

## Surexploitation locale ou globale? La vpa spatiale, une méthode d'évaluation de l'exploitation par zones.

Olivier MAURY<sup>(1)</sup>, Didier GASCUEL<sup>(1)</sup>, Dominique PELLETIER<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> 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

<sup>(2)</sup> IFREMER MAERHA  
B.P. 1049, F 44037 Nantes cedex 01  
tel. : 02-40-37-41-64 fax : 02-40-37-40-75

### INTRODUCTION

Les outils d'évaluation et de gestion des ressources halieutiques, aujourd'hui utilisés pour caractériser la surexploitation, sont en général fondés sur la modélisation de la dynamique des populations à une échelle qui est celle de l'ensemble du stock et de sa zone de répartition. Ainsi, ces méthodes ne permettent pas des estimations hétérogènes dans l'espace, fondées sur une réalité elle-même hétérogène dans l'espace et le temps. Conséquemment, la surexploitation n'est pensée qu'à l'échelle globale. L'hétérogénéité spatiale a pourtant un rôle fonctionnel essentiel dans la dynamique du système pêche et des écosystèmes au sens large et la notion de surexploitation devrait être étendue aux échelles dites locales.

Ainsi, un stock sous-exploité globalement peut être gravement surexploité localement :

- En terme d'abondance, une faible pression de pêche globale n'empêche pas des taux d'exploitation locaux extrêmement élevés. Ce phénomène est caractéristique des stocks de poissons migrateurs comme les thons par exemple (Fonteneau *et al.*, 1997). Ceux-ci peuvent connaître de fortes diminutions locales de biomasse (une zone peut être littéralement « vidée » de son poisson par la pêche) sans que le stock soit nécessairement fortement atteint. La vitesse de « récupération » de la zone est alors fonction des déplacements des poissons, de la « viscosité » de la population (Mc Call, 1991). Prendre en compte les biais potentiels dus à ces phénomènes locaux est nécessaire à l'évaluation des stocks.
- En terme de biodiversité, il apparaît de plus en plus clairement que la notion de stock peut masquer une grande hétérogénéité des populations qui le composent (exemple du stock de morue du sud de Terre Neuve qui comprendrait au moins 5 composantes distinctes -Brethes, 1996-). La surexploitation locale (invisible globalement) peut alors entraîner la disparition d'une sous-population endémique.

Ainsi, les méthodes de gestion spatio-temporelle de l'exploitation incluant des cantonnements d'effort (lutte contre la surexploitation des stocks) ou la création de zones refuge (maintien de la biodiversité et lutte contre la surexploitation biologique dans un sens plus large) s'imposent de plus en plus en halieutique. C'est une des raisons pour lesquelles de nombreux travaux cherchent à appréhender l'espace en dynamique des population et en évaluation des stocks. La plupart de ces travaux s'intéressent à des stocks pour lesquels des données de marquage-recapture sont disponibles (ces données permettent l'estimation des taux de déplacement entre zones nécessaire aux modélisations spatiales). Malheureusement, en raison du faible nombre de stocks pour lesquels ces données sont disponibles et utilisables, les taux de déplacement des poissons de la plupart des stocks exploités sont inconnus et les approches d'évaluation des stocks et de modélisation spatiale demeurent la plupart du temps impossibles en pratique.

Cette communication propose une méthode d'estimation des effectifs et des mortalités par pêche locaux dans deux zones exploitées et des taux de migration entre ces deux zones, uniquement à partir de données de capture par âge et par zone et d'effort de pêche par zone. La surface occupée par le stock dans chaque zone est prise en compte.

## I. PRESENTATION DE LA METHODE

Le modèle de base que nous utilisons est l'analogie discret du modèle en boîte dont la formulation différentielle a été présentée par Beverton et Holt en 1957. Il formulé ici pour deux zones spatiales distinctes et est fondé sur l'hypothèse d'une migration instantanée des poissons à la fin de chaque période (Punt *et al.*, 1994) :

$$(1) \quad \begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t} e^{-(F_{1,t} + M_{1,t})} (1 - T_{12,t}) + N_{2,t} e^{-(F_{2,t} + M_{2,t})} T_{21,t} \\ N_{2,t+1} = N_{2,t} e^{-(F_{2,t} + M_{2,t})} (1 - T_{21,t}) + N_{1,t} e^{-(F_{1,t} + M_{1,t})} T_{12,t} \\ C_{1,t} = \frac{F_{1,t}}{F_{1,t} + M_{1,t}} N_{1,t} (1 - e^{-(F_{1,t} + M_{1,t})}) \\ C_{2,t} = \frac{F_{2,t}}{F_{2,t} + M_{2,t}} N_{2,t} (1 - e^{-(F_{2,t} + M_{2,t})}) \end{cases}$$

avec :  $N_{1,t}$  et  $N_{2,t}$  les effectifs dans les zones 1 et 2 pendant le pas de temps  $t$  ;  $F_{1,t}$  et  $F_{2,t}$  les coefficients de mortalité par pêche dans les zones 1 et 2 relatifs aux effectifs et aux efforts de chacune des zones pendant le pas de temps  $t$  ;  $M_{1,t}$  et  $M_{2,t}$  les coefficients de mortalité naturelle dans les zones 1 et 2 pendant le pas de temps  $t$  ;  $T_{12,t}$  le taux de migration de la zone 1 vers la zone 2 pendant le pas de temps  $t$  et  $T_{21,t}$  le taux de migration de la zone 2 vers la zone 1 pendant le pas de temps  $t$ .

Aucune hypothèse n'est faite quand à la distance franchie par les poissons et la connexité des zones. Le modèle n'est pas spatialement explicite, il s'appuie sur l'hypothèse fondamentale d'homogénéité de chaque zone qui se comporte comme un tout.

Pour simplifier les notations, dans toute la suite de l'article sera considéré le cas d'une seule cohorte. La méthode présentée pouvant ensuite être facilement étendue à toutes les cohortes exploitées du stock. Dans le cas d'une seule cohorte, l'indice temporel  $t$  est donc également un indice d'âge.

Le système (1) comporte deux variables d'états  $N_{1,t}$  et  $N_{2,t}$  inconnues, deux variables de sortie connues  $C_{1,t}$  et  $C_{2,t}$  et six paramètres ( $M_{1,t}$ ,  $M_{2,t}$ ,  $F_{1,t}$ ,  $F_{2,t}$ ,  $T_{12,t}$  et  $T_{21,t}$ ). Les coefficients de mortalité naturelle  $M_{1,t}$  et  $M_{2,t}$  sont, en l'absence d'informations complémentaires, fixés arbitrairement comme ils le sont en général dans les analyses des cohortes. Les coefficients de mortalité par pêche relatifs aux effectifs et aux efforts de chacune des zones  $F_{1,t}$  et  $F_{2,t}$  sont déterminés à partir de la mortalité par pêche totale  $F_t$  estimée par VPA. En utilisant la capturabilité surfacique  $q'$  (Laurec et Le Guen, 1981) sous hypothèse d'homogénéité spatiale des densités dans chaque zone<sup>(1)</sup>, on a par définition :

(1) La capturabilité surfacique  $q'_t$  est définie comme le rapport des CPUE locales  $U_{s,t}$  à la densité locale  $D_{s,t}$  calculées sur une surface élémentaire  $ds$  pendant le temps  $t$  :

$$(2) \quad q'_t = \frac{U_{s,t}}{D_{s,t}} = \frac{U_{s,t}}{N_{s,t}} ds = q_{s,t} ds$$

avec  $N_{s,t}$  et  $q_{s,t}$  les effectifs et la capturabilité dans la surface élémentaire  $ds$  au temps  $t$ .

Contrairement à la capturabilité  $q_t$ , on peut faire l'hypothèse que le coefficient  $q'_t$  est spatialement constant à un temps  $t$  donné. Les prises par unité d'effort de chacune des zones  $i$  au temps  $t$  peuvent alors être exprimées de la manière suivante :

$$CPUE_{i,t} = \frac{C_{i,t}}{f_{i,t}} = \frac{q'_t \int_{S_i} D_{s,t} f_{s,t} ds}{\int_{S_i} f_{s,t} ds}$$

avec  $f_{s,t}$  l'effort dans la surface élémentaire  $ds$  au temps  $t$ .

En utilisant l'hypothèse d'homogénéité spatiale de chacune des zones  $i$  ( $D_{s,t} = D_{i,t}$ ), l'équation précédente se simplifie en

$$q' = q_{i,t} \cdot S_{i,t} = \frac{F_{i,t} \cdot S_{i,t}}{f_{i,t}}$$

avec  $S_{i,t}$  les surfaces couvertes par le stock dans chaque zone  $i$  pendant le pas de temps  $t$  (en l'absence d'autres informations, ces surfaces peuvent être assimilées soit à la surface des boîtes, soit à l'aire de répartition de l'effort dans chaque zone).

$q'$  étant spatialement constant, on peut donc écrire :

$$\frac{F_{1,t} \cdot S_{1,t}}{f_{1,t}} = q' = \frac{F_{2,t} \cdot S_{2,t}}{f_{2,t}}$$

soit :

$$(3) \quad F_{2,t} = \frac{S_{1,t} \cdot f_{2,t}}{S_{2,t} \cdot f_{1,t}} \cdot F_{1,t}$$

En utilisant d'autre part la conservativité des effectifs ( $N_{1,t} + N_{2,t} - N_t = 0$ ), le système (1) nous permet d'écrire :

$$(4) \quad g(F_{1,t}) = \frac{C_{1,t} \cdot (M_{1,t} + F_{1,t})}{F_{1,t} \cdot (1 - e^{-(F_{1,t} + M_{1,t})})} + \frac{C_{2,t} \cdot (M_{2,t} + F_{2,t})}{F_{2,t} \cdot (1 - e^{-(F_{2,t} + M_{2,t})})} - \frac{C_t \cdot (M_t + F_t)}{F_t \cdot (1 - e^{-(F_t + M_t)})} = 0$$

avec  $F_{2,t}$  donné par l'équation (3),  $M_{1,t}$ ,  $M_{2,t}$ ,  $C_{1,t}$ ,  $C_{2,t}$  et  $C_t$  connus et  $F_t$  estimé par VPA.

L'équation (4) est résolue numériquement par la méthode hybride proposée par Press *et al.* (1994). Une fois  $F_{1,t}$  déterminé, l'équation (3) est utilisée pour calculer  $F_{2,t}$ . Puis les effectifs  $N_{1,t}$  et  $N_{2,t}$  sont calculés en utilisant les équations des captures par zone du système (1).

Les seuls inconnus qui demeurent sont donc  $T_{12,t}$  et  $T_{21,t}$ . Mais le système (1) n'est toujours pas identifiable, une infinité de couples  $(T_{12,t}, T_{21,t})$  peuvent en être solutions. Il est donc sous-déterminé et doit être réduit (*i. e.* : une relation liant  $T_{12,t}$  à  $T_{21,t}$  doit être trouvée). Pour cela, le mouvement des poissons est supposé comporter deux composantes : une composante diffusive aléatoire et spatialement isotrope  $D_t$  (mouvement brownien) qui ne dépend que de l'âge du poisson et donc du temps  $t$  et une composante advective déterministe et spatialement dirigée  $T'_t$  (Okubo, 1980 ; Deriso *et al.*, 1991 ; Kleiber et Fonteneau, 1994). Les coefficients de migration  $T_{12,t}$  et  $T_{21,t}$  peuvent alors être exprimés de la manière suivante :

$$(5) \quad \text{a} \begin{cases} T_{12,t} = D_t + T'_{12,t} \\ T_{21,t} = D_t \end{cases} \quad \text{ou} \quad \text{b} \begin{cases} T_{12,t} = D_t \\ T_{21,t} = D_t + T'_{21,t} \end{cases}$$

$T'_{12,t}$  et  $T'_{21,t}$  ne pouvant être simultanément supérieurs à 0 puisque l'advection est considérée comme un phénomène homogène et univoque. Les deux inconnus sont donc maintenant :  $(D_t, T'_{12,t})$  ou  $(D_t, T'_{21,t})$ . Dans la présente étude, le coefficient  $D_t$  est supposé soit pouvoir être estimé par des méthodes annexes (Kleiber *et al.*, 1994 ; Porch, 1996), soit négligé devant  $T'_{i,t}$ , soit borné entre deux valeurs limites haute et basse. Les taux de migration à l'âge terminal  $T_{12,T}$  et  $T_{21,T}$  sont supposés égaux aux coefficients de migration au pas de temps précédent :  $T_{12,T-1}$  et  $T_{21,T-1}$ . Pour tout les autres pas de temps, les équations (1) et (9) sont utilisées pour calculer  $T_{12,t}$  et  $T_{21,t}$  :

$$\begin{cases} T_{12,t} = \frac{N_{2,t+1} + N_{2,t} \cdot e^{-(F_{2,t} + M_{2,t})} \cdot (T_{21,t-1})}{N_{1,t} \cdot e^{-(F_{1,t} + M_{1,t})}} \\ T_{21,t} = D_t \end{cases}$$

$CPUE_{i,t} = q' \cdot D_{i,t} = q' \cdot \frac{N_{i,t}}{S_{i,t}} = q_{i,t} \cdot N_{i,t}$  avec,  $N_{i,t}$  les effectifs de la zone  $i$  pendant le pas de temps  $t$ . Cela ne peut être fait au niveau de l'ensemble du stock que sous hypothèse généralement non respectée d'égalité

des densités de toutes les zones à un temps  $t$  donné :  $CPUE_t = \frac{C_t}{f_t} = \frac{\sum_i C_{i,t}}{\sum_i f_{i,t}} = \frac{q' \cdot \sum_i (D_{i,t} \cdot f_{i,t})}{\sum_i f_{i,t}}$ .

Si  $T_{12,t} \leq D_t$  ( $\Leftrightarrow T'_{12,t} \leq 0$  ce qui est impossible par définition) alors ce sont les équations symétriques qui sont utilisées pour calculer  $T_{12,t}$  et  $T_{21,t}$ .

## II. EXEMPLE D'APPLICATION

Le simulateur SHADYS (Maury et Gascuel, présent volume) permet de simuler l'évolution d'une pêcherie spatio-temporellement hétérogène à très fine résolution spatiale et temporelle. Pour tester la méthode de VPA spatiale, les sorties de SHADYS (captures, efforts et effectifs) sont agrégées sur deux grandes zones de tailles différentes et par mois. Les données d'effectifs  $N_{zone, mois}$  qui sont inconnues dans la réalité permettent ici de tester les résultats d'évaluation issus de la VPA spatiale. Les simulations concernent une cohorte sur dix ans (120 mois et 720 pentades) (fig. 1 et 2).

On analyse ainsi la fiabilité des estimations issues de la VPA spatiale dans le cas d'une répartition spatialement hétérogène de la population en fonction de trois éléments :

- le caractère plus ou moins migratoire du stock considéré,
- la capacité de la flottille à pêcher dans les zones de forte densité (qui est mesurée par un taux de déterminisme variant de 0 pour une flottille pêchant de manière totalement aléatoire, à 1 pour une flottille déterministe ne pêchant qu'au point de plus grande densité),
- la méthode retenue pour l'estimation de la surface occupée par chaque sous-stock (soit la surface de répartition des pêcheurs qui est vraisemblablement minorante, soit la surface de chaque boîte qui majore sans doute la surface réellement occupée par le stock).

Les résultats de ces simulations sont rapidement présentés ici sous forme de figures commentées.

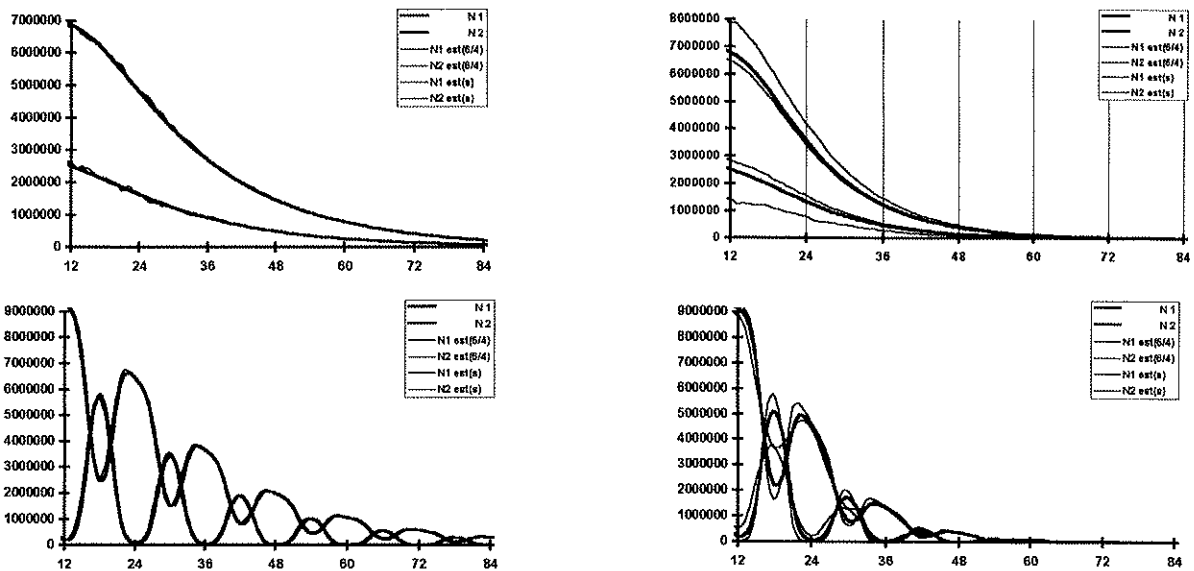


fig. 1 : application de la VPA spatiale à la reconstitution de séries d'abondances issues du simulateur SHADYS . En haut, cas d'un stock non migratoire et en bas, cas d'un stock à migrations saisonnières. A gauche, cas d'une flottille « aléatoire » (les évaluations retrouvent parfaitement la réalité simulée), à droite, une flottille « déterministe » (les évaluations s'éloignent de la réalité simulée). La notation 6/4 désigne l'utilisation des surfaces de chaque boîte et la notation s celle de la répartition de l'effort pour estimer la surface du stock dans chaque zone.

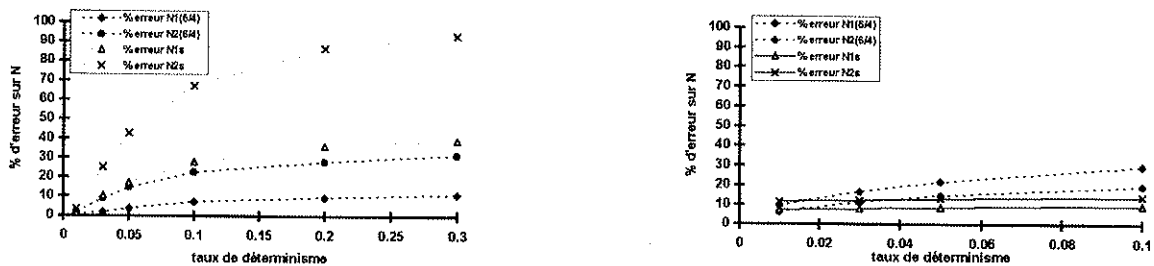


fig. 2 : erreur moyenne commise sur les effectifs estimés en fonction du taux de déterminisme de la flottille (capacité à exploiter les fortes concentrations de poisson) en prenant la surface de l'effort ou la surface de chaque boîte pour estimer la surface du stock dans chaque zone. A gauche, cas d'un stock résident diffusif, à droite, cas d'un stock migratoire.

L'erreur commise sur l'estimation des effectifs est d'autant plus importante que le comportement de la flottille est déterministe, néanmoins les courbes tendent vers un plateau. Selon les cas envisagés, la meilleure méthode d'estimation des surfaces est soit la surface des boîtes, soit celle de la distribution de l'effort. Dans tous les cas, ces deux méthodes permettent de borner la réalité.

### III. DISCUSSION

Les CPUE des navires commerciaux ne sont en général pas liées à l'abondance du stock par une simple relation de proportionnalité. Les phénomènes entraînant une non linéarité de la relation liant les CPUE à l'abondance sont nombreux et relativement bien connus. Ils sont généralement attribués à la distribution spatiale hétérogène de la ressource et au comportement de recherche des pêcheurs (Clark *et al.*, 1979 ; Hilborn et Walters, 1987 ; Hilborn et Walters, 1992 ; Gauthiez, 1997). Beaucoup moins étudiées sont leurs conséquences sur l'hétérogénéité spatiale de la capturabilité par âge  $q_i$  et plus particulièrement les différences de capturabilité par unité de surface  $q'_i$  à un temps  $t$  donné entre différentes zones données.

La capturabilité  $q'_i$  est en général variable avec l'abondance du stock et ses variations sont densité-dépendantes et fonction du comportement des pêcheurs (Hilborn et Walters, 1992 ; Gauthiez, 1997). La densité des poissons étant spatialement variable, la capturabilité  $q'_{z,t}$  est également spatialement variable. Ces aspects ne sont pas abordés ici dans le détail mais il est important de garder à l'esprit les conséquences potentielles du non respect de l'hypothèse d'homogénéité spatiale de  $q'_{z,t}$ . Dans le cas idéal d'une flottille pêchant de manière aléatoire sur tout le stock, cette hypothèse ne pose pas de problèmes particuliers : les prises par unité d'effort par zones  $CPUE_{t,z}$  tendent à être proportionnelles à l'abondance par zone  $N_{t,z}$  (à la surface près). A l'inverse, dans le cas d'une flottille utilisant une stratégie de recherche des fortes concentrations de poissons, les  $CPUE_{t,z}$  par zones ne vont plus être proportionnelles à  $N_{t,z}$  mais à  $D_{t,z}$  la densité moyenne des concentrations de poissons ou la densité de la plus forte concentration de poissons si les bateaux sont capables de la localiser. Trois cas sont alors à distinguer :

- ① Le stock est parfaitement homogène à toutes les échelles spatiales d'observation. Les PUE locales sont alors proportionnelles à l'abondance locale.
- ② Le stock est spatialement hétérogène à différentes échelles spatiales d'observation et la densité des concentrations augmente à surface constante quand l'abondance augmente. Les PUE locales restent proportionnelles à l'abondance locale.
- ③ Le stock est spatialement hétérogène à différentes échelles spatiales d'observation et la surface des concentrations augmente à densité constante quand l'abondance augmente. Les PUE locales ne sont plus proportionnelles à l'abondance locale ce qui risque d'entraîner des biais dans l'évaluation.