

L'espace une ressource naturelle surexploitée ? Scenarii de gestion spatiale simulés sur SHADYS (Simulateur HALieutique de DYnamiques Spatiales).

Olivier MAURY, Didier GASCUEL

ENSAR halieutique

65 rue de Saint-Brieuc, F 35042 Rennes cedex

tel : 02-99-28-75-32 - fax : 02-99-28-75-35 email : maury@roazhon.inra.fr

INTRODUCTION

L'essor actuel de la biologie de la conservation conduit à la mise en place de méthodes nouvelles de gestion des populations et des écosystèmes fondées sur la gestion de l'espace. Parmi ces méthodes, l'utilisation d'espaces protégés (refuges, parcs naturels...) est de plus en plus répandue en milieu terrestre. En milieu marin, elle est de plus en plus à l'ordre du jour avec le bannissement de l'effort de pêche sur une zone donnée ou la création de parcs marins totalement protégés. En cherchant à limiter les impacts anthropiques sur l'écosystème sans pouvoir véritablement les connaître et les mesurer, l'utilisation d'espaces protégés relève d'une approche précautionneuse. Les conséquences de la création de zones refuges peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- les impacts à court terme (qu'on qualifie en général de long terme) sur la production halieutique (modification du rendement par recrue et du recrutement), les prises accessoires ou sur la répartition de l'effort de pêche ;
- les impacts à plus long terme qui relèvent d'une stratégie précautionneuse : conservation de la biodiversité spécifique, viabilité des populations, conservation d'un pool génétique non soumis à la sélection anthropique, protection du milieu... (Dugan et Davis, 1992).

La présente communication cherche à mettre en évidence de manière simple les impacts à court terme d'une zone refuge sur les captures et sur la distribution de l'effort de pêche. Pour cela, différents *scenarii* de gestion spatiale sont explorés grâce au simulateur SHADYS (Simulateur HALieutique de DYnamiques Spatiales).

Le simulateur est rapidement présenté. Puis des simulations sont menées en faisant varier la surface totale ainsi que le nombre et la localisation des box protégés. Les effets de la gestion par box sont étudiés sur trois types de populations : résidente, diffusives et migratoire. La répartition de l'effort de pêche est analysée dans le cas d'une distribution spatiale fortement déterministe de cet effort (quand les pêcheurs ont une stratégie de recherche des plus fortes captures).

1. PRESENTATION DU SIMULATEUR SHADYS

SHADYS est un simulateur spatialisé de pêcheries utilisant comme interface un SIG (Savane) 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 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 al.*, 1989). C'est l'**hétérogénéité structurale** (Kolosa *et al.*, 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 (diversité 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 benthiques. La structure des paysages est cependant suffisamment générique pour pouvoir être transposée à d'autres biotopes.

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. Par commodité, on le qualifie de gradient thermique. Des patch sont répartis dans l'espace. Ils peuvent par exemple modéliser les zones rocheuses parsemant un fond de vase. Dans SHADYS, la distribution des patchs est 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 point 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).

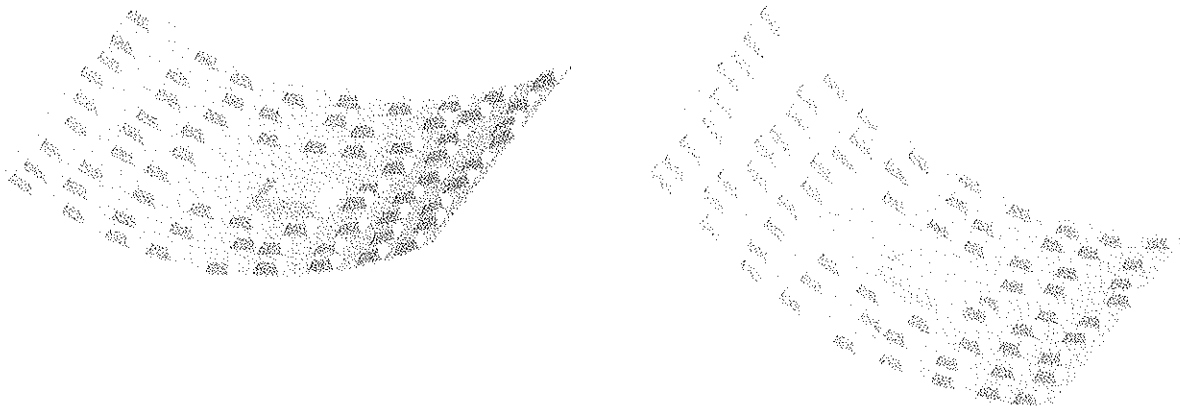


fig. 1 : Une sortie de SHADYS : le modèle numérique de paysage vital (MNPV) combinant hétérogénéité en patch et en gradient. Plus l'altitude est grande, plus le milieu est défavorable : comme un liquide, les poissons s'écoulent vers le fond des vallées du MNPV en fonction de l'information dont ils disposent localement. Le MNPV présenté est connectif (la population se déplace dans une matrice connective). Dans le cas contraire, les bosses sont remplacées par des trous. A gauche, MNPV du premier janvier, à droite, du premier avril.

② 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) :

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

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 sur une grille carrée de 100 000 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 :

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

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) :

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

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

③ 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 attribut 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.

2. ETUDE DE SIMULATIONS

Différentes simulations sont menées. On utilise pour celles-ci un niveau d'hétérogénéité moyen et un paysage connectif. L'effort est le fait de 1000 bateaux aléatoires qui exploitent intensément le stock considéré (situation de surexploitation).

2.1. Une espèce résidente

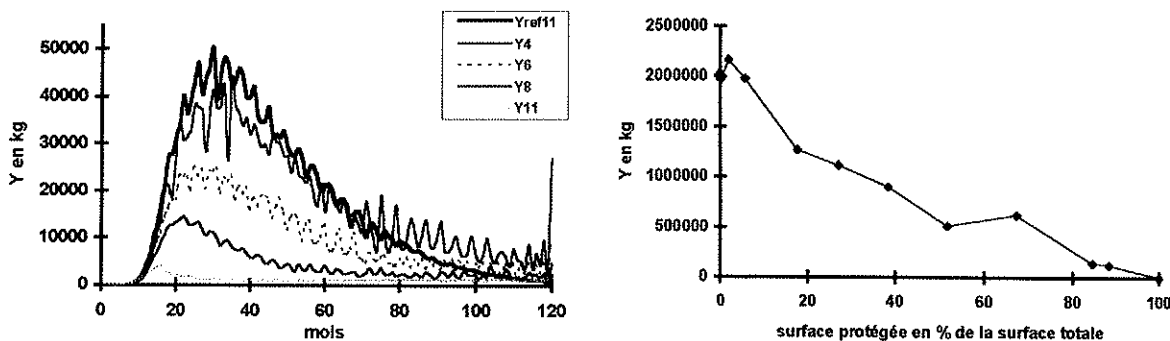


fig. 2 : A gauche, production d'une cohorte en fonction du temps pour différentes valeurs de la surface protégée (Y/R_{ref} : pas de zone protégée ; Y_4 à Y_{11} , zone protégée de superficie croissante). A droite, production en fonction de la surface protégée.

En réduisant la fraction du stock disponible à la pêche, la protection de l'espace entraîne pour une population résidente une **diminution globale de production par recrue**. Ceci doit néanmoins être nuancé. En effet, l'augmentation de la surface protégée n'entraîne pas une augmentation linéaire de la proportion de population protégée. On observe par exemple fig. 2 une légère remontée de Y/R quand la surface protégée augmente, due à l'hétérogénéité spatiale de la population. A cet endroit de la courbe, l'augmentation de surface du refuge se fait sur une zone où il n'y a pas de poissons. La population n'est donc pas moins accessible. Par contre, l'effort se trouve concentré sur les zones non protégées et la production augmente.

2.2. Une espèce diffusive

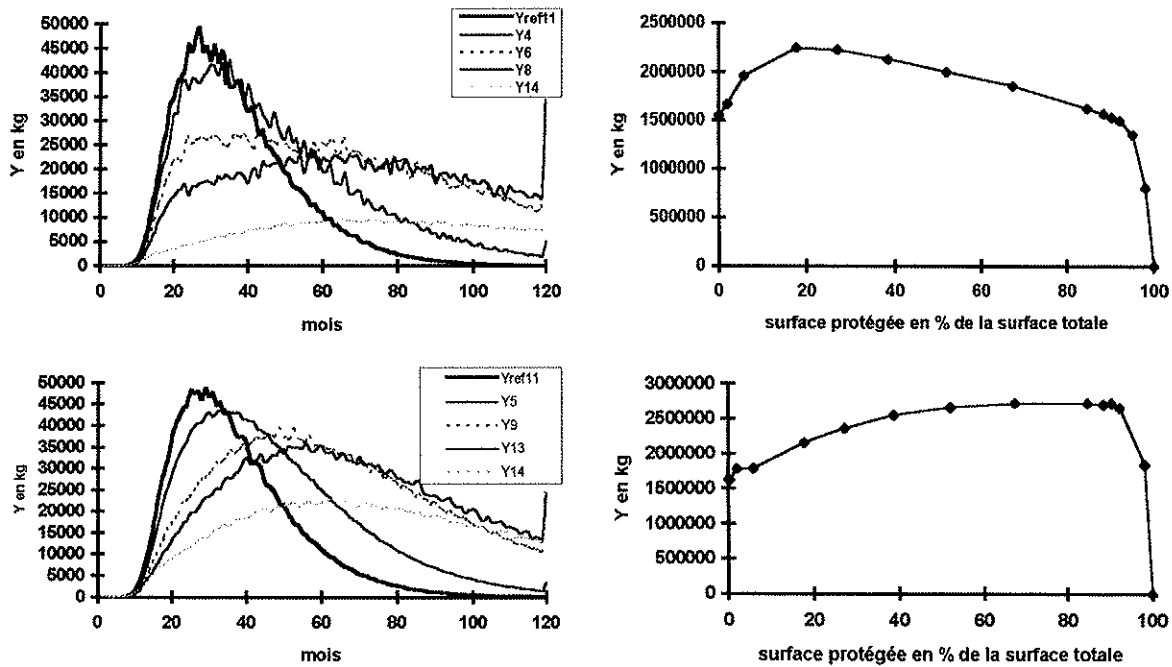


fig. 3 : A gauche, production d'une cohorte en fonction du temps pour différents niveaux de surface protégée (Y/R_{ref} : pas de zone protégée ; Y₄ à Y₁₄, zone protégée de superficie croissante). A droite, production en fonction de la surface protégée. Première ligne, diffusion moyenne, deuxième diffusion forte.

Selon le degré de diffusivité du stock considéré, la mise en place d'une zone refuge a des conséquences variables sur la production par recrue. Néanmoins, dans la plupart des cas, la production par recrue d'une population surexploitée augmente nettement avant de décroître quand la surface protégée augmente. Mettre en place une zone protégée revient ici à diminuer l'effort de pêche effectif à effort nominal constant. Plus il est protégé, plus le poisson est capturé vieux.

2.3. Une espèce migratrice

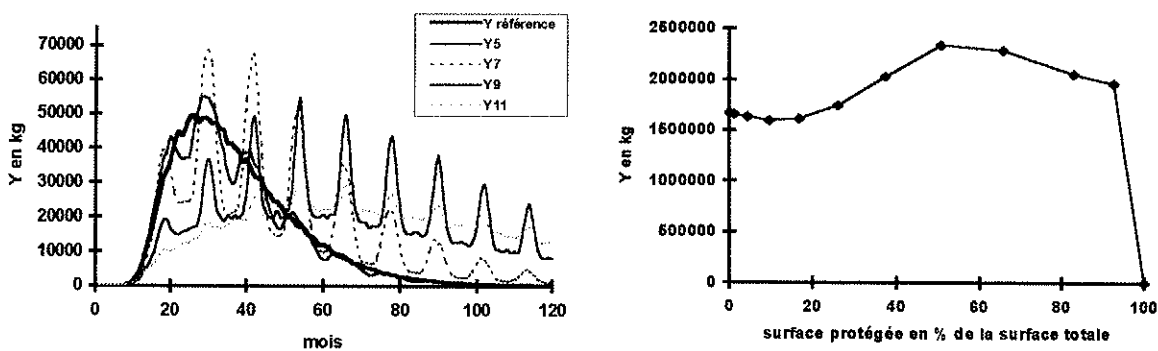


fig. 4 : A gauche, production d'une cohorte en fonction du temps pour différents niveaux de surface protégée. A droite, production en fonction de la surface protégée.

Pour une espèce migratrice comme pour une espèce diffusive, la production par recrue passe par un maximum en fonction de la surface protégée. La différence essentielle entre ces deux types d'espèces est dans la variabilité temporelle de Y/R induite par les migrations (la population se trouve alternativement dans le refuge puis à côté de celui-ci). Pour stabiliser la production, il

faudrait mettre en place soit un refuge mobile qui suit la migration du stock, soit un refuge « en longueur » qui protège une partie de la population quelle que soit sa position.

2.4. Approche plurispécifique

Chaque population ayant une réponse spécifique à la mise en place d'une zone protégée, il est nécessaire de raisonner dans un contexte plurispécifique. Partant d'une situation donnée, on analyse ici l'impact d'une zone refuge en fonction de sa surface pour deux populations différentes.

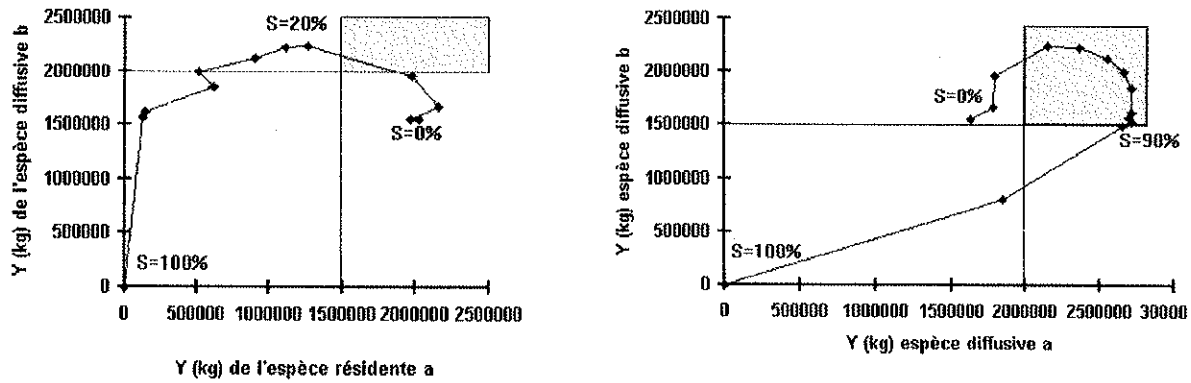


fig. 5 : Scenario de gestion spatiale plurispécifique : on simule l'instauration d'une surface protégée de taille croissante (de 0% à 100% de la surface totale) (en gris les droites d'isoproduction totale). Les courbes sont valables pour une localisation donnée du refuge. A gauche, une espèce résidente (a) et une diffusive (b) : l'accroissement de la taille du refuge diminue très vite la production de l'espèce résidente mais accroît celle de l'espèce diffusive et celle du total avec un maximum en protégeant 20% de la surface totale. A droite, deux espèces diffusives : les gains sont ici sensibles pour chacune des deux espèces et pour le total jusqu'à 90% de surface protégée. Le domaine grisé correspond au domaine de satisfaction de contraintes de production arbitrairement fixées.

2.4. Distribution de l'effort de pêche

On étudie ici les conséquences de la mise en place d'un refuge sur la distribution de l'effort de pêche. Pour cela, la flottille étudiée est supposée avoir une stratégie de recherche des plus fortes densités de poissons où elle aura les plus forts rendements. La distribution de l'effort est présentée fig. 6.

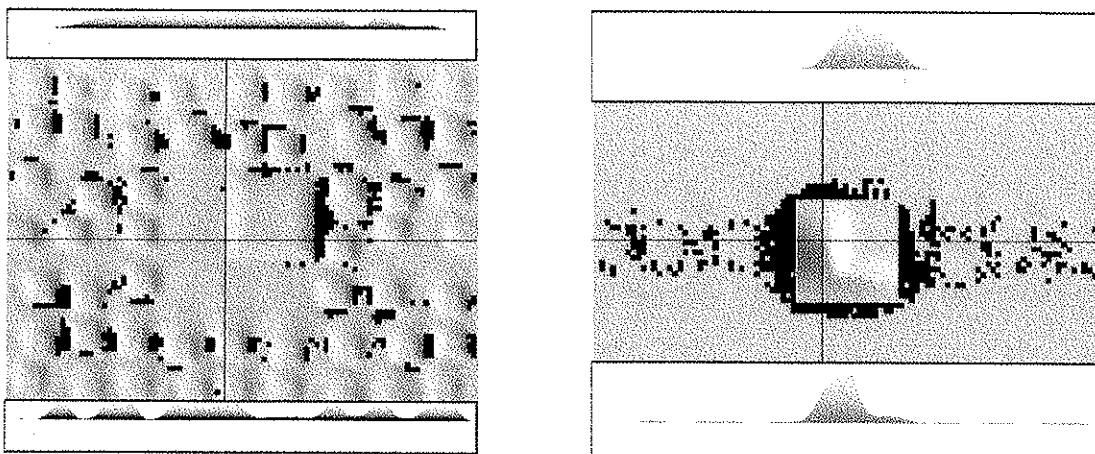


fig. 6 : En gris, distribution de la ressource (en haut, coupe des densités relatives selon le trait vertical, en bas selon le trait horizontal). Au début de la simulation, à gauche, la population peu exploitée se répartit de manière hétérogène dans tout l'espace selon le MNPV. En fin de simulation, à droite, la population qui a été fortement exploitée est concentrée dans la zone protégée. La distribution de l'effort de pêche est déterministe. Les pêcheurs (en noir) qui recherchent les fortes concentrations de poissons sont distribués dans tout l'espace en début de simulation puis se concentrent progressivement autour de la zone refuge où ils trouvent les plus fortes densités.

Si la population est diffusive et le comportement des pêcheurs est de type déterministe (recherche des fortes densités de poisson), la distribution de l'effort évolue inéluctablement vers une distribution le long des frontières du refuge. Dans le refuge, la répartition des densités de population (aux structures paysagères près) est gaussienne.

CONCLUSION

On montre que si l'effort est spatialement distribué en fonction d'une stratégie de maximisation instantanée des captures, la répartition des bateaux évolue progressivement vers une répartition le long des frontières de la zone interdite. De tels phénomènes ont été observés par Rijnsdorp *et al.* (1996) le long de zones protégées en mer du Nord et peuvent avoir d'importantes conséquences en terme d'impacts locaux sur l'écosystème et d'interactions techniques entre les bateaux.

En terme de production par recrue, on montre que pour des espèces de type migratoire ou diffusif, la notion de **surexploitation de l'espace** a un sens puisque la production en fonction de la surface protégée peut passer par un maximum avant de décroître. Pour un diagramme d'exploitation, un effort et une localisation du refuge donnés, il existe donc un domaine optimal non nul de surface protégée (différents travaux ont des conclusions similaires : Attwood et Benet, 1995 ; Clark, 1996). Dans ces conditions, les zones refuge se comportent comme des « **sources** ». Elles alimentent les zones exploitées qui se comportent comme des « **puits** » (Pulliam, 1988 ; Pulliam et Danielson, 1991).

Pour des populations résidentes, au contraire, la production ne peut que diminuer quand la surface protégée augmente. Ces différents types de comportements des populations posent d'intéressantes questions de gestion multispécifique : comment concilier les différents comportements des populations? comment tenir compte des caractéristiques fonctionnelles du « paysage vital » pour localiser les zones refuges qui ne sont pas forcément les mêmes d'une espèce à l'autre?, quelles tailles, quelles positions relatives, quelles localisations spatio-temporelles donner aux refuges (un gros ou plusieurs petits...)?... Tenter de répondre à ces différentes questions requiert le développement et l'usage de méthodes d'évaluation et de modélisation spatiales encore peu répandues en halieutique.

REFERENCES

- Attwood C. G., B. A. Bennett 1995. Modelling the effect of marine reserves on the recreational shore-fishery of the south-western cape, South Africa. *S. Afr. J. mar. Sci.* 16: 227-240.
- Clark C. W. 1996. Marine reserves and the precautionary management of fisheries. *Ecological Applications*. 6(2): 369-370.
- Dugan J. E., Davis G. E. 1992. Applications of marine refugia to coastal fisheries management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 50: 2029-2042.
- Gauthiez F., 1997. Structuration spatiale des populations de poissons marins demersaux. Caractérisation, conséquences biométriques et halieutiques. Thèse de doctorat.
- Kolosa J., Rollo C. D. 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.
- Legendre P., M.-J. Fortin 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80: 107-138.
- Okubo A. 1980. Diffusion and ecological problems : mathematical models. *Biomathematics* Vol.10. Springer-Verlag. 254p.
- Pulliam H. R., 1988. Sources, sinks, and population regulation. *American Naturalist*. 132:652-661.
- Pulliam H. R. Danielson B. J., 1991. Sources, sinks, and habitat selection : a landscape perspective on population dynamics. *American Naturalist*. 137:S50-S66.
- Rijnsdorp A. D., A. M. Buys, F. Storbeck, E. Visser 1996. Micro-scale distribution of beam trawl effort in the southern North Sea between 1993 and 1996 in relation to the trawling frequency of the sea bed and the impact on benthic organisms. ICES CM 1996/Mini: 11.
- 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.