

CHAPITRE 9

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES MODÈLES GLOBAUX POUR L'ÉTUDE DES POPULATIONS MARINES EXPLOITÉES

Francis Laloë
*Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération (ORSTOM)*
213, rue de la Fayette
75480 Paris CEDEX 10
France

9.1 INTRODUCTION

Une population peut être décrite de nombreuses manières. Même en ne s'intéressant qu'à sa biomasse, ou à son effectif, on pourra chercher à connaître ces quantités pour chaque classe d'âge ou pour l'ensemble des classes d'âges, ou encore pour la réunion d'un certain nombre d'entre elles, par exemple celle des poissons en âge d'être capturés.

Lorsque, pour décrire et comprendre l'exploitation d'un stock de poissons par une pêche, on ne dispose que de données sur l'activité de cette pêche et sur les captures réalisées, sans aucune information sur l'âge des poissons capturés, il apparaît logique de recourir à des modèles décrivant l'état du stock exploité par une seule quantité, la biomasse des poissons en âge d'être capturés.

À titre d'exercice, on peut «construire» un tel modèle.

Soit B_t la biomasse du stock au temps t .

Cette valeur est susceptible de se modifier sous l'influence de plusieurs facteurs, à savoir:

1. la croissance individuelle des poissons;
2. l'arrivée de nouveaux poissons en âge d'être pêchés;
3. la mortalité naturelle (c'est-à-dire toute mortalité non provoquée par la pêche);
4. la mortalité par pêche.

Les trois premières sources de modifications peuvent s'exprimer en l'absence d'activité de pêche. On peut donc tenter de les résumer par une fonction dans laquelle la pêche n'exerce pas d'influence. On peut supposer que la mortalité naturelle provoquera une diminution d'autant plus élevée de biomasse que celle-ci sera importante (c'est-à-dire que les poissons sont en grand nombre). Il en est de même pour l'augmentation due à la croissance des individus. Le nombre de poissons arrivant en âge d'être pêchés est quant à lui non forcément lié de la même façon à la biomasse, à moins de supposer une très forte

Remyplace ex Perdu
O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 37885 ex 1
Cote : B

27 AOUT 1993

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 37885, ex 2
Cote : B

relation positive entre recrutement et biomasse. On peut néanmoins supposer dans un premier temps que les modifications de biomasse seront proportionnelles à celle-ci.

On peut alors proposer, en l'absence de pêche, une équation décrivant la modification de biomasse au cours du temps s'écrivant:

$$dB_t/dt = HB_t$$

où H = coefficient de modification de biomasse

Toutefois, une telle équation ne peut rendre compte de la réalité, car la biomasse s'éteindrait ou deviendrait infinie, selon que H est une quantité négative ou positive.

On peut introduire l'idée selon laquelle, en l'absence de pêche, il existe une certaine quantité stable de biomasse qu'on notera B_e et qui est généralement appelée «biomasse vierge». Dans ce cas, lorsque $B_t = B_e$, il n'y a pas de changement de biomasse et la valeur dB_t/dt doit donc être nulle, ce qu'on peut imposer en supposant que la variation de biomasse sera proportionnelle à $(B_t - B_e)$. On peut alors écrire:

$$dB_t/dt = H(B_t - B_e)$$

où encore:

$$(1/B_e) dB_t/dt = H(B_t/B_e - 1)$$

Avec cette formulation et à condition que la quantité H soit négative, la production est positive lorsque la biomasse est inférieure à la valeur à l'équilibre B_e et négative dans le cas contraire; la valeur B_e correspond alors à une situation d'équilibre «stable». De plus, le taux de variation de biomasse sera d'autant plus élevé que la biomasse est éloignée de sa valeur à l'équilibre.

La diminution de biomasse provoquée par l'activité de pêche sera d'autant plus importante que la biomasse est élevée (le nombre de poissons susceptibles d'être capturés est plus grand) et que l'activité de pêche est forte (chaque poisson a plus de «risque» d'être capturé).

On peut donc supposer que la diminution de biomasse due à la pêche sera proportionnelle au produit de la biomasse et de l'«intensité» de la pêche qu'on notera f_t . La réunion dans la même formule des sources de variation de la biomasse conduit à l'écriture du modèle:

$$\frac{dB_t/dt}{\text{production}} = \frac{HB_t(B_t - B_e)}{\text{capture}} - qf_t B_t \quad [9.1]$$

Le coefficient de proportionnalité q est appelé «capturabilité». Il peut être interprété comme la probabilité qu'une unité de biomasse soit capturée lorsqu'une unité d'effort est déployée (voir Chapitre 6).

Les deux autres paramètres de ce modèle sont la biomasse vierge B_e (parfois appelée biomasse maximale et notée $B_{\max}$ ou B_m) dont nous avons déjà discuté la nature, et «H» dont la valeur, négative, participe à la détermination de la quantité de biomasse produite, et donc à la vitesse de retour à l'équilibre lorsque celui-ci n'est pas réalisé; la valeur absolue de H sera en général d'autant plus élevée que la longévité de l'espèce est courte.

La formulation 9.1 est connue sous le nom de modèle de Graham-Schaefer, (Graham, 1935; Schaefer 1954, 1957), ou, plus communément, *modèle de Schaefer*. On peut constater que l'équation 9.1 peut s'écrire sous la forme:

$$dB_t/dt = aB_t^2 + bB_t \quad [9.2]$$

où

$$a = H$$

$$b = -HB_e - qf_t$$

ce qui représente l'équation d'une parabole qui s'annule pour les valeurs de biomasse suivantes: $r_1 = -b/a$ et $r_2 = 0$.

On peut vérifier que la valeur de r_1 est positif lorsque f_t est inférieur à $-HB_e/q$.

Lorsque f_t est constant et inférieur à $-HB_e/q$, l'intégration de l'équation 9.2 conduit à une fonction bien connue sous le nom de «courbe» logistique, dont une représentation graphique est fournie par la figure 9.1.

On a:

$$\log(B_t - r_1) - \log(B_0 - r_1) = a(r_1 - r_2)t + \gamma$$

où

$$\gamma = \log(B_0 - r_1) - \log(B_0 - r_2)$$

B_0 étant la biomasse au temps $t=0$.

Lorsque B_t varie de 0 à $-(b/a)$ (équation 9.2), on obtient

$$B_t = -(b/a) \frac{1}{1 + e^{-(a(r_1 - r_2)t + \gamma)}}$$

Nous verrons dans le prochain chapitre l'intérêt d'une adaptation de l'équation 9.2 incluant un terme constant c:

$$dB_t/dt = aB_t^2 + bB_t + c$$

Le modèle de Schaefer a été généralisé par Pella et Tomlinson (1969) qui ont adapté le terme décrivant la production, en introduisant un paramètre m tel que:

$$dB/dt = HB(B^{m-1} - B_e^{m-1}) - qfB \quad [9.3]$$

Lorsque $m=2$, on retrouve l'expression du modèle de Schaefer; lorsque m tend vers 1, le modèle tend vers le modèle logarithmique proposé par Garrod (1969) et Fox (1970):

$$dB/dt = HB(\log(B) - \log(B_e)) - qfB \quad [9.4]$$

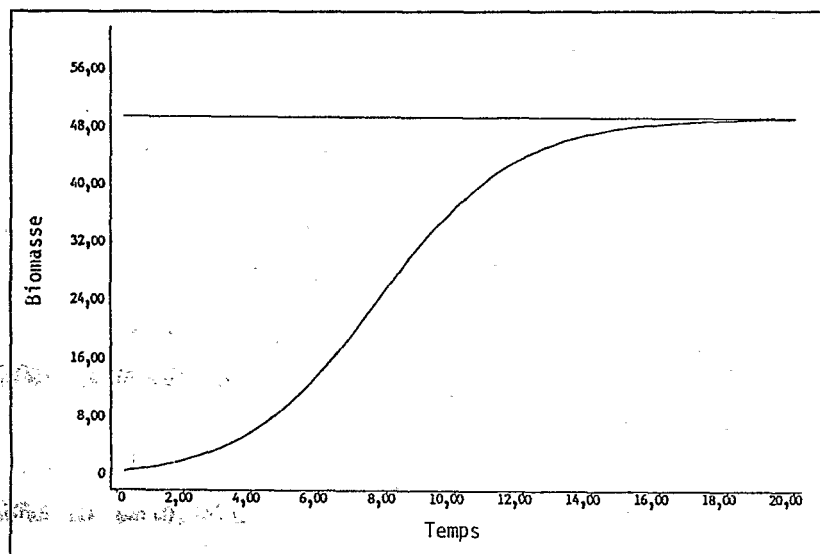


Figure 9.1 Évolution vers l'état d'équilibre d'une biomasse selon une loi logistique.

Cette généralisation permet d'assouplir le modèle et de prendre en considération les cas où la formule de Schaefer sous-estime la production lorsque la biomasse est réduite, ce qui peut par exemple se produire lorsque le recrutement est peu lié, voire pas du tout, à la biomasse.

Ces formulations constituent ce qu'on peut appeler les modèles globaux «classiques». Elles supposent que production et captures sont des fonctions de la biomasse B , ce qui introduit une hypothèse de proportionnalité entre biomasse productive et biomasse exploitée.

9.2 ÉTUDE DES RELATIONS À L'ÉQUILIBRE

Lorsque l'effort de pêche reste constant et inférieur à $-HB_e/q$, on vérifie aisément à partir de l'équation 9.2 que la biomasse tend vers la valeur $-b/a$, soit $B_e + qf/H$, constituant une valeur d'équilibre stable. La vitesse de convergence vers cet équilibre dépend entre autres de la valeur du paramètre H , dont l'interprétation peut être reliée à la mortalité naturelle si on considère que l'équilibre est plus vite atteint pour une espèce de durée de vie courte que pour une espèce de durée de vie longue.

Cette stabilisation de la biomasse est un résultat très important car si on peut fixer l'effort à un niveau donné, entre autres par des mesures d'aménagement, la capture et le rendement vont également se stabiliser. L'étude des relations à l'équilibre entre capture et effort et entre rendement et effort est donc essentielle.

Lorsque l'équilibre est atteint, pour un niveau d'effort donné, la valeur dB/dt est nulle. Avec le modèle de Schaefer, on a donc:

$$dB/dt = 0 = HB(B - B_e) - qfB$$

soit

$$HB(B - B_e) = qfB$$

en divisant par B (qui est non nul puisqu'il y a des captures) on obtient:

$$HB - HB_e = qf$$

soit

$$B = B_e + (q/H)f \quad [9.5]$$

La biomasse à l'équilibre est donc une fonction simple de l'effort; il s'agit d'une droite d'ordonnée à l'origine B_e et de pente q/H (négative puisque H est négatif). On considérera que la biomasse à l'équilibre est nulle si l'effort est plus grand que $-(B_e H/q)$.

La prise par unité d'effort (PUE) à l'équilibre étant égale à qB ,

$$PUE = q(B_e + (q/H)f)$$

Il s'agit, là encore, de l'équation d'une droite de pente négative q^2/H et d'ordonnée à l'origine qB_e .

La capture à l'équilibre est égale à:

$$q/B = q/B_0 + (q^2/H)^2$$

Il s'agit donc d'une parabole qui s'annule pour $f=0$ ou $f=-(B_0H/q)$. La prise maximale équilibrée (PME) est obtenue pour un niveau d'effort noté $f_{PME}=-(B_0H/q)/2$, et vaut alors:

$$PME = -HB_0^2/4 \quad [9.6]$$

Lorsque l'équilibre est atteint pour $f=f_{PME}$, on vérifie sans difficulté que $B=B_0/2$.

À l'équilibre, en notant la mortalité par pêche $F=qf$, on obtient pour $f=f_{PME}$:

$$PME = F_{PME}B = F_{PME}B_0/2 = -HB_0^2/4 \quad [9.7]$$

et donc

$$F_{PME} = -HB_0/2$$

La valeur HB_0 est généralement notée K (dans le cas du modèle généralisé, $K=HB_0^{m+1}$ et $K=H \log(B_0)$ lorsque $m=1$). On peut ainsi relier le paramètre H à la mortalité par pêche «optimale» et si on reprend, avec le modèle de Schaefer, la formule de Gulland (1971):

$$PME = 0,5MB_0 \quad [9.8]$$

implique que la mortalité naturelle M est égale à F_{PME} , on obtient:

$$F_{PME} = M = -HB_0/2 \quad [9.9]$$

Cette formulation est discutable, mais elle fait apparaître la relation entre le paramètre H et la mortalité naturelle.

Dans le cas du modèle généralisé de Pella et Tomlinson, la biomasse à l'équilibre s'écrit:

$$B = \left(B_0^{(m-1)} + (q/H)f \right)^{1/(m-1)} \quad [9.10]$$

dont on peut déduire les relations entre prise et effort et entre PUE et effort.

Diverses courbes à l'équilibre entre PUE et effort et entre prises et effort sont présentées dans les figures 9.2 et 9.3 pour certaines valeurs de m .

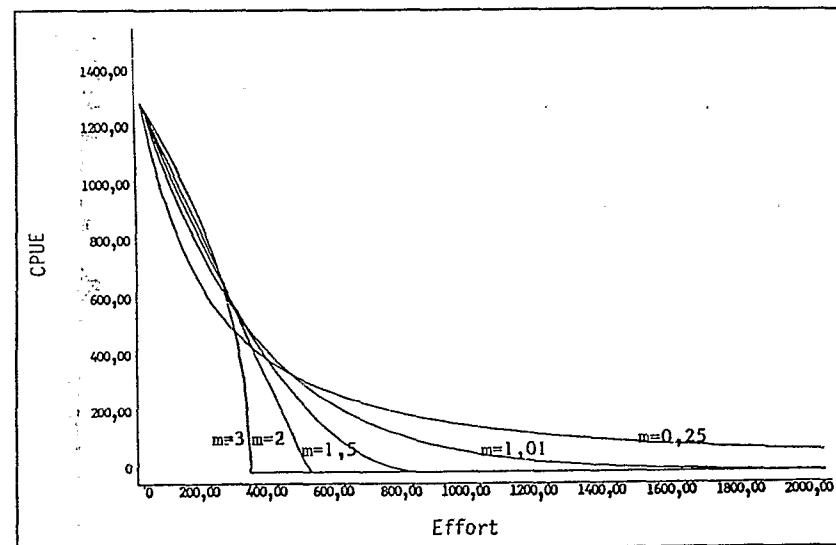


Figure 9.2 Forme des relations à l'équilibre entre PUE et effort pour différentes valeurs de m dans un modèle global généralisé.

La PME a été considérée dans le passé comme l'objectif à atteindre, ce qui impliquait que des mesures d'aménagement devaient être prises en conséquence pour approcher la valeur d'effort correspondante. Cette attitude apparaît à présent très contestable pour deux raisons principales (voir, par exemple, Larkin, 1977, et Sissenwine, 1978).

- La production maximale à l'équilibre n'est pas nécessairement «la» situation optimale. Il convient de considérer également la rentabilité des unités de pêche, les capacités d'écoulement de la production, etc. Ces considérations ont conduit à définir d'autres objectifs tels que la *production économique maximum* (PEM ou, en anglais, MEY, Maximum Economic Yield) ou la *production optimale à l'équilibre* (POE ou, en anglais, OSY, Optimum Sustainable Yield) intégrant des considérations «sociales» en plus de celles d'ordres biologique ou économique.
- Les modèles globaux sont des modèles «déterministes» et ne tiennent donc pas compte du fait que la production peut dépendre d'autres éléments que ceux figurant dans leur formulation, comme les conditions de milieu. Il se peut que l'impact négatif des «mauvaises années» soit plus important que l'impact positif des «bonnes années» et que la valeur PME ne puisse être maintenue sur une période assez longue. Ceci a conduit à la notion de «capture maximum moyenne» (en anglais MAY, Maximum Average Yield, [voir, par exemple, Sissenwine, 1978]), représentant la capture la plus élevée qu'on peut attendre «en moyenne», qui peut donc être inférieure à la PME et faire préconiser des valeurs d'effort plus faibles que la valeur « f_{PME} », par exemple deux tiers de f_{PME} .

À l'heure actuelle, les paramètres PME et f_{PME} sont donc considérés plus simplement comme parties des connaissances utiles pour l'aménagement des pêcheries.

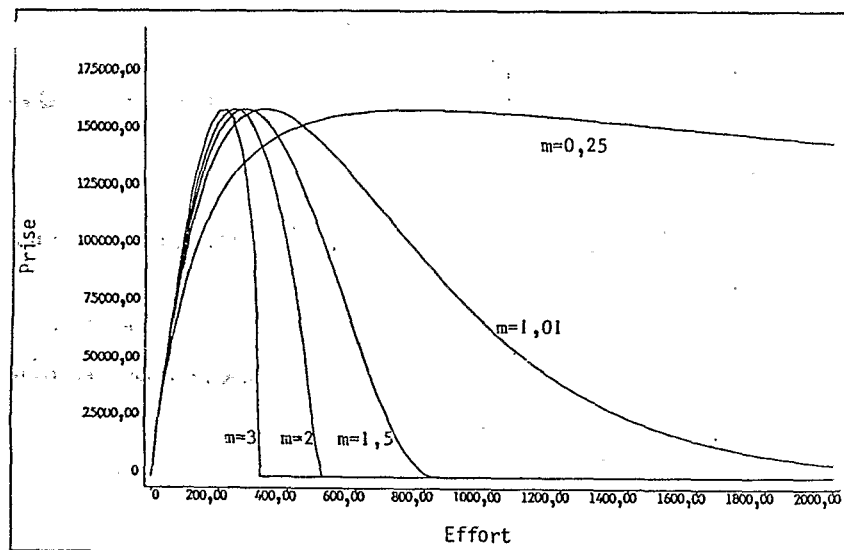


Figure 9.3 Forme des relations à l'équilibre entre prise et effort pour différentes valeurs de m dans un modèle global généralisé.

Si la connaissance des relations à l'équilibre est essentielle, il faut convenir que pour l'étude concrète d'une pêche donnée, l'état d'équilibre n'est que rarement atteint. On devra donc tenir compte des situations de déséquilibre dans l'ajustement des modèles.

9.3 APPLICATIONS PRATIQUES

9.3.1 Modèle de Schaefer

Le modèle de Schaefer, tel que défini par l'équation 9.2, décrit l'évolution de la production du stock en fonction de sa biomasse. Or, dans la réalité, on dispose rarement de données permettant d'utiliser directement cette équation. On cherchera donc à réécrire ce modèle à partir de données disponibles. On a déjà vu que l'on pouvait supposer une relation linéaire entre la capture (Y) et la biomasse moyenne (voir Chapitre 6):

$$Y = qfB$$

d'où

$$B = (1/q)(Y/f) = (1/q)U$$

En substituant à B sa valeur dans l'équation 9.2 et après réarrangement on obtient:

$$Y_e = bU(U_0 - U) \quad [9.11]$$

et (à rapprocher de l'équation 9.5):

$$U = U_0 - (1/b)f \quad [9.12]$$

où: Y_e = capture à l'équilibre, en poids
 f = effort de pêche
 U = prise par unité d'effort
 U_0 = prise par unité d'effort sur la biomasse vierge B_0
 b = constante ($b = H/q$).

La combinaison des équations 9.11 et 9.12 permet une formulation plus intéressante du modèle, décrivant l'évolution des captures en fonction de l'effort:

$$Y_e = f(U_0 - (1/b)f) \quad [9.13]$$

Selon cette formulation, les captures sont nulles pour $f=0$ et $f=b U_0$.

On en déduit donc que:

$$f_{PME} = bU_0/2 \quad [9.14]$$

$$PME = bU_0^2/4 \quad [9.15]$$

Si l'on connaît, pour une série d'années, la capture et l'effort correspondant, il est possible de construire un modèle global et d'en calculer les paramètres principaux. La première opération consistera à tracer la droite représentant la relation entre la PUE et l'effort (équation 9.12), à partir de laquelle on définit U_0 , ordonnée à l'origine, et $(1/b)$, pente de la droite. On peut ainsi tracer la parabole représentée par l'équation 9.13.

9.3.2 Modèle exponentiel de Fox

Le modèle de Schaefer suppose une relation linéaire, de pente négative, entre la biomasse exploitée (ou son indice que représente la PUE) et l'effort de pêche. Dans la pratique, on peut observer que la courbe d'équilibre présente une concavité dirigée vers le haut. Fox (1970) a donc proposé d'utiliser une fonction exponentielle qui s'exprime sous la forme (voir équation 9.4):

$$B = B_0 e^{-(1/H)f}$$

Comme pour le modèle de Schaefer, on peut utiliser les données de capture et d'effort:

$$U = U_0 e^{-Hf} \quad [9.16]$$

Pour construire le modèle, on calcule la droite de régression:

$$\ln U = \ln U_0 - bf = a - bf \quad [9.17]$$

d'où

$$Y_e = f e^{af} e^{-bf} \quad [9.18]$$

$$f_{PME} = 1/b \quad [9.19]$$

$$PME = e^{(a-1)/b} \quad [9.20]$$

9.3.3 Modèle généralisé

On n'entrera pas ici dans les détails de calcul puisqu'ils nécessitent l'utilisation d'ordinateurs. On notera simplement que le modèle peut s'écrire, en fonction de f et de U , sous la forme:

$$U = \left(U_0^{(m-1)} - bf \right)^{1/(m-1)}$$

$$Y_e = f \left(U_0^{(m-1)} - bf \right)^{1/(m-1)}$$

9.4 AJUSTEMENT DES MODÈLES GLOBAUX

La situation la plus simple est celle où la pêche est passée par plusieurs états d'équilibre correspondant à des niveaux d'efforts différents. Il suffit alors de porter sur un graphe les données d'efforts et PUE et de tracer, si on utilise un modèle de Schaefer, une droite passant par ces points. S'il y a plus de deux points, on pourra utiliser une régression pour calculer les paramètres de la droite.

Cette méthode est donnée pour mémoire car l'observation de plusieurs états d'équilibre est, rappelons-le, exceptionnelle. La figure 9.4 indique bien la difficulté qu'engendre l'interprétation des résultats obtenus pour une pêche en déséquilibre. Sur cette figure, partant d'une situation d'équilibre (point A) pour un niveau d'effort f_1 , on observe qu'une augmentation d'effort à un niveau f_2 , entraîne, dans

un premier temps, un fort accroissement des captures (point B). Le maintien de l'effort se traduit par une diminution de la biomasse, et donc une diminution des captures, vers la nouvelle situation d'équilibre (point D) avec une étape de transition (point C). Il se produit également une chute des rendements, pouvant conduire à un retour vers le niveau d'effort f_1 ; la valeur réduite de la biomasse entraîne alors de faibles captures (point E) avant le retour vers l'équilibre correspondant à l'effort f_1 (points F et A).

Il apparaît alors que la simple observation des points A, B, C, D, E, F ne permet pas de représenter directement la relation réelle à l'équilibre.

Lorsqu'on ne peut supposer que l'équilibre est réalisé, deux approches sont utilisables pour l'estimation des paramètres des modèles. On peut suivre l'évolution de la biomasse, et donc des captures et PUE, en intégrant l'équation différentielle. Nous décrivons ici la seconde approche qui consiste à modifier les valeurs d'efforts pour se rapprocher des conditions d'équilibre.

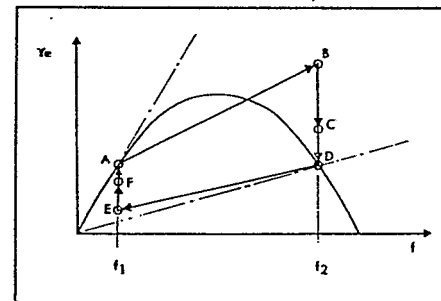


Figure 9.4 Captures équilibrées et captures de transition dans un modèle de Schaefer (Laurec et Le Guen, 1981).

Le trajet de A à D correspond à la réaction de la pêche à une augmentation de l'effort.

Le trajet de D à A correspond à la réaction de la pêche à une réduction de l'effort.

Le tableau 9.1 donne les résultats des 10 premières années d'une pêcherie (simulée) exploitant un stock dont la dynamique est régie par un modèle de Schaefer et dont les paramètres ont les valeurs suivantes:

$$H = -0,001 \quad B_0 = 1000 \quad q = 0,005$$

On a donc:

$$f_{PME} = -(HB_v)/(2q) = 100$$

et

$$PME = f_{PME} q (B_v/2) = 250$$

La valeur à l'équilibre de la biomasse s'annule pour $f=200$.

La colonne 2 du tableau 9.1 donne les efforts déployés annuellement; aux colonnes 3, 4 et 5 figurent respectivement les captures et PUE réalisées et les biomasses moyennes présentes au cours de chaque année. Les PUE et efforts ont été portés, avec la relation à l'équilibre, sur la figure 9.5, et la figure 9.6 présente les mêmes informations concernant les prises et les efforts.

Tableau 9.1 Résultats d'une pêcherie simulée pour une population régie par un modèle de Schaefer.
 $B_v = 1000$, $H = 0,001$, $q = 0,005$.

Période	Effort	Prise	PUE	Biomasse moyenne
1	50	229	4,6	915
2	75	293	3,9	782
3	100	333	3,3	667
4	150	400	2,7	534
5	175	354	2,0	404
6	175	280	1,6	320
7	125	189	1,5	302
8	50	96	1,9	382
9	50	128	2,6	514
10	125	330	2,6	528

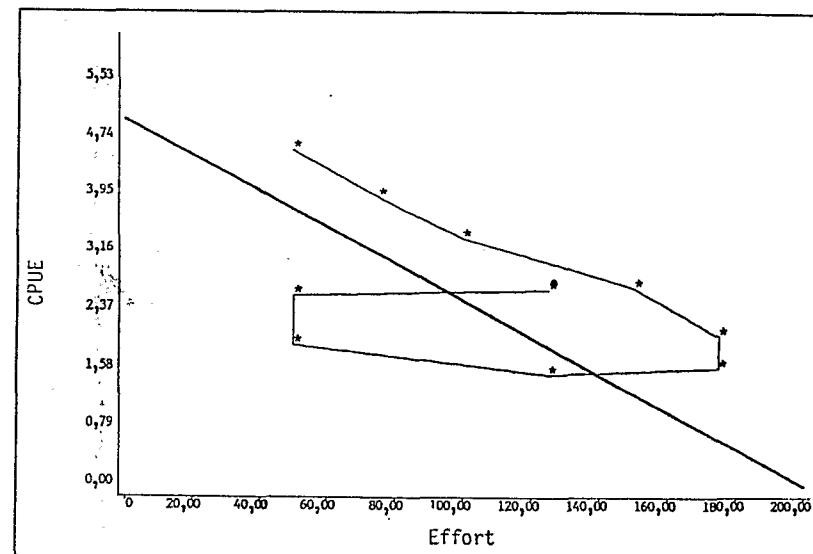


Figure 9.5 PUE et efforts observés (*) et relation à l'équilibre (en trait gras) pour la pêcherie simulée.

Au début de la première année, la biomasse était égale à B_v . À la fin de cette année, cette biomasse était réduite, mais restait supérieure ou égale à la valeur d'équilibre relevant de l'effort déployé. La PUE observée correspond donc à une biomasse (la biomasse moyenne donnée en colonne 5 du tableau 9.1) plus grande que cette valeur d'équilibre. Connaissant cette biomasse moyenne B_m on peut ici calculer la valeur de l'effort qui «l'équilibrerait», en reprenant la formule 9.5:

$$B_m = B_v + (q/H)f$$

d'où

$$f = (H/q)(B_m - B_v)$$

Les valeurs d'efforts «à l'équilibre» ont été ainsi calculées pour chacune des 10 années. Elles figurent dans la colonne 3 du tableau 9.2, les efforts réellement appliqués ayant été repris en colonne 2 de ce tableau.

On constate que l'effort à l'équilibre de l'année 1 est inférieur à l'effort appliqué. Ceci apparaît normal puisque les efforts étaient nuls les années précédentes et qu'en conséquence, la biomasse était à un niveau élevé. Ce résultat se retrouve tant que l'effort va en augmentant. Lorsque l'effort diminue, il est possible qu'il devienne inférieur à l'effort à l'équilibre puisque les efforts plus importants des années précédentes ont réduit la biomasse. Les efforts à l'équilibre dépendent donc des efforts de l'année courante et des années précédentes. Si la phase exploitée de la population (c'est-à-dire la différence d'âge entre les poissons les plus âgés et les plus jeunes dans les captures) est de N années, on peut

supposer qu'à un moment donné, les efforts accomplis il y a plus de N années n'ont plus d'influence sur l'état de la biomasse.

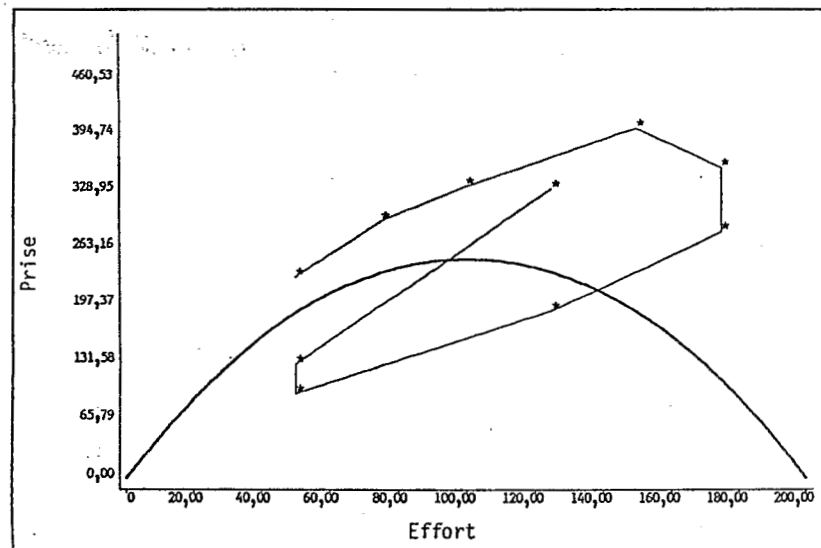


Figure 9.6 Prises et efforts observés (*) et relation à l'équilibre (courbe en trait gras) pour la pêche simulée.

L'effort à l'équilibre peut donc être approché par une moyenne pondérée des efforts de l'année courante et des N années précédentes. En considérant qu'un poisson passe en moyenne T années dans la phase exploitée, Gulland (1971) propose d'estimer l'effort à l'équilibre par la moyenne des T derniers efforts, en choisissant T comme l'entier le plus proche de N/2. On obtient donc:

$$\bar{f}_i = \frac{1}{T} \sum_{k=i-T+1}^i f_k \quad [9.22]$$

Fox (1974) propose un calcul différent. Il prend en compte le fait que les poissons ont passé d'autant plus de temps dans la phase exploitée qu'ils sont plus âgés et qu'en conséquence, au cours d'une année i, la proportion de poissons ayant un «souvenir» des efforts d'une année i-j diminue lorsque j augmente. Il utilise donc une moyenne pondérée:

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{k=i-1}^i (p_k f_k)}{\sum_{k=i-N+1}^i p_k} \quad [9.23]$$

où les poids p_k sont définis par:

$$P_i = N, P_{i-1} = N-1, \dots, P_{i-N+1} = 1$$

Dans l'exemple simulé choisi ici, on supposera que la phase exploitée est de trois années; les efforts à l'équilibre calculés à l'aide des formules de Fox (N=4) et de Gulland (T=3) sont donnés dans les colonnes 4 et 5 du tableau 9.2.

Les PUE et efforts à l'équilibre calculés par la méthode de Gulland ont été portés sur la figure 9.7 (la représentation des données obtenues en appliquant la méthode de Fox conduirait à une figure semblable). Un premier examen «à vue» indique que les points sont beaucoup plus proches de la relation «vraie» à l'équilibre en utilisant ces efforts plutôt que ceux réellement appliqués. On peut utiliser les points portés sur la figure 9.7 pour estimer les caractéristiques des relations entre PUE et effort et entre captures et efforts. Ceci peut être fait par un ajustement «à vue» ou bien par une régression linéaire dont le résultat a également été porté sur la figure 9.7.

Tableau 9.2 Efforts appliqués, efforts théoriques «équilibrés» et approximations de ces derniers par les méthodes de Fox et Gulland.

Période	Effort	Effort théorique	Effort «Fox»	Effort «Gulland»
1	50	17	20	17
2	75	44	45	42
3	100	67	73	75
4	150	93	110	108
5	175	119	143	142
6	175	136	163	167
7	125	140	153	158
8	50	124	110	117
9	50	97	78	75
10	125	94	88	75

Les calculs ont été menés jusqu'ici pour l'ajustement de modèles de Schaefer et peuvent être faits sans difficulté avec une calculatrice. L'ajustement de modèles généralisés (n différent de 2, voir formule 9.3) entraîne des calculs plus longs et peuvent être conduits sur micro-ordinateur à l'aide de programmes existants tels que «PRODFIT» (Fox, 1975).

Le présent chapitre est suivi d'exercices reprenant, sur un autre jeu de données, les étapes décrites précédemment. Les diverses hypothèses nécessaires pour que l'utilisation d'un modèle global soit pertinente doivent être évoquées dans ce chapitre, même si ce n'est que rapidement.

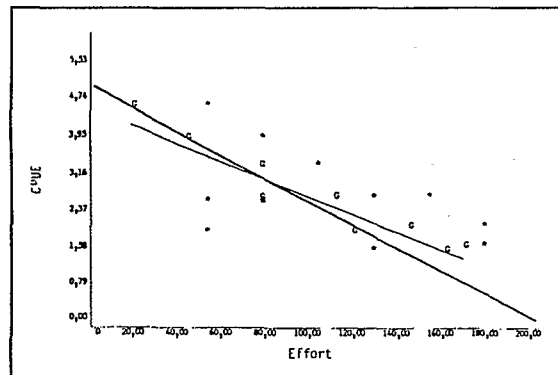


Figure 9.7 PUE en fonctions des efforts réels (*) ou calculés par la méthode de Gulland (G). Relation estimée PUE-effort à l'équilibre (trait fin), et relation réelle (trait plein).

9.5 HYPOTHÈSES REQUISES

Laurec et Le Guen (1981) font une revue des hypothèses requises pour l'utilisation des modèles globaux, en indiquant qu'il convient de distinguer les hypothèses relatives à la définition du modèle de celles dont relèvent les possibilités d'estimation des paramètres (Fox, 1974). Ils séparent également les hypothèses faites selon qu'on se trouve en situation d'équilibre ou de transition.

En situation d'équilibre, on suppose qu'à chaque niveau d'effort qui peut être décrit par une quantité «f», correspondent une capture et un rendement stable. Il suffit donc de rechercher des relations entre ces quantités et le descripteur de l'effort. La souplesse offerte par le modèle généralisé de Pella et Tomlinson est alors très appréciable et permet de rendre compte de situations très variées, même si l'est délicat de les interpréter à partir de considérations biologiques.

Une difficulté majeure réside dans l'hypothèse selon laquelle le modèle reste lui-même stable. Ainsi Laurec et Le Guen insistent-ils sur le fait qu'à chaque diagramme d'exploitation correspond un modèle particulier de même qu'une relation prédateur-proie se modifie lorsque le prédateur change.

En situation de déséquilibre, le modèle doit décrire, en plus des valeurs de capture et de rendement vers lesquelles tendraient ces quantités si l'effort restait constant, la façon dont cette convergence se réalise. On décrit donc deux choses différentes, et la nature des données généralement disponibles ne permet

guère de bien décrire ces deux aspects. Pour cette raison, il est pratiquement impossible d'établir un «classement» des méthodes d'ajustement des modèles globaux en période de transition.

Pour effectuer des ajustements, il convient de disposer de «bonnes» données d'effort et de PUE. Il n'est pas absolument indispensable que les données d'effort soient proportionnelles à la mortalité par pêche, mais il est nécessaire qu'elles soient fonction croissante de cette dernière. L'estimation des données d'efforts est probablement l'un des aspects les plus importants et les plus délicats de l'approche globale, aspect qui conditionne largement son efficacité. En effet, les caractéristiques bioécologiques de la ressource, la nature de la pêcherie ou des pêcheries et la qualité des données disponibles imposent des étapes très délicates, parfois infranchissables, de mise en forme des valeurs d'efforts et des prises et rendements estimés, qui sont des étapes décrites dans d'autres chapitres de ce manuel.

La validité des modèles et la possibilité d'en estimer les paramètres doivent être discutées au cours de chaque utilisation. Il se peut alors que des particularités d'une pêcherie ou de la ressource qu'elle exploite conduisent à adapter certains aspects de l'approche globale «classique»; le chapitre 10 sera consacré à une description de «variantes» du modèle global.

9.6 RÉFÉRENCES

- Fox, W.W., 1970. An exponential surplus yield model for optimizing exploited fish population. *Trans. Am. Fish. Soc.* 99 (1): 80-88.
- Fox, W.W., 1974. An overview of production modeling. ICCAT workshop on tuna population dynamics, Nantes, France, 1974. *Rec. Doc. Scient. CICTA III*: 142-156.
- Fox, W.W., 1975. Fitting the generalized stock-production model by least square and equilibrium approximation. *Fish. Bull. U.S.* 73 (1): 23-37.
- Garrod, D.J., 1969. Empirical assessments of catch effort relationship in the North Atlantic cod stocks. *ICNAF Res. Bull.* 6: 26-34.
- Graham, M., 1935. Modern theory of exploiting a fishery, and application to North Sea trawling. *J. Cons. Int. Perm. Explor. Mer* 10 (2): 264-274.
- Gulland, J.A., 1969. Manuel d'évaluation des stocks d'animaux aquatiques. Première partie: analyse des populations. *Man. FAO Sci. Halieut.* 4: 160 p.
- Gulland, J.A., 1971. *The fish resources of the oceans*. FAO/Fishing News (books), Surrey: 255 p.
- Larkin, P.A., 1977. An Epitaph for the Concept of Maximum Sustainable Yield. *Trans. Am. Fish. Soc.* 106 (1): 1-11.
- Laurec, A. et J.C. Le Guen, 1981. Dynamique des populations marines exploitées. *Publ. CNEOX (France), Rapp. sci. tech.* 45: 117 p.
- Pella, J.J. et P.K. Tomlinson, 1969. A generalized stock production model. *Bull. Int. Amer. Trop. Tuna Comm.* 13: 419-496.
- Schaefer, M.B., 1954. Some aspects of the dynamics of population important to the management of the commercial marine fisheries. *Bull. Int. Amer. Trop. Tuna Comm.* 1 (2): 26-56.
- Schaefer, M.B., 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Bull. Int. Amer. Trop. Tuna Comm.* 2 (6): 247-285.
- Sissenwine, M.P., 1978. Is MSY an adequate foundation for Optimum Yield? *Fisheries* 3 (6): 22-24 et 37-42.

9.6 EXERCICES

9.6.1 Exercice 1

Le tableau 9.3 présente les données d'effort de captures et de 10 années pour une population théorique, qui a été simulée pour observer l'évolution d'une pêcherie sans contrôle dans un contexte «idéal». Effort et captures sont indiqués en unités arbitraires.

Tableau 9.3 Données d'effort et de capture pour une population simulée,

Année	Effort	Captures
1	10	96
2	40	332
3	90	527
4	110	404
5	110	270
6	75	158
7	25	69
8	25	103
9	40	203
10	75	35

- Effectuer les calculs préliminaires pour l'utilisation d'un modèle de surplus de production.
- Faire le graphique des captures en fonction des efforts de pêche et celui des PUE en fonction des efforts.

En utilisant les efforts annuels, estimer les paramètres PME (Prise maximum équilibrée) et f_{PME} en supposant que la dynamique de la population suit un modèle de Schaefer.
- Appliquer la méthode de Gulland de recherche des efforts équilibrés, en considérant que la durée de la phase exploitée est de cinq années. On pose ici, par définition, que les efforts antérieurs à l'année 1 étaient nuls. Refaire les représentations graphiques avec les nouvelles données d'effort. Recalculer les paramètres du modèle de Schaefer.
- Refaire les graphiques et les calculs en utilisant la méthode de Fox pour la recherche des efforts équilibrés.
- Observer et discuter l'évolution générale de la pêcherie. Comparer les résultats obtenus selon que l'on utilise les efforts annuels ou les estimations des efforts à l'équilibre. Discuter.

9.6.2 Exercice 2

Les données suivantes représentent des valeurs effectivement observées pour la pêche de l'albacore (*Thunnus albacares*) dans l'Atlantique centre-est (données fournies par le Centre de recherches océanographiques de Dakar-Thiaroye, Sénégal).

Tableau 9.4 PUE et capture de l'albacore de l'Atlantique centre-est.

Année	Captures (tonnes)	PUE (tonnes/jour)
1969	77 623	5,75
1970	59 387	2,83
1971	57 512	3,10
1972	75 903	5,06
1973	82 253	3,39
1974	90 282	3,93
1975	112 274	3,34
1976	107 882	3,31
1977	112 400	4,42
1978	108 760	3,47
1979	105 869	2,69
1980	107 258	2,11
1981	131 425	2,39
1982	130 758	1,98
1983	111 893	1,81
1984	79 300	1,89
1985	110 600	2,83
1986	99 800	3,46

- Effectuer les calculs préliminaires nécessaires à l'utilisation d'un modèle de surplus de production. Calculer les efforts à l'équilibre selon les méthodes de Fox et de Gulland en considérant la durée de la phase exploitée égale à cinq ans (on ne connaît pas les valeurs de l'effort de pêche antérieures à l'année 1969).
- Faire le graphique des captures (en ordonnées) en fonction de l'effort de pêche (en abscisse) et celui des PUE en fonction de l'effort. En utilisant les efforts annuels, calculer les PME et les f_{PME} selon le modèle linéaire de Schaefer et selon le modèle exponentiel de Fox.
- Refaire les représentations graphiques et les calculs à l'aide des données d'effort à l'équilibre obtenues selon la méthode de Gulland.

- Refaire les représentations graphiques et les calculs à l'aide des données d'effort à l'équilibre obtenues selon la méthode de Fox.

- Comparer et discuter les divers résultats obtenus.

9.7 CORRIGÉ DES EXERCICES

9.7.1 Exercice 1

a) Calculs préliminaires

La première étape nécessite le calcul des PUE ($U=Y/f$) et des efforts estimés à l'équilibre (f_e). On remarquera que les efforts antérieurs à l'année 1 sont connus - ils sont nuls ($f=0$) - ce qui permet de calculer les efforts à l'équilibre dès la première année. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau 9.5 Données de captures, d'efforts et de captures par unité d'effort pour la population simulée.

Année	f	Y	PUE	f_e (Fox)	f_e (Gulland)
1	10	96	9,6	3	3
2	40	332	8,3	16	17
3	90	527	5,9	43	47
4	110	404	3,7	70	80
5	110	270	2,5	90	103
6	75	158	2,1	91	98
7	25	69	2,8	71	70
8	25	103	4,1	52	42
9	40	203	5,1	42	30
10	75	354	4,7	49	47

Nota: Exemple de calcul des efforts à l'équilibre pour l'année 4:

Estimation de Fox - Le paramètre p_k varie de 5 (N = nombre de cohortes exploitées) à 1 d'où:

$$\sum P_k = 5+4+3+2+1=15$$

$$f_{et} = \frac{(110 \times 5 + 90 \times 4 + 40 \times 3 + 10 \times 2 + 0 \times 1)}{15}$$

$$f_{et} = \frac{1050}{15} = 70$$

Estimation de Gulland -

$$T = \frac{N}{2} = 2,5 \text{ d'où } T \text{ est arrondi à } 3$$

$$f_{et} = \frac{(110+90+40)}{3}$$

$$f_{et} = \frac{240}{3} = 80$$

b) *Modèle de Schaefer appliqué avec les efforts annuels (figure 9.8)*

$$U = 6,866 - 0,033f \quad (r = -0,49)$$

$$Y_e = 6,866f - 0,033f^2$$

$$PME = 353$$

$$f_{PME} = 103$$

Nota: «r» correspond au coefficient de corrélation linéaire entre U et f .

c) *Modèle de Schaefer appliqué avec les efforts à l'équilibre de Gulland (figure 9.9)*

$$U = 8,468 - 0,067f \quad (r = -0,91)$$

$$Y_e = 8,468f - 0,067f^2$$

$$PME = 268$$

$$f_{PME} = 63$$

d) *Modèle de Schaefer appliqué avec les efforts à l'équilibre de Fox (figure 9.10)*

$$U = 9,252 - 0,083f \quad (r = -0,97)$$

$$Y_e = 9,252f - 0,083f^2$$

$$PME = 258$$

$$f_{PME} = 56$$

Pour le calcul de la relation entre U et f , on utilise les valeurs de f_e en abscisse, mais les PUE calculées avec les efforts annuels (PUE observée) en ordonnée. En effet, c'est cette PUE qui représente l'index d'abondance pour une année considérée. En d'autres termes, c'est la combinaison des efforts antérieurs à l'année i qui détermine l'abondance observée au cours de cette année i .

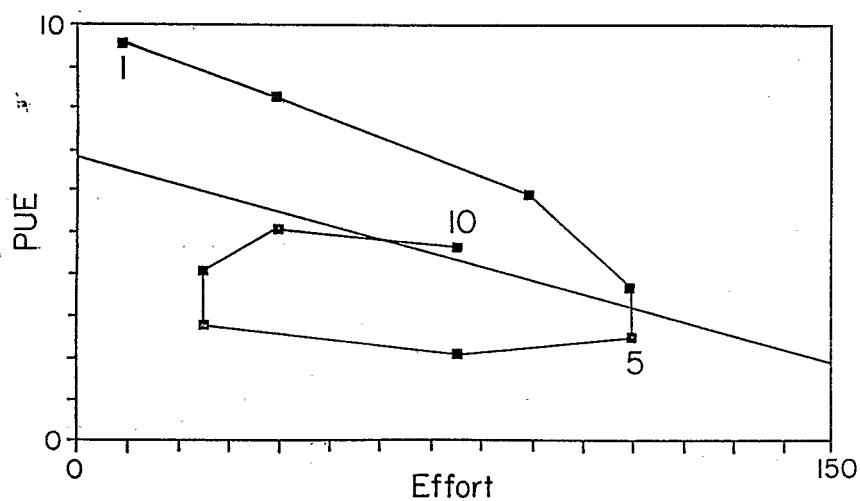
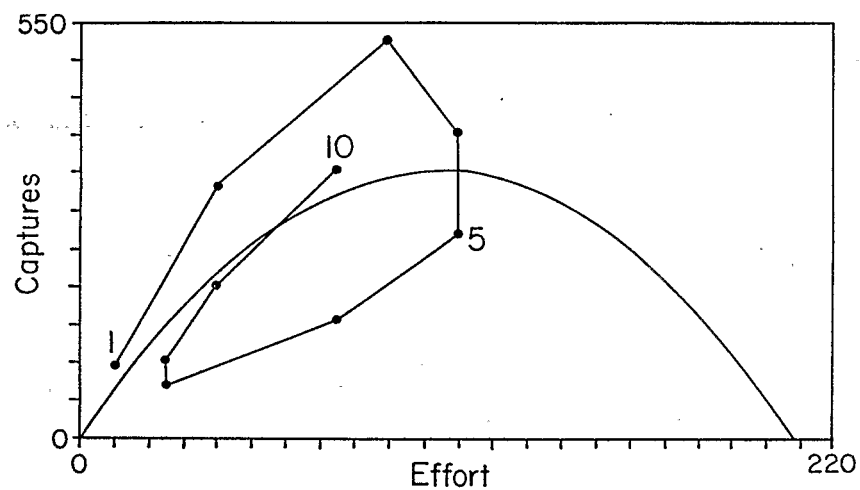


Figure 9.8 Courbe des captures et modèle logistique de Schaefer.
(en haut) Relation entre la capture par unité d'effort et l'effort et la droite d'équilibre résultante.
(en bas) L'effort utilisé est l'effort annuel observé

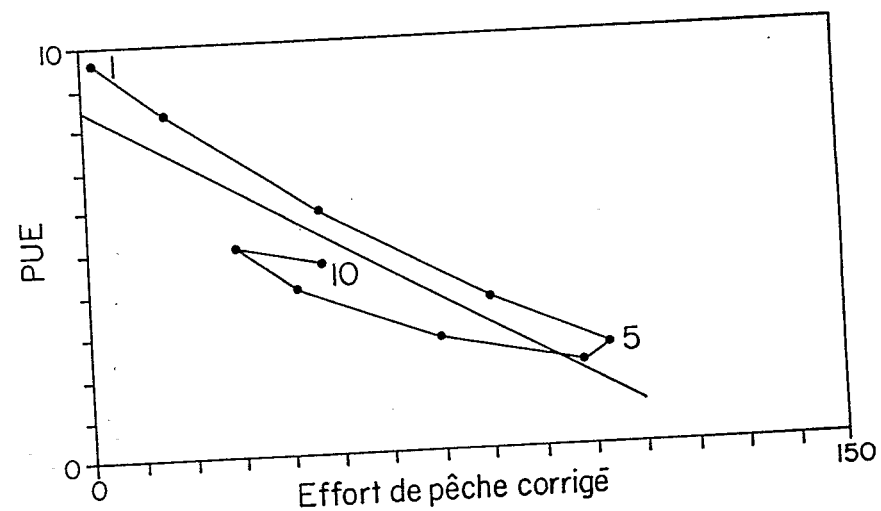
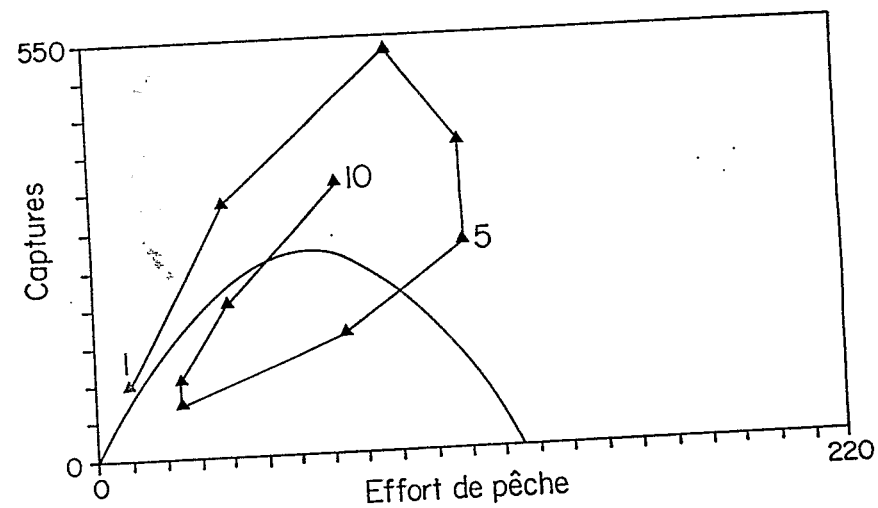


Figure 9.9 Courbe des captures et modèle logistique de Schaefer.
(en haut) Relation entre la capture par unité d'effort et l'effort et la droite d'équilibre résultante.
(en bas) L'effort utilisé est l'effort à l'équilibre obtenu par la méthode de Gulland.

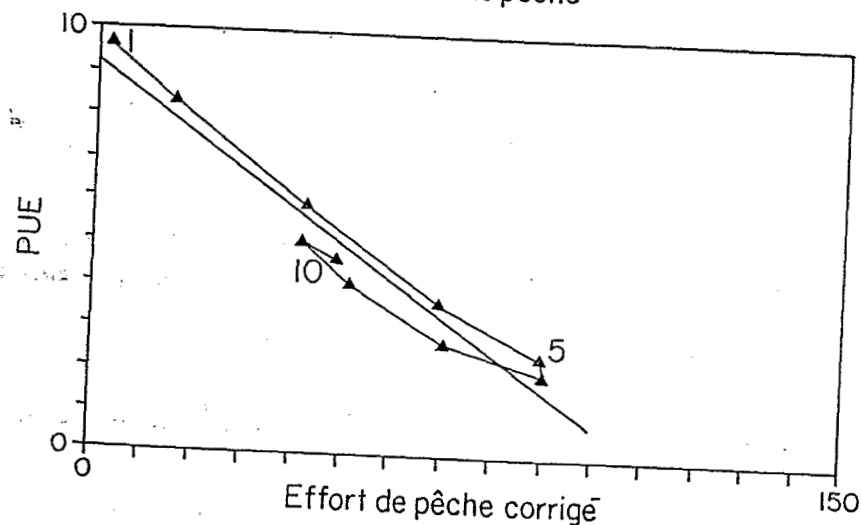
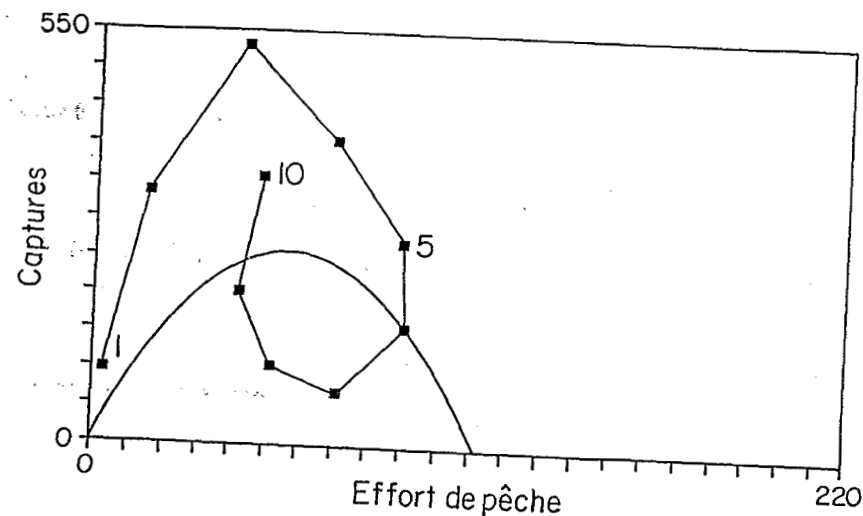


Figure 9.10 Courbe des captures et modèle logistique de Schaefer.
(en haut) Relation entre la capture par unité d'effort et l'effort et la droite d'équilibre résultante.
(en bas) L'effort utilisé est l'effort à l'équilibre obtenu par la méthode de Fox.

e) Commentaires

L'évolution de la pêcherie «théorique» correspond à l'évolution «classique» d'une pêcherie sans contrôle dérivant une spirale de part et d'autre de la droite d'équilibre. Cette droite, de même que la courbe des captures fournie par le modèle, décrivent des situations d'équilibre (d'où leur nom) vers lesquelles tendraient la pêcherie si l'effort restait constant pendant une certaine période. Par contre, la pêcherie elle-même n'est pas en équilibre; elle évolue, ce qui donne la spirale observée autour des situations d'équilibre.

À l'examen des figures 1 à 3, on constate que la précision du modèle s'accroît quand on passe de l'utilisation des efforts annuels aux efforts d'équilibre estimés selon la méthode de Gulland et, enfin, aux efforts d'équilibre selon la méthode de Fox: les points exprimant la relation entre PUE et l'effort apparaissent de plus en plus «proches» de la droite d'équilibre (ce qui est statistiquement indiqué par l'accroissement du coefficient de corrélation linéaire).

Il est intéressant de voir les conclusions que l'on pourrait tirer sur la situation de la pêcherie selon les modèles d'effort utilisés:

- si l'on utilise simplement les efforts annuels pour le calcul de la droite d'équilibre (figure 9.1), la répartition des captures autour de la courbe des prises équilibrées se situe principalement à gauche du point correspondant à la PME, prise maximale à l'équilibre, particulièrement pour les dernières années considérées. On sera donc tenté de définir une situation de sous-exploitation de la pêcherie, ou du moins une situation relativement saine de l'exploitation.
- Les conclusions sont très différentes si l'on utilise l'approximation de Fox (figure 9.3). On constate que dès la quatrième année, la pêcherie se serait trouvée en situation de surexploitation (points à droite de la PME) et même assez forte (années 5 et 6).

Il est évident que les recommandations que l'on pourrait être amené à formuler seront alors sensiblement différentes: optimiste dans le premier cas (tout va bien pour le moment) ou au contraire pessimisme dans le second. On constate ici ce qui est souligné dans les divers chapitres, c'est-à-dire l'importance que l'on doit accorder aux hypothèses de départ dans le choix des paramètres du modèle utilisé.

9.7.2 Exercice 2

a) Calculs préliminaires

Contrairement à l'exercice 1, les données de départ sont les captures et la PUE annuelle. La première étape consiste donc à calculer l'effort annuel correspondant tel que

$$f = \text{capture} / \text{CPUE} = Y/U$$

On procède ensuite au calcul des efforts à l'équilibre estimés. Les efforts antérieurs à l'année 1969 sont inconnus, et certainement non nuls. La durée de la phase exploitée est de cinq ans; la méthode de Gulland nécessite donc trois années successives, et la première année pour laquelle on pourra calculer l'effort à l'équilibre sera donc 1971. Pour la méthode de Fox, la moyenne couvre cinq années, le calcul commencera donc pour l'année 1973.

Tableau 9.6 Données de captures, d'efforts et de captures par unité d'effort pour la population d'albacore.

Année	Capture (tonnes)	PUE (jours de pêche)	f annuel	f_e (Gulland)	f_e (Fox)
1969	77 623	5,75	13 500	-	-
1970	59 387	2,83	20 985	-	-
1971	57 512	3,10	18 552	17 679	-
1972	75 903	5,06	15 000	18 179	-
1973	82 253	3,39	24 263	19 272	19 486
1974	90 282	3,93	22 973	20 745	21 000
1975	112 274	3,34	33 615	26 950	25 421
1976	107 882	3,31	32 593	29 727	28 658
1977	112 400	4,42	25 430	30 546	28 572
1978	108 760	3,17	34 309	30 777	30 750
1979	105 869	2,65	39 950	33 230	34 139
1980	107 258	2,11	50 833	41 714	44 023
1981	131 425	2,39	54 990	48 608	46 145
1982	130 758	1,98	66 039	57 304	54 458
1983	111 893	1,81	61 819	60 949	58 656
1984	79 300	1,89	41 958	56 605	54 400
1985	110 600	2,83	39 081	47 619	49 051
1986	99 800	3,46	28 844	41 073	36 628

b) Utilisation des efforts annuels (figure 9.11)

- Modèle de Schaefer

$$U = 5,13 - 0,05587f \quad (r = -0,81)$$

$$Y_e = 5,13f - 0,0558f^2$$

$$PME = 117\,759 \text{ t}$$

$$f_{PME} = 45\,910 \text{ jours}$$

- Modèle de Fox

$$\ln U = 1,73079 - 0,017916f \quad (r = -0,85)$$

$$Y_e = f e^{1,73079 - 0,017916f}$$

$$PME = 115\,914 \text{ t}$$

$$f_{PME} = 55\,816 \text{ jours}$$

c) Utilisation des efforts de Gulland (figure 9.12)

- Modèle de Schaefer

$$U = 4,87389 - 0,05055f \quad (r = -0,80)$$

$$Y_e = 4,874f - 0,05055f^2$$

$$PME = 117\,487 \text{ t}$$

$$f_{PME} = 48\,210 \text{ jours}$$

- Modèle de Fox

$$\ln U = 1,7097 - 0,01766f \quad (r = -0,85)$$

$$Y_e = f e^{1,7097 - 0,01766f}$$

$$PME = 115\,140 \text{ t}$$

$$f_{PME} = 56\,625 \text{ jours}$$

d) Utilisations des efforts de Fox (figure 9.13)

- Modèle de Schaefer

$$U = 4,8086 - 0,05009f \quad (r = -0,81)$$

$$Y_e = 4,8086f - 0,05009f^2$$

$$PME = 115\ 405\ t$$

$$f_{PME} = 48\ 000\ \text{jours}$$

- Modèle de Fox

$$\ln U = 1,72578 - 0,01837f \quad (r = -0,83)$$

$$Y_e = f e^{1,72578 - 0,01837f}$$

$$PME = 112\ 812\ t$$

$$f_{PME} = 54\ 595\ \text{jours}$$

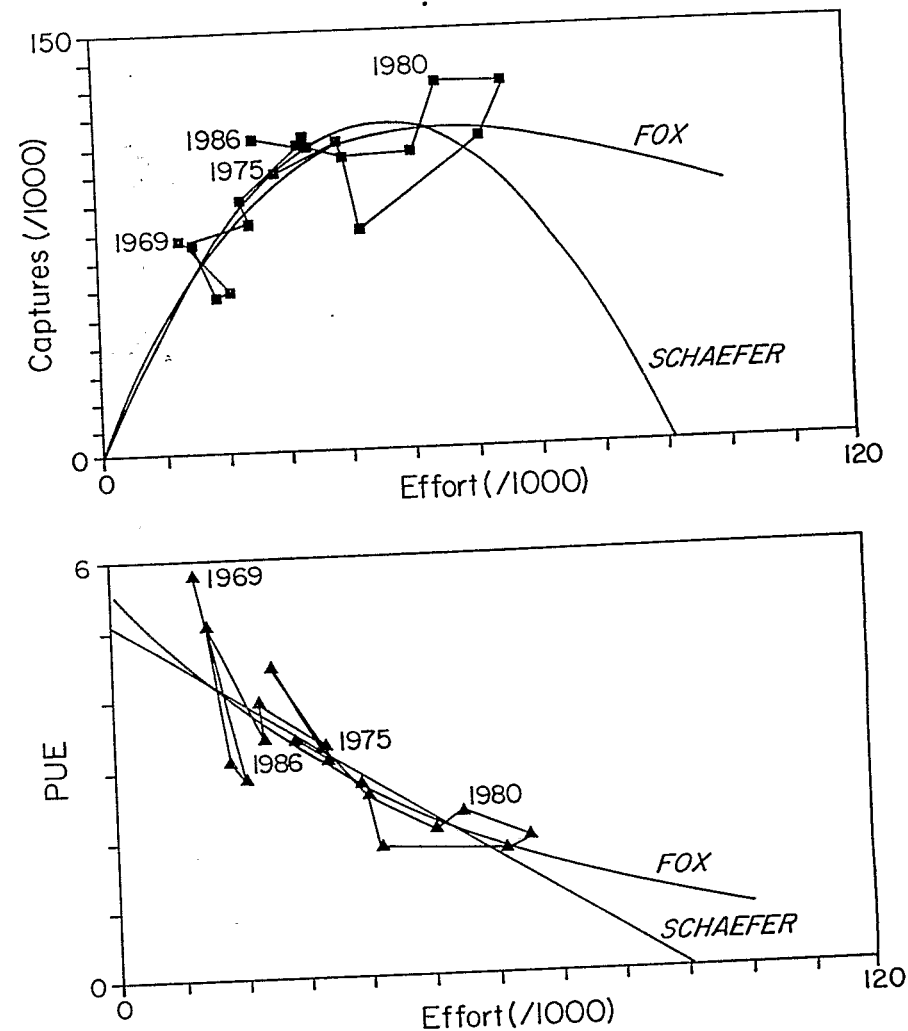


Figure 9.11 Modèles de Schaefer et de Fox appliqués à la population d'albacore de l'Atlantique (efforts annuels observés).
(en haut) Évolution des captures et représentation de la courbe des captures équilibrées.
(en bas) Courbes d'équilibre.

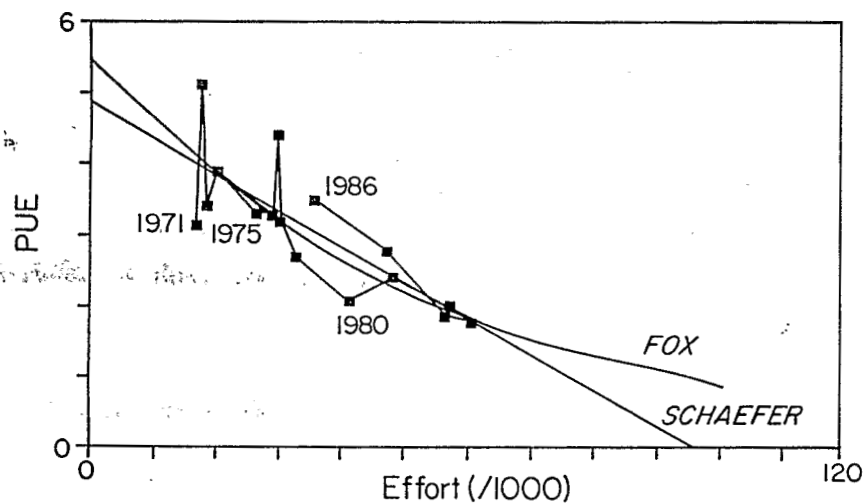
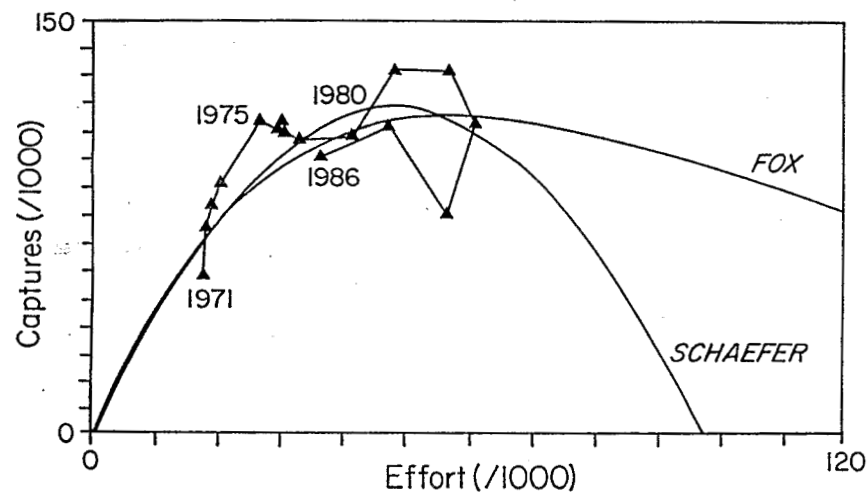


Figure 9.12 Modèles de Schaefer et de Fox appliqués à la population d'albacore de l'Atlantique (efforts à l'équilibre selon la méthode de Gulland).
(en haut) Évolution des captures et représentation de la courbe des captures équilibrées.
(en bas) Courbes d'équilibre.

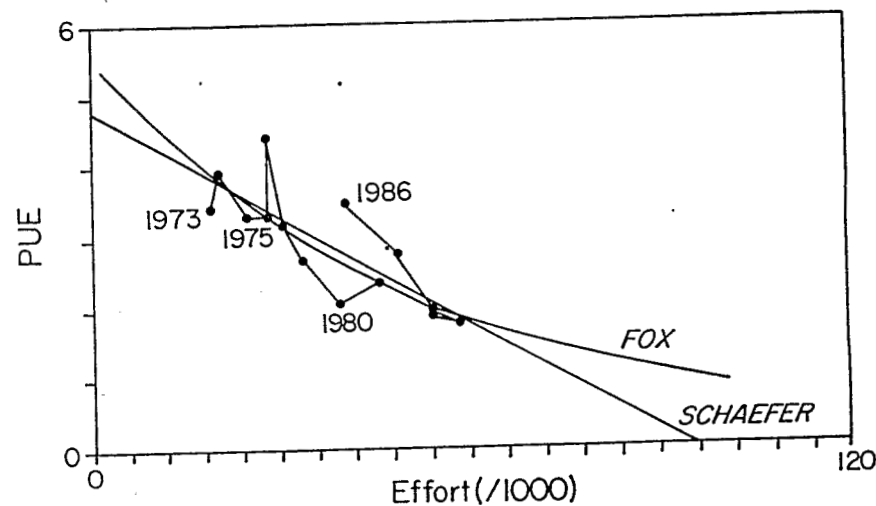
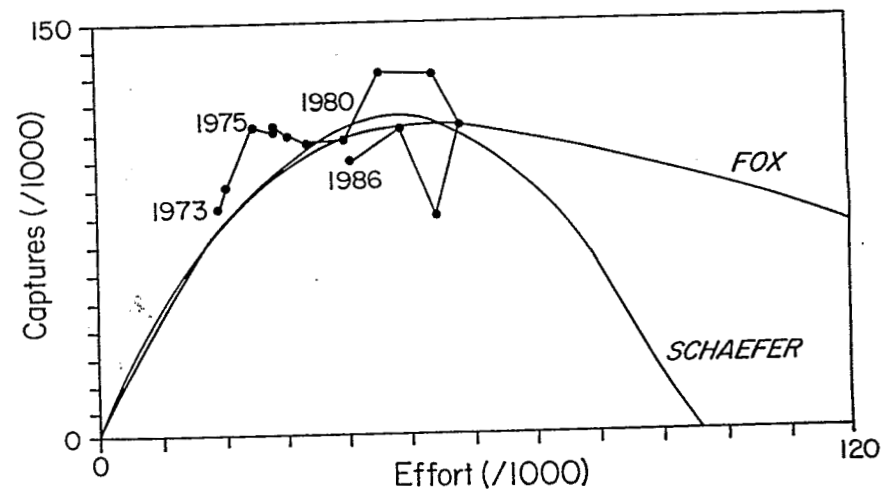


Figure 9.13 Modèles de Schaefer et de Fox appliqués à la population d'albacore de l'Atlantique (efforts à l'équilibre calculés selon la méthode de Fox).
(en haut) Évolution des captures et représentation de la courbe des captures équilibrées.
(en bas) Courbes d'équilibre.

e) Commentaires

- Dans cet exercice, le nom de Fox revient sous deux aspects différents qu'il ne faut pas confondre. Il y a, d'une part, le *modèle de Fox*, qui est une variante du modèle de surplus de production (ou modèle global) de Schaefer et selon lequel la relation entre U et f n'est plus linéaire (modèle de Schaefer) mais exponentielle, c'est-à-dire que:

$$U = ae^{-bf} \quad (e \text{ étant la constante dans le système népérien ou naturel}).$$

Pour permettre un calcul simple (régression linéaire), on calcule le logarithme népérien (ou naturel) de U , ce qui donne la relation:

$$\ln U = a - bf$$

Par ailleurs, on a l'estimation des efforts à l'équilibre selon la *méthode de Fox*, qui permet de tenir compte de l'effet des efforts antérieurs sur les abondances au cours d'une année donnée (alternative à la méthode de Gulland).

- On constate, d'une façon très générale, que le modèle de Fox donne une courbe des captures équilibrées «plus aplatie» que le modèle de Schaefer, ce qui implique un effet moins dramatique de la surexploitation (ce qui, parfois, peut sembler plus réaliste). On pourra également constater que cela ne modifie que très peu la valeur de la PME et que le modèle de Fox paraît «autoriser» un effort correspondant sensiblement plus élevé: ce résultat semble aussi assez général (il serait intéressant de reprendre l'exercice 9.1 avec le modèle de Fox afin d'observer l'effet du choix du modèle).
- L'ensemble des calculs montre que, à première vue, la population d'albacore suit assez bien un modèle de surplus de production. Les améliorations apportées par les différentes méthodes, tant au niveau des calculs des efforts à l'équilibre qu'au niveau des deux modèles, ne sont pas évidentes. Tout au plus peut-on noter une meilleure corrélation pour le calcul de la courbe d'équilibre, lorsque l'on utilise le modèle de Fox, qui pourrait donc être préféré.

Dans le cas présent, on introduit deux variables: le choix de l'effort (annuel, de Gulland ou de Fox) et le choix du modèle. La combinaison qui donnera la «meilleure» représentation de l'évolution de la population reste à découvrir.

- Globalement, la population semble suivre relativement bien un modèle de surplus de production. Toutefois, une analyse plus approfondie de l'évolution de la pêcherie viendra relativiser les résultats obtenus.

Une observation de la distribution spatiale de l'effort de pêche montre que la surface de la zone de pêche prospectée par les navires s'est accrue au cours des années. Ceci se traduit dans le modèle par un accroissement de la biomasse disponible et donc par une augmentation de la capture équilibrée pour un même effort, et parallèlement par une augmentation de la PME.

On constate également que, selon les années considérées, il existe des variations assez marquées de la distribution des fréquences de taille capturée. Ceci traduit également des variations dans la biomasse exploitée par les flottilles.

Dans les deux cas, on constate qu'un principe fondamental du modèle de surplus de production (la biomasse ne varie que sous l'effet de la mortalité par la pêche) n'est pas respecté. De ce fait, le modèle, tel qu'il a été utilisé, n'est pas parfaitement approprié pour décrire l'évolution de la population.



Centre international d'exploitation des océans
International Centre for Ocean Development

Méthodes d'évaluation des stocks halieutiques

(Volume I)

J.-C. Brêthes
et R. N. O'Boyle
(Éditeurs)

B 37885, ex 2

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES

STOCKS HALIEUTIQUES

(Volume I)

Édité par

Jean-Claude Brêthes¹

*Centre international d'exploitation des océans
5670, Chemin Spring Garden, 9^{ème} Étage
Halifax, Nouvelle-Écosse
Canada B3J 1H6*

et

Robert N. O'Boyle

*Division des poissons de mer
Ministère des Pêches et des Océans du Canada
Institut océanographique de Bedford
C.P. 1006
Dartmouth, Nouvelle-Écosse
Canada B2Y 4A2*

Avec la collaboration de

**Maryama Barry-Gérard, Michael Chadwick, Ghislain Chouinard,
Lynn Cleary, Philippe Cury, Abdelouahed Idelhaj, Mustapha Kébé,
Francis Laloë, Jean-Jacques Lévênez, Ian McQuinn,
Jose Pereiro, Djiby Thiam.**

¹ - Adresse actuelle: Université du Québec à Rimouski, 300, Allée des Ursulines, Rimouski, Québec, Canada G5L 3A1.