :

$$u_{x,y,t} = - \frac{\partial (pv_{x,y,t})}{\partial x} \quad \text{et} \quad v_{x,y,t} = - \frac{\partial (pv_{x,y,t})}{\partial y}$$

avec $pv_{x,y,t}$ le potentiel vital en (x, y) au temps t qui est défini comme l'opposé de l'affinité biotique $ab_{x,y,t}$ (« favorabilité » de l'environnement) (fig. 1) corrigé d'un effet densité-dépendant à l'aide d'une équation « à pente constante » généralisée (Mac Call, 1991) :

$$pv_{x,y,t} = -ab_{x,y,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{x,y,t}}{K_{x,y,t}} \right)$$

avec γ une constante et $K_{x,y,t}$ la capacité de charge locale (proportionnelle à $ab_{x,y,t}$).

● L'exploitation est le fait d'une flottille de n bateaux. La sélectivité des engins de pêche est la même pour tous les bateaux et est définie par une courbe dont les paramètres sont modifiables. A chaque pas de temps, chaque bateau exploite une cellule choisie dans une zone de pêche qui ne couvre pas nécessairement tout l'espace. La stratégie de pêche du bateau est caractérisée par un coefficient α . A chaque pas de temps, le pêcheur explore aléatoirement une fraction α du nombre total de cellules de la zone de pêche et attribue son effort dans la cellule la plus poissonneuse (Gauthiez, 1997). α varie de 0 à 1. Si $\alpha=0$, l'effort est attribué à une cellule tirée au hasard, si $\alpha=1$, toutes les cellules sont connues du pêcheur et la pêche est exercée dans la cellule la plus poissonneuse.

L'effort de pêche des thoniers senneurs est mesuré en heures de recherche. Quand plusieurs bateaux pêchent sur une même zone, la capacité de recherche d'un bateau est utilisée par tous les autres (soit directement quand les bateaux coopèrent, soit indirectement quand ils s'espionnent) (Foucher, 1994). Pour simuler l'accroissement d'efficacité des senneurs, chaque bateau est individuellement doté d'une faible capacité de localisation des fortes concentrations qui le rend à peine plus performant que si il pêchait aléatoirement ($\alpha=0.01\%$). Par contre, quand plusieurs bateaux pêchent sur la zone, leur effort est attribué à la cellule la plus poissonneuse rencontrée par l'ensemble des bateaux situés dans la zone de pêche considérée (la zone de pêche considérée ici couvre tout l'espace de simulation). Dans ces conditions, plus le nombre de bateaux est important dans une zone, plus leur capacité à repérer les concentrations de poissons augmente. L'augmentation de l'effort de pêche a donc, dans ce cas là, un effet positif sur la puissance de pêche locale (Laurec, 1977) de chacun des navires.

2. ETUDE DE SIMULATIONS

Différentes simulations sont menées. On utilise pour celles-ci un niveau d'hétérogénéité moyen et un paysage non connectif (la population migre saisonnièrement et des zones favorables distinctes provoquent de fortes concentrations locales de thons). Les coefficients de diffusion et d'advection sont choisis pour donner des distributions spatiales de la population dont l'hétérogénéité est jugée réaliste. L'effort varie de 1 à 40 navires dont la position est renouvelée régulièrement (au bout d'un temps variable d'un pas de temps -5 jours- à 6 pas de temps -1 mois-) et la puissance de pêche initiale de chaque navire varie suivant les simulations.

On calcule des CPUE mensuelles (6 pas de temps). Les simulations concernant une unique cohorte exploitée du début à la fin de sa vie (et donc présentant des abondances très variables selon l'âge (fig. 1), les CPUE aux différents âges ne peuvent pas être utilisées comme une mesure de l'efficacité des navires. On utilise donc le coefficient de capturabilité globale défini comme le rapport des CPUE à l'effectif total du stock ($q=U/N$).

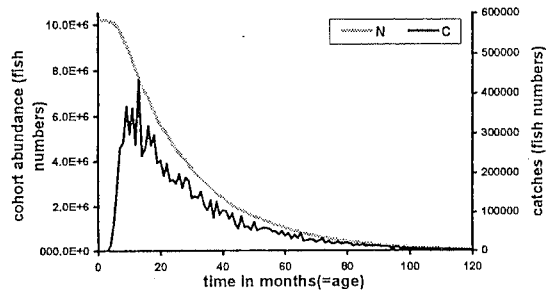


fig. n°1 : Effectifs (N) et captures (C) de thons en fonction du temps. Les simulations ne s'intéressant qu'à une seule cohorte, le temps est aussi l'âge des poissons. Les animaux ne sont recrutés qu'à un an (la sélectivité est une sigmoïde et l'âge à la première capture est 12 mois).

2.1. Viscosité de la ressource et surexploitation locale

Quand les bateaux sont individuellement doués d'une importante capacité de localisation des fortes concentrations de thons et d'une forte capacité de capture (forts taux d'exploitation locaux par navires), la capturabilité en fonction de l'effort est strictement décroissante (fig. 2). Les navires étant individuellement capables de localiser les zones favorables à la pêche, l'efficacité de pêche de la flottille n'augmente pas quand le nombre de bateaux augmente. Les bateaux étant doués d'une forte capacité de capture, ils épuisent très rapidement la zone de pêche et leurs rendements (et donc la capturabilité q) chutent très rapidement. Comme les bateaux exercent leur effort plusieurs pas de temps consécutifs au même endroit, la diminution locale d'abondance qu'ils provoquent est compensée par l'arrivée de poissons par diffusion. Ces poissons proviennent d'une fraction « cryptique » de la biomasse (Fonteneau *et al.*, 1997) provenant de zones non exploitées (ou non exploitables). En conséquence, la baisse de capturabilité quand l'effort augmente est non linéaire. Si les bateaux pêchaient toujours au même endroit, leurs PUE diminueraient très fortement mais tendraient vers une valeur asymptotique non nulle correspondant à l'arrivée de poissons sur la zone de pêche par diffusion.

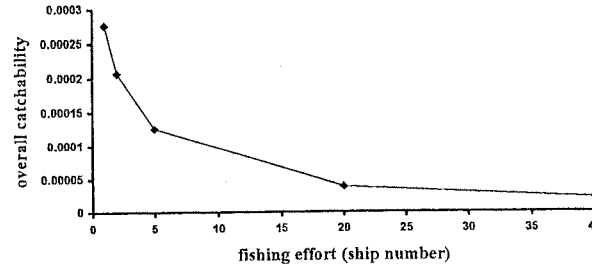


fig. n°2 : capturabilité totale (U/N) en fonction du nombre de navires de la flottille de pêche (valeurs moyennes sur une simulation de 10 ans). Cas d'une forte capacité de recherche individuelle des navires ($\alpha=0.05\%$) et d'une forte puissance individuelle initiale (forts taux d'exploitation locaux par navires). Les navires maintiennent leur effort deux pas de temps (10 jours) au même endroit avant de se déplacer.

2.2. Comportement de coopération des pêcheurs

Quand les bateaux sont individuellement doués d'une faible capacité de localisation des fortes concentrations de thons et d'une faible capacité de capture, la capturabilité en fonction de l'effort croît vers une valeur asymptotique (fig. 4). Elle croît rapidement quand l'effort augmente (la puissance locale des navires augmente car les bateaux coopèrent) puis elle atteint un palier quand le nombre de bateaux est suffisant pour repérer presque à tous les coups les plus fortes concentrations de thons. Les taux d'exploitation locaux demeurant faibles malgré l'augmentation de l'effort (en tout cas dans la gamme d'effort explorée), les PUE ne diminuent pas.

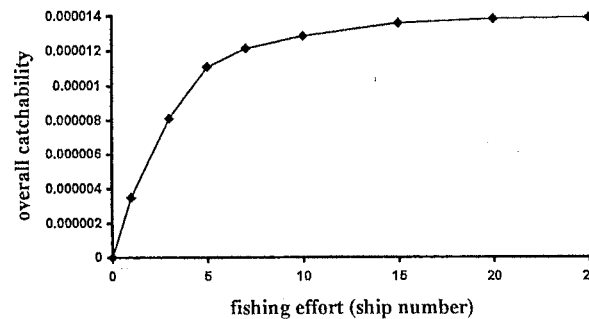


fig. n°4 : capturabilité totale (U/N) en fonction du nombre de navires de la flottille de pêche (valeurs moyennes sur une simulation de 10 ans). Cas d'une capacité de recherche individuelle nulle ($\alpha=0.01\%$: navire « aléatoire ») et d'une puissance individuelle initiale faible. Les navires maintiennent leur effort un pas de temps (5 jours) au même endroit avant de se déplacer.

2.3. Comportement de coopération et surexploitation locale

Quand les bateaux sont individuellement doués d'une faible capacité de localisation des fortes concentrations de thons et d'une capacité de capture moyenne, la capturabilité en fonction de l'effort passe par un maximum (fig. 3). Elle croît tout d'abord quand l'effort augmente (la puissance locale des navires augmente par coopération) puis l'augmentation de puissance locale entraîne une augmentation des taux d'exploitation locaux par navires et un phénomène de surexploitation locale et les PUE des navires décroissent quand l'effort continu d'augmenter.

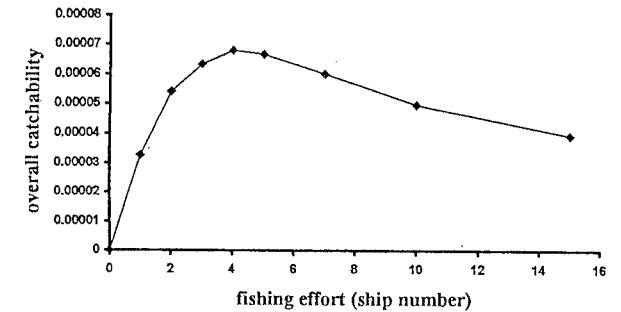


fig. n°3 : capturabilité totale (U/N) en fonction du nombre de navires de la flottille de pêche (valeurs moyennes sur une simulation de 10 ans). Cas d'une faible capacité de recherche individuelle des navires ($\alpha=0.02\%$) et d'une puissance individuelle initiale moyenne. Les navires maintiennent leur effort deux pas de temps (10 jours) au même endroit avant de se déplacer.

3. OBSERVATIONS ET INTERPRETATION

De Rosa et Maury. (1997) ont mené une étude des PUE d'albacores par les senneurs FIS à l'aide de méthodes GAM (General Additive Models). Les méthodes GAM sont des outils statistiques récents (Hastie et Tibshirani, 1990) permettant la mise en évidence de manière non paramétrique de relations non linéaires entre variables. L'étude concerne toute la zone de répartition des senneurs FIS de 1980 à 1991 et met clairement en évidence une relation non linéaire entre PUE et effort. Les PUE sont systématiquement croissantes pour les faibles valeurs d'efforts puis soit croissent moins rapidement, soit atteignent un plateau, soit décroissent pour les plus fortes valeurs d'effort (fig.4).

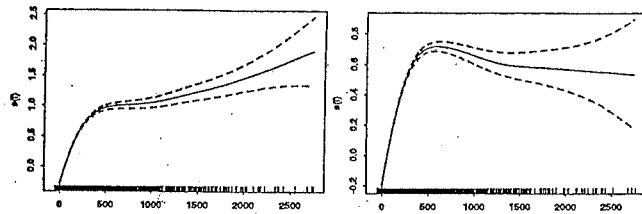


fig. n°4 : relations PUE/effort obtenues par analyse GAM des PUE de senneurs FIS (De Rosa et Maury, 1997). A gauche, courbe obtenue pour les jeunes poissons peu touchés par des dépletions locales car très nombreux dans le milieu et à droite, courbe obtenue pour les individus âgés connaissant de forts taux d'exploitation locaux et pouvant donc vraisemblablement connaître des phénomènes d'épuisement locaux.

Les faibles PUE observées pour les faibles efforts sont interprétées par De Rosa et Maury (1997) comme une conséquence de l'expérience des pêcheurs qui explorent peu les zones qu'ils supposent être faiblement abondantes. Cette composante stratégique (à grande échelle spatio-temporelle) n'est pas prise en compte dans nos simulations mais est vraisemblablement très importante dans la réalité. Les simulations réalisées sur SHADYS permettent d'interpréter les relations non linéaires observées dans la réalité comme résultant des effets antagonistes d'une part de la tactique de coopération (ou d'espionnage) des navires entre eux pour localiser les concentrations de thons et d'autre part de la diminution locale de biomasse due aux forts taux d'exploitation exercés (phénomène de surexploitation locale).

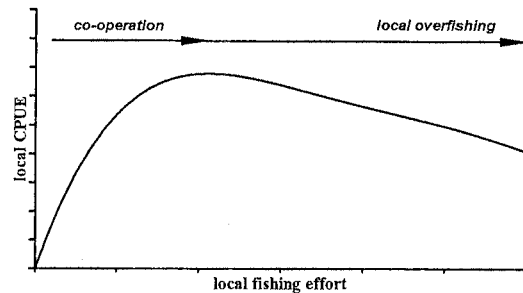


fig. n°5 Relation théorique entre les CPUE locales et l'effort local. La non linéarité de la relation est interprétée comme résultant de deux processus antagonistes : d'une part la coopération des navires entre eux (tactique) et la saisonnalité du choix des zones de pêche (stratégie) qui entraînent une augmentation de l'efficacité des navires et d'autre part la diminution locale de biomasse qui entraîne une baisse des rendements locaux.

CONCLUSION

A partir d'hypothèses réalistes sur le fonctionnement des pêcheries thonières, le simulateur SHADYS permet de retrouver les relations non linéaires entre PUE locales et effort observées dans la réalité (De Rosa et Maury, 1997). De telles relations sont interprétées comme résultant des effets antagonistes d'une part des stratégies de distribution de l'effort dans les zones poissonneuses et des tactiques de coopération des senneurs (effets positifs) et d'autre part des phénomènes de surexploitation locale fréquents dans les pêcheries thonières où sont exercés de forts taux d'exploitation locaux (Fonteneau *et al.*, 1997) (effets négatifs). Les phénomènes de non linéarité des PUE locales en fonction de l'effort sont manifestement importants pour les pêcheries thonières à la senne. Ces phénomènes sont également vraisemblables pour d'autres flottilles thonières et devraient faire l'objet d'une étude préliminaire systématique avant d'utiliser les PUE comme un indice d'abondance local.

REFERENCES

- De Rosa A. L., O. Maury, 1997. Analyse spatio-temporelle des relations thons-environnement. Utilisations des données OPA et des outils d'analyse SIG et GAM. Rec. Doc. Sci. ICCAT SCRS/97/85.
- 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. In press.
- Foucher E., 1994. PUE et effort de pêche local des thoniers senneurs dans les pêcheries de l'Atlantique tropical est. Rec. Doc. Sci. ICCAT XLII 249-259.
- Gauthiez F., 1997. Structuration spatiale des populations de poissons marins demersaux. Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques. Thèse de doctorat.
- Hastie et Tibshirani, 1990. Generalized Additive Models. Chapman and Hall eds.
- Hilborn R., C. J. Walters 1992. Quantitative fisheries stock assessment. Choice, dynamics and uncertainty. Chapman and Hall, 570p.
- Kolosa J., C. D. Rollo 1989. Introduction : the heterogeneity of heterogeneity : a glossary. *in* Ecological heterogeneity, Kolosa J. and S. T. A. Pickett (eds). Ecological studies n°86. Berlin : Springer Verlag.
- Laurec A., 1977. Analyse et estimations des puissances de pêche. J. Cons. Int. Explor. Mer, 37(2) : 173-185.
- Legendre P., M.-J. Fortin 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80: 107-138.
- Lemasson, 1989. Thons et environnement, Paris du 12 au 15 septembre 1988. ORSTOM, coll. *Colloques et Séminaires*, 1989, 84p.
- Okubo A. 1980. Diffusion and ecological problems : mathematical models. *Biomathematics* Vol.10. Springer-Verlag, 254p.
- Sibert J. R., Fournier D. A. 1994. Evaluation of Advection-Diffusion Equations for Estimation of Movement Patterns from Tag Recapture Data. Proceedings of the first FAO expert consultation on interactions of pacific ocean tuna fisheries. Vol. 1. R. S. Shomura, J. Majkowski and S. Langi (eds) FAO fisheries technical paper 336/1 326pp.