

5 - Contribution à l'étude du modèle global pour la dynamique des populations marines exploitées. Formulation, ajustement, sensibilité à certaines sources d'erreur.

Francis Laloe

*O.R.S.T.O.M., Centre de Recherche Océanographiques de Dakar
Thiaroye, BP 2241, Dakar, Sénégal
et Université Paris Sud, Mathématiques, bâtiment 425, 91405
Orsay.*

RESUME

Une revue des principales méthodes d'ajustement du modèle global est proposée. Une étude sur la robustesse de ces modèles est faite par simulation et en relation avec les problèmes particuliers des pêcheries artisanales tropicales (exemple du Sénégal), en insistant sur les erreurs d'estimation des données nécessaires et sur les variations incontrôlables de la capturabilité. Une formulation nouvelle de l'équation du modèle est indiquée, qui conserve la souplesse du modèle en le rendant plus aisément interprétable. Le problème de l'utilisation de ces modèles en intégrant plusieurs espèces et plusieurs engins est abordé.

ABSTRACT

A review of the principal methods of fitting the global model is given. An investigation is made on the robustness of these models, by simulation and in relation to the specific problems of tropical artisanal fisheries (example of Senegal), emphasizing the estimate error of the necessary data and the unverifiable variations of the capturability. A new form of the model equation is proposed, which preserves the compliant character of the model and makes it more easily interpretable. The problem of using models which integrate several species and several fishing gears is mentioned.

INTRODUCTION.

Ce travail est une étude du comportement des modèles globaux utilisés pour la gestion des stocks soumis à une mortalité par pêche. Il se situe dans le cadre de la recherche d'outils adaptés à la description de la pêche artisanale sénégalaise.

Les "modèles globaux" sont des adaptations de modèles de croissance classiques (Verhulst, Gompertz) auxquels on a ajouté, entre autres, un terme prenant en compte la mortalité par pêche. On en trouvera des revues générales dans FOX (1975) et LAUREC & LE GUEN (1981). La formule la plus utilisée actuellement est celle du "modèle global généralisé" proposé par PELLA & TOMLINSON (1969):

$$(1) \quad (1/B_t) \cdot (dB_t/dt) = H \cdot (B_t^{m-1} - B_v^{m-1}) - q \cdot f_t$$

où B_t et f_t sont la biomasse et l'effort instantané au temps t . Les paramètres du modèle sont la capturabilité q (probabilité pour une unité de biomasse d'être capturée lorsqu'une unité d'effort s'est déployée), la biomasse vierge B_v (biomasse à l'équilibre lorsque l'effort est nul), et les paramètres H et m qui rendent compte de la vitesse de convergence vers l'équilibre lorsque celui-ci n'est pas réalisé.

Lorsque $m = 2$, on a le modèle initial dit de Graham-Schaefer (GRAHAM, 1935 ; SCHAEFER, 1954) :

$$(2) \quad (1/B_t) \cdot (dB_t/dt) = H \cdot (B_t - B_v) - q \cdot f_t$$

Lorsque $m \rightarrow 1$, on aboutit au modèle "exponentiel" décrit par GARROD (1969) et FOX (1970) :

$$(3) \quad (1/B_t) \cdot (dB_t/dt) = H \cdot (\text{Log} B_t - \text{Log} B_v) - q \cdot f_t$$

Il s'agit ici des formes les plus simples couramment utilisées. D'autres adaptations ont été proposées, et parmi celles-ci l'introduction de délais, c'est-à-dire une influence sur l'évolution de la biomasse au temps t de la biomasse au temps $t-d$ (WALTER, 1973 ; MARCHESSEAU et al., 1976), ou la prise en compte de liaisons entre capturabilité et biomasse, sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE.

Pour estimer les coefficients du modèle, on recourt à une discrétisation en prenant en général des périodes annuelles afin de "gommer" dans la mesure du possible les effets des variations saisonnières qui peuvent intervenir à tous les niveaux. On dispose de points en nombre égal au nombre de périodes pour lesquelles on a des statistiques. Chaque point est constitué de la somme des efforts déployés et de la prise réalisée pendant la période. Le rapport de la prise par l'effort donne la prise par unité d'effort (PUE). En fait - et c'est souvent le cas pour les pêches artisanales - on estime parfois séparément l'effort et la PUE, la prise étant estimée par le produit de ces deux valeurs.

Deux approches sont utilisées pour l'estimation des paramètres :

1. Approximation de l'équilibre. Pour toute valeur d'effort entre 0 et une valeur f_{\max} , éventuellement infinie, il existe une valeur de la biomasse,

notée $B_e(f)$, strictement positive, qui annule la dérivée dB/dt :

$$(4) \quad B_e(f) = \left[B_v^{m-1} + (q \cdot f/H) \right]^{1/(m-1)} ; f \in [0, f_{\max}]$$

Le principe consiste à trouver, pour chaque période i , une valeur \bar{f}_i telle que la biomasse moyenne présente au cours de la période soit $B_e(\bar{f}_i)$. Pour obtenir les \bar{f}_i , plusieurs méthodes existent (GULLAND, 1969 ; FOX, 1975) : il s'agit de combinaisons linéaires prenant en compte l'effort de la période i et un certain nombre de périodes passées - nombre dépendant de la différence entre les âges maximum et minimum des poissons capturés, c'est-à-dire de la durée de la phase exploitée.

Lorsqu'on a obtenu les valeurs des efforts \bar{f}_i à l'équilibre, on utilise la relation entre Yes PUE et l'effort à l'équilibre (les relations à l'équilibre entre PUE et effort et entre prise et effort sont présentées dans les Fig. 1a et 1b pour certaines valeurs de m). Le critère utilisé pour l'ajustement est la minimisation de la somme de carrés (FOX, 1975) :

$$(5) \quad \sum_{i=1}^n [(PUE_i - \widehat{PUE}_i) / \widehat{PUE}_i]^2$$

où PUE_i et \widehat{PUE}_i sont les PUE observées observées et ajustées pendant la $i^{\text{ième}}$ période.

2 - Intégration de l'équation différentielle.

Pour des valeurs données des paramètres, connaissant la biomasse au début d'une période, on peut calculer la prise attendue en fonction de l'effort de cette période, ainsi que la biomasse à la fin de celle-ci. Le modèle comporte donc en fait un paramètre supplémentaire B_0 , biomasse au début de la première période, qui n'est pas la biomasse vierge B_v si la pêcherie existait avant le début de la collecte des statistiques. Ce problème se retrouve d'ailleurs dans la méthode par approximation de l'équilibre, où l'on a besoin de la valeur des efforts de périodes antérieures au début de la collecte des données de capture, pour calculer les efforts à l'équilibre dans les premières périodes. Pour l'estimation des paramètres, on minimise la somme des carrés donnée par l'expression (RIVARD & BLEDSOE, 1978) :

$$(6) \quad \sum_{i=1}^n [(P_i - \widehat{P}_i) / \widehat{P}_i]^2$$

où P_i et \widehat{P}_i sont les prises observées et ajustées pendant la $i^{\text{ième}}$ période.

La différence entre les deux approches tient essentiellement dans la description de la convergence vers l'équilibre lorsqu'il n'est pas réalisé. En fait, la méthode par approximation de l'équilibre utilise un modèle autre que le modèle global pour décrire cette convergence. Ceci est évident lorsqu'on observe qu'il suffit de k périodes d'efforts constants, k étant le nombre de périodes utilisées pour la détermination de l'effort à l'équilibre, pour supposer que celui-ci est atteint. En effet,

$$(7) \quad \bar{f}_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} (p_j \cdot f_{i-j}) \right) / \sum_{j=0}^{k-1} p_j = f_i \text{ si } f_{i-j} = f_i \text{ (} j = 0, \dots, k-1 \text{)}$$

Par contre les deux méthodes s'appuient sur les mêmes relations à l'équilibre. Le fait que l'approche par approximation de l'équilibre impose la composante "retour à l'équilibre" explique également que le nombre de paramètres soit alors

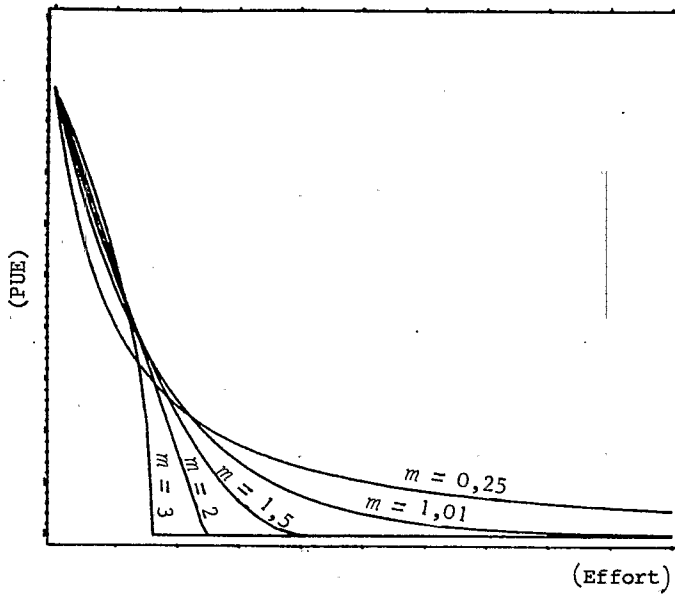


Fig. 1a.- Relations à l'équilibre entre PUE et effort pour diverses valeurs de m dans le modèle global généralisé.

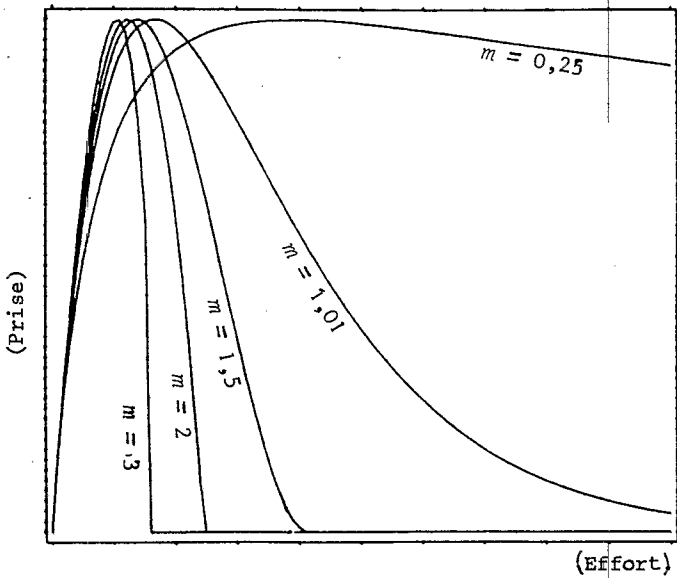


Fig. 1b.- Relations à l'équilibre entre prise et effort pour diverses valeurs de m dans le modèle global généralisé.

inférieur à celui de l'approche par intégration. En particulier, il n'y a plus lieu d'estimer la biomasse au début de la première période.

Dans ces conditions il n'est pas possible de dire quelle approche est préférable, puisque l'approximation de l'équilibre repose sur une intuition biologique imposée *a priori* ; mais on peut, comme LE GUEN & WISE (1967), chercher le nombre d'années à prendre en compte dans la combinaison linéaire en prenant le nombre qui conduit au meilleur ajustement - alors que l'approche par intégration utilise complètement une formule dont on ne peut affirmer qu'elle représente la réalité.

Les paramètres qui intéressent le plus les dynamiciens ne sont pas directement ceux décrits plus haut, mais des valeurs qui s'en déduisent facilement : la prise maximale équilibrée (PME) et l'effort correspondant, f_{opt} (Fig. 2). On peut d'ailleurs utiliser des reparamétrisations du modèle pour les obtenir plus directement (FLETCHER, 1978).

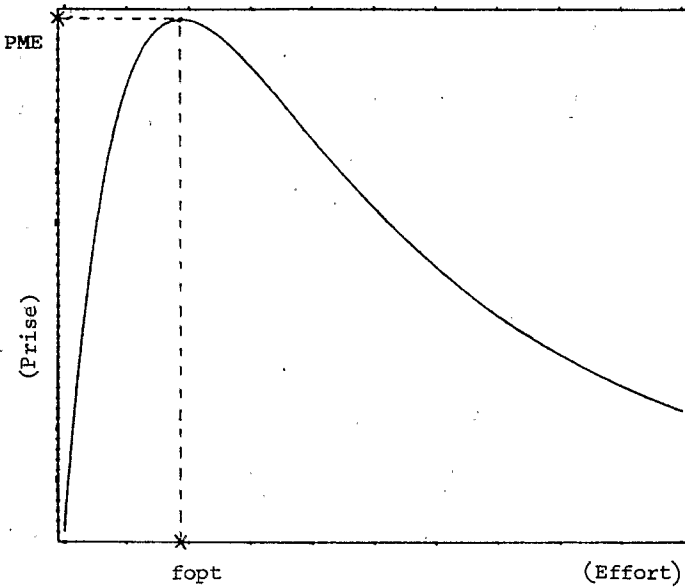


Fig. 2 - Définition des paramètres PME (Prise Maximale Equilibrée) et f_{opt} (Effort Optimal) à partir de la relation entre prise et effort à l'équilibre.

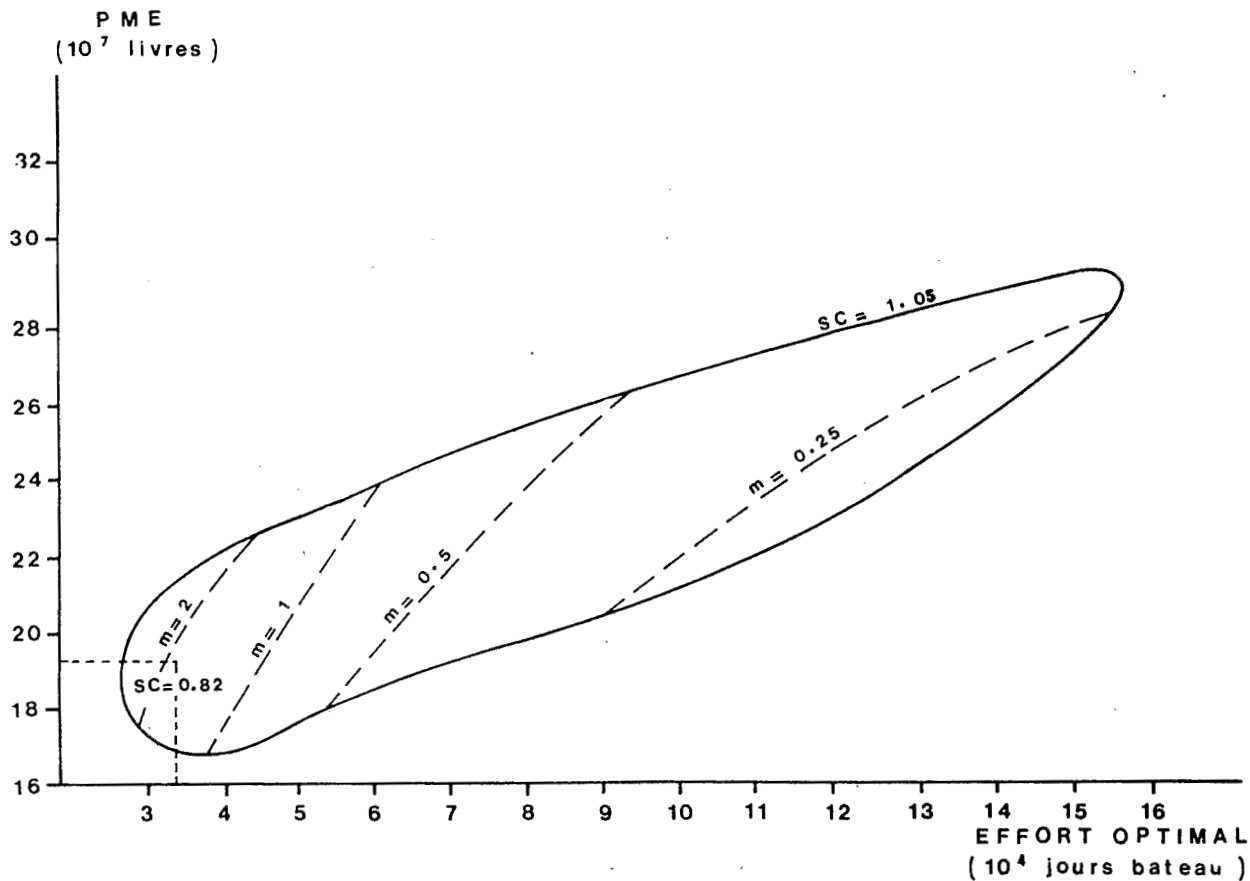


Figure 3. Forme possible de la région de confiance à 95% sur les paramètres PME et Effort optimal, déduite des données utilisées par PELLA et TOMLINSON (1969) sur l'albacore.

PRECISION DES ESTIMATIONS DES PARAMETRES.

On désire évidemment connaître la précision des estimations obtenues. Ceci est délicat, car les hypothèses requises par les méthodes utilisant les moindres carrés peuvent ne pas être vérifiées pour plusieurs raisons, en particulier si l'effort est mal estimé, ou s'il existe des variations incontrôlables de la capturabilité. C'est le cas pour une pêcherie telle que la pêcherie artisanale sénégalaise, à cause du grand nombre d'espèces cibles et des reports d'efforts qui peuvent s'opérer. Les erreurs sur les efforts se répercutent sur les résultats concernant plusieurs périodes, quelle que soit l'approche utilisée, car : - dans l'approche par approximation de l'équilibre, une valeur f_i est utilisée pour le calcul des efforts f_i de plusieurs périodes ; - dans l'approche par intégration, la prise ajustée d'une période dépend de la biomasse ajustée au début de cette période, elle-même calculée à l'aide (entre autres) des efforts des périodes précédentes.

Plusieurs auteurs ont signalé ces problèmes et ont donné les estimations des précisions avec des réserves, en évitant par exemple (FOX, 1975) les appellations "écarts-types" et "variances". Nous avons fait la même chose en appliquant les résultats classiques des méthodes des moindres carrés pour rechercher la forme de la région de confiance autour des estimations de PME et de fopt. Nous avons repris les données utilisées par PELLA et TOMLINSON (1969), données concernant 34 périodes annuelles (1934 à 1967) de pêche de l'albacore (*Thunnus albacares*) dans le Pacifique, et constituant un jeu de référence pour une pêcherie bien et longuement documentée.

La forme de cette région de confiance apparaît dans la Fig. 3. Il s'agit d'une projection sur le plan "PME , fopt" du volume "PME , fopt , m", les valeurs de B_v et B_o ayant été fixées à 400.10^6 livres (en reprenant les unités utilisées par les auteurs). On a également imposé $m > 0,25$. La somme de carrés critique utilisée pour la représentation est égale à

$$1,05 = 0,82.(1 + (3/31).2,91) \quad (f_{95\%,3,31} = 2,91)$$

La région serait donc la région de confiance à approximativement 95% si les "bonnes" hypothèses étaient vérifiées. On peut néanmoins considérer qu'on a au moins ici la forme de la véritable région de confiance. Les valeurs de m qui minimisent la somme des carrés dans l'équation (6) pour diverses combinaisons "PME , fopt" apparaissent également dans la Fig. 3.

Il apparaît donc que m est très imprécisément estimé et que la région de confiance est très décentrée ; en particulier, l'impression de précision obtenue par l'approximation de l'écart-type de l'estimateur de PME est illusoire (cf. Tableau 1). Les résultats obtenus sont assez logiques et on considère que

| | $B_o (10^5)$ | $B (10^5)$ | PME (10^5) | fopt (10^4) | m | $q (10^{-5})$ | SC |
|-----------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------|
| ajustement classique | 1,07 (1,16) | 1,28 (1,02) | 1,91 (0,09) | 3,28 (0,23) | 2,03 (0,76) | 9,04 | 0,74 |
| capturabilité variable, m libre | 21,5 (15,4) | 21,5 (12,1) | 2,18 (1,21) | 19,14 | 0,13 (0,57) | 0,54 (moyen) | 0,90 |
| idem, $m = 1,05$ et $B_o = B_v$ | $=B_v$ ----- | 17,6 (7,7) | 1,60 (0,14) | 3,71 | 1,05 ----- | 0,55 (moyen) | 0,92 |

Tableau 1. Estimation des paramètres du modèle global généralisé (données sur l'albacore de PELLA & TOMLINSON, 1979), par l'ajustement classique (capturabilité constante) et en supposant la capturabilité susceptible de varier (m libre ; m fixé à 1,05 avec $B_o = B_v$). Les estimations des paramètres sont sur les premières lignes et leurs "écarts-types" entre parenthèses sur les secondes.

les "faibles" valeurs de captures appartiennent à l'histoire de la pêche et qu'il n'a pas été observé de chute des captures pour les hauts niveaux d'efforts observés ; les "grandes" valeurs de captures appartiennent donc au domaine délicat de l'extrapolation. Depuis 1967, on a assisté à une modification de l'estimation de la PME, et en 1984 l'I.A.T.T.C. donnait des estimations supérieures à 340.10^6 . Une croissance très nette a également été observée au fil des ans pour les estimations des PME des principaux thonidés de l'Atlantique (FONTE-NEAU, com. pers.). Il est fort possible que les estimateurs soient biaisés et UHLER (1980) a montré comment des erreurs dans la description du renouvellement et la biomasse et/ou dans les statistiques de captures conduisent à des biais dans l'estimation des paramètres.

AJUSTEMENT EN ADMETTANT UNE VARIABILITE DE LA CAPTURABILITE.

Nous avons essayé d'ajuster le modèle en ne supposant pas *a priori* la constance des capturabilités, donc en tentant de s'affranchir de l'impact des variations de capturabilité sur les estimations de biomasse en fin de période. On peut, pour des valeurs convenables de paramètres H , B_0 , B_v et m , rechercher les valeurs F_1, F_2, \dots, F_n qui conduisant aux captures P_1, P_2, \dots, P_n observées, avec $F_i = q_i \cdot f_i$. Il est alors possible de reconstituer les $q_i = F_i / f_i$. On choisit alors les paramètres conduisant à la minimisation de la somme :

$$(8) \quad \sum_{i=1}^n (\text{Log } q_i - \text{Log } q.)^2$$

ce qui revient à minimiser le coefficient de variation des capturabilités. On pourrait choisir d'autres critères et introduire par exemple une saisonnalité dans les capturabilités, ou une relation entre capturabilité et biomasse.

Le jeu de données déjà utilisé a été repris pour mener les calculs avec cette méthode. Les résultats sont présentés dans le tableau 1 ci-dessus avec ceux issus de l'approche classique par intégration (RIVARD et BLEDSOE, 1978, ont déjà fait ces calculs et nous avons obtenu des résultats semblables aux leurs). On constate que l'estimation du paramètre PME ne change pas beaucoup, ce qui n'est pas le cas de l'estimation de sa précision, devenue très mauvaise. Pour les autres paramètres, les estimations sont très dissemblables, en particulier celles des biomasses vierges B_v et des biomasses au début de la première période B . Avec l'ajustement classique, les estimations de ces paramètres sont inférieures à l'estimation de la PME, ce qui ne paraît pas cohérent pour une espèce dont la durée de vie est assez longue (plus de 10 ans : CAYRÉ, com. pers.). Les estimations du paramètre m sont également très dissemblables et conduisent à des relations à l'équilibre très différentes, ce qui explique la forte valeur trouvée pour f ; mais on constate que les estimations de l'estimation de m est très faible. En prenant la matrice des corrélations issue de la matrice de "covariance" des estimateurs, on observe de fortes liaisons entre celles de B_0 et B_v (0,960) et celles de m et de PME (-0,982, alors qu'on trouve seulement -0,559 avec l'ajustement classique). De plus les estimations de B_0 et B_v sont pratiquement égales. Nous avons refait les calculs en imposant $m = 1,05$ (valeur proche de 1) et $B_0 = B_v$. Les résultats apparaissent au Tab.1. La précision de l'estimation de PME devient alors nettement meilleure.

Nous n'avons pas poursuivi dans cette voie dans la mesure où cette méthode est très sensible aux erreurs d'estimation des prises, et donc à ce titre probablement peu utilisable dans le cas d'études sur les pêches artisanales, où l'on estime généralement les prises par le produit de celles des efforts et de la prise par unité d'effort.

INTRODUCTION D'EFFETS CLIMATIQUES.

Les programmes que nous avons écrits à l'aide du progiciel GENSTAT (Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Grande Bretagne) et qui utilisent l'algorithme de MARQUARDT (1963) permettent l'introduction de modifications du modèle avec une certaine souplesse.

Nous avons étudié les adaptations proposées par FRÉON (1983) pour prendre en compte l'influence de facteurs climatiques. L'auteur montre que l'introduction d'une relation entre la biomasse vierge et la force moyenne des vents améliore l'ajustement des captures en sardinelles (*Sardinella maderensis* et *Sardinella aurita*) réalisées par la pêche au Sénégal (pêche artisanale et pêche industrielle réunies). Au Sénégal, les vents sont responsables d'un upwelling (remontée d'eaux froides riches en éléments nutritifs) ; ils peuvent également modifier l'état de la mer et donc la répartition des poissons et l'aptitude des unités de pêche à les repérer. Les vents peuvent donc avoir un impact sur la biomasse vierge et sur la capturabilité.

Nous avons repris les données utilisées par FRÉON (Tableau 2) pour ajuster le modèle défini par la relation :

$$(9) \quad (1/B_t) \cdot dB_t/dt = H \cdot [B_t - B_v \cdot (1 + a_v \cdot v_i)] - q \cdot (1 + a_q \cdot v_i) \cdot f_t$$

où v_i est l'écart entre le vent moyen de l'année i et la moyenne des vents sur les 15 années. Nous avons ici imposé $m = 2$ et les paramètres B_0 et B_v égaux à 2 fois la prise maximale à l'équilibre. Le modèle étudié comporte donc 4 paramètres qui peuvent être, après reparamétrisation, a_q , a_v , PME et fopt. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 3. Le nombre réduit de 15 points rendrait les tests peu puissants et nous avons vu que, de toutes façons, les hypothèses de base pour les effectuer ne sont pas vérifiables. Nous pouvons observer tout de même que l'introduction de l'effet du vent sur la biomasse vierge divise par 2 la somme des carrés résiduelle par rapport au modèle classique, et que celle de l'influence du vent sur la capturabilité la réduit d'environ 25%. L'introduction des deux effets n'apporte pas d'amélioration par rapport au modèle supposant l'effet du vent sur la seule biomasse vierge.

Ce résultat illustre la difficulté qu'il y a à faire, à l'aide des ajustements mathématiques, la part des choses entre la forme du terme décrivant l'évolution de la biomasse en dehors de l'effort, et celui décrivant la capture.

| a_q | a_v | PME (10 ⁴ tonnes) | fopt (10 ⁴ heures bateau) | SC |
|--------------------|------------------|------------------------------------|--|-------|
| 0,0385 (0,0545) | 0,155 (0,066) | 6,94 (0,66) | 6,66 (1,10) | 0,168 |
| 0,0963 (0,0544) | 0 --- | 7,21 (0,72) | 6,39 (1,19) | 0,260 |
| 0 --- | 0,184 (0,053) | 7,02 (0,75) | 7,11 (1,09) | 0,176 |
| 0 --- | 0 --- | 8,11 (1,58) | 8,49 (2,20) | 0,339 |

Tableau 2. Ajustements réalisés à partir des données de la pêcherie de sardinelles au Sénégal (données de FRÉON, 1983). On a imposé $B_0 = B_v = 2$ PME. Les estimations des paramètres sont sur les premières lignes et celles des "écarts-types" entre parenthèses sur les secondes lignes.

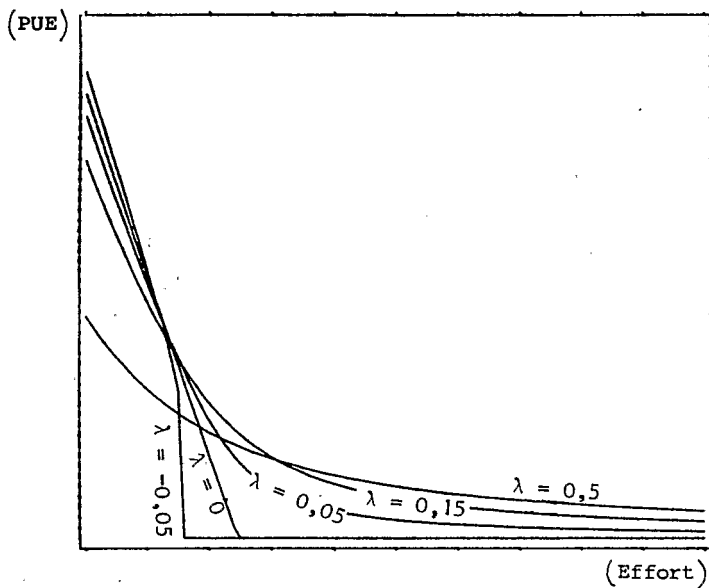


Fig. 4a - Relations à l'équilibre entre PUE et effort pour diverses valeurs de la fraction de biomasse inaccessible.

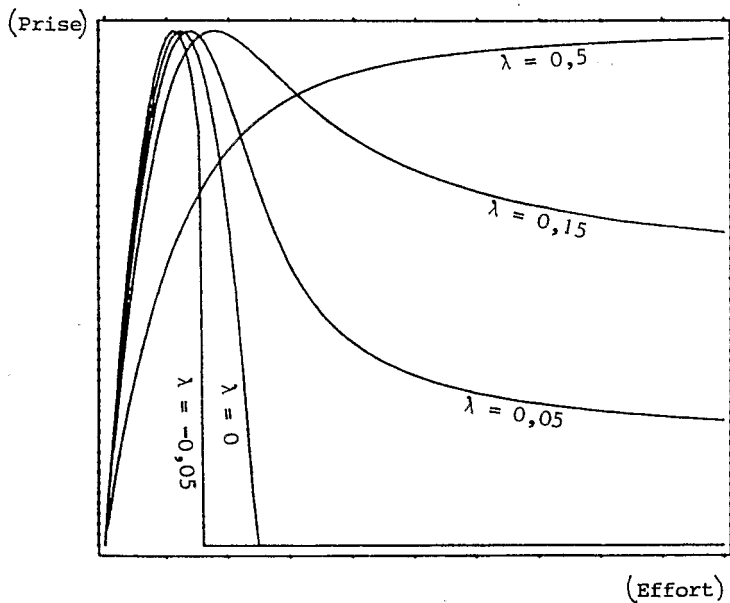


Fig. 4b - Relations à l'équilibre entre Prise et effort pour diverses valeurs de la fraction de biomasse inaccessible.

| | B_0 (10 ⁶) | B_v (10 ⁶) | PME (10 ⁶) | f_{opt} (10 ⁵) | m | q (10 ⁻⁶) | SC |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------------------------|------|
| Vraies valeurs | 2,00 | 3,90 | 1,30 | 1,51 | 1,80 | 4,60 | |
| Estimation n°1 | 0,31 (1,71) | 3 PME --- | 1,46 (2,28) | 1,88 (18,5) | 0,37 (5,43) | 8,85 | 1,42 |
| Estimation n°2 | 3,50 (4,65) | 3 PME --- | 3 --- | 4,2 (16,9) | 1,51 (15,8) | 1,75 | 1,45 |

Tableau 3. Simulations réalisées à partir d'une population théorique pour la pêcherie de laquelle on dispose de statistiques soumises à des erreurs du type de celles rencontrées en pêche artisanale. Pour les estimations n°1 (PME non imposée) et n°2 (PME imposée), les estimations des paramètres sont sur les premières lignes et celles des "écarts-types" entre parenthèses sur les secondes.

FORMULATION DU MODELE SUPPOSANT L'EXISTENCE D'UNE FRACTION INACCESSIBLE DE LA BIOMASSE

Nous avons observé cette difficulté dans beaucoup d'autres jeux de données et elle apparaît clairement dans l'exemple suivant. Nous avons étudié le comportement du modèle régi par l'équation :

$$(10) \quad dB_t/dt = H \cdot B_t \cdot (B_t - B_v) - q \cdot f \cdot (B_t - \lambda \cdot B_v)$$

dans lequel il est supposé qu'il existe une fraction λ de la biomasse vierge inaccessible à la pêcherie. Les relations à l'équilibre entre PUE et effort d'une part, et entre prise et effort d'autre part, sont indiquées par les Figures 4a et 4b. On constate que ces relations sont assez proches de celles qui peuvent résulter du modèle global généralisé classique (cf. Fig. 1a et 1b). Or cette formulation revient à introduire une liaison entre biomasse et capturabilité, puisqu'en raisonnant sur la capturabilité q' par rapport à la biomasse totale on obtient :

$$(11) \quad q' = q \cdot (1 - \lambda \cdot B_v / B_t)$$

Ce modèle nous paraissait susceptible de prendre en compte certains faits comme, par exemple, une modification de l'âge à la première capture ou une répartition des stocks sur une aire plus grande que celle accessible aux unités de pêche - ce qui peut être intéressant pour l'étude d'une pêcherie artisanale côtière. Dans les essais que nous avons fait, nous nous sommes heurté à une grande difficulté pour l'estimation du paramètre λ , très imprécise. Cette difficulté est semblable à celle qu'on éprouve dans l'estimation du paramètre m du modèle classique. Le nouveau modèle permet toutefois de décrire d'une manière intuitive ce qui peut se produire lorsqu'une fraction, jusque là inaccessible, arrive dans la zone de pêche, par exemple à la suite d'événements climatiques comme cela a été décrit par BINET (1982) pour le stock de sardines rondes (*Sardinella aurita*) de la Côte d'Ivoire et du Ghana (Fig. 5). L'étude de la relation entre biomasse et capturabilité n'est pas nouvelle ; par exemple, Mac CALL (1976) a étudié la relation $q = q_0 \cdot N^{\%}$ où N est le nombre

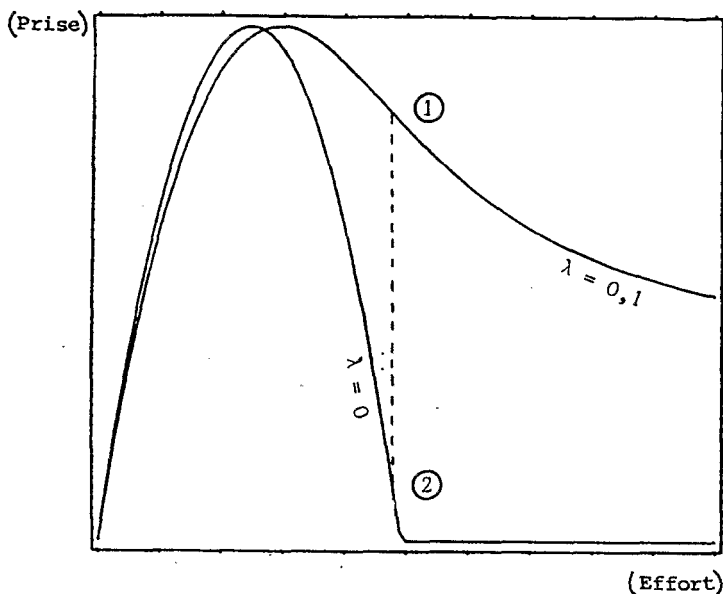


Fig. 5 - Interprétation possible de la chute des captures observées pour la pêche de Sardinelles plates Ivoiro-ghanéennes

- ① Situation où une fraction, ici 10 %, de la biomasse vierge est inaccessible.
- ② Point d'équilibre lorsque, pour un même effort toute la biomasse devient accessible.

Le passage de ① à ② se fait d'abord par une brusque augmentation des captures, due à la soudaine apparition dans la pêcherie d'individus jusque là inaccessibles.

d'individus de la population, et TSOA & aL . (1985) ont étudié l'ajustement du modèle où $m = 2$ et

$$(12) \quad q = q_0 \cdot B_t^\alpha \cdot f_t^\beta$$

SIMULATION DE PECHERIE SATISFAISANT A CERTAINES CONDITIONS PARTICULIERES A LA PECHERIE ARTISANALE.

Nous n'avons jusqu'ici qu'évoqué certaines spécificités de la pêche artisanale sénégalaise. Pour voir dans quelle mesure le modèle global peut donner des conclusions intéressantes, nous avons fait des simulations en "créant" une pêcherie agissant pendant 15 périodes sur des populations dont l'évolution de la biomasse satisfait au modèle global généralisé avec une

capturabilité variable : $q_i = q \cdot (1 + e_{qi})$. Nous avons supposé que cette variabilité satisfait à un coefficient de variation de 30%. Nous l'obtiendrons en tirant les e_{qi} dans des lois normales indépendantes, en les centrant, les réduisant, enfin en les multipliant par 0,3. Cette ampleur est du même ordre de grandeur que celle décrite par Mac CALL (1976) pour un stock de sardines du Pacifique. Dans notre cas, les reports d'effort entre stocks occasionnés par les différentes stratégies appliquées par les unités de pêche artisanale risquent même d'augmenter cette variabilité. Les paramètres de la population sont : $B_0 = 2.10^6$, $B_y = 3,9.10^6$, $PME = 1,3.10^6$, $q = 4,6.10^{-6}$, $m = 1,8$. Avec ces valeurs, on obtient un effort optimal $f_{opt} = 1,51.10^5$.

Nous avons supposé dans un premier temps que les efforts annuels ont une variabilité de 30% autour de 10^5 , sans tendance (nous avons, pour cela, écrit $f_i = 10^5 \cdot (1 + e_{fi})$) et opéré pour les e_{fi} comme pour les e_{qi} . Ceci paraît plausible pour une pêcherie active depuis une longue période. Le niveau d'effort moyen est alors inférieur d'un tiers à l'effort optimal. Une fois les captures et les PUE théoriques obtenues, nous avons recherché les efforts, PUE et captures "observés" pour faire l'ajustement. Nous avons supposé que les efforts et PUE observés sont égaux à :

$$f_{obs,i} = f_i \cdot (1 + a_{fi})$$

$$PUE_{obs,i} = PUE_i \cdot (1 + a_{pi})$$

en opérant comme décrit plus haut et de façon à obtenir des coefficients de variation respectivement égaux à 10% et 15% pour les a_{fi} et les a_{pi} , et donc pour les erreurs d'estimation des efforts et PUE. L'ampleur des erreurs ainsi introduites est compatible avec les résultats obtenus lors d'une étude menée pour l'évaluation de la précision des calculs de diverses quantités estimées, avec le plan d'enquêtes utilisé pour le programme "Pêches Artisanales" du C.R.O.D.T. (LALOE, 1985). Nous avons fait l'ajustement en fixant $B_y = 3 \cdot PME$, supposant que cette connaissance est issue de celle de la longévité de l'espèce. Les résultats de l'estimation des quatre autres paramètres figurent dans le Tableau 3 (ligne "estimation n°1") : on observe que les "écarts-types" des différents estimateurs sont considérables. Nous avons refait l'ajustement en imposant $PME = 3 \cdot 10^6$ (ligne "estimation n°2" du Tableau 3). La somme de carrés (SC) obtenue est pratiquement la même avec une prise maximale équilibrée double de celle initialement estimée ! Les Figures 6a et 6b donnent les prises observées et ajustées ainsi que les courbes à l'équilibre entre prises et efforts issues de ces deux ajustements.

En reprenant les mêmes données, mais cette fois avec un niveau moyen d'effort de $1,5 \cdot 10^5$ c'est-à-dire égal à l'effort optimal, on obtient des minima locaux, avec des estimations des paramètres différentes selon les valeurs initiales fournies pour ceux-ci. Dans le Tableau 4 nous avons porté les résultats pour certaines valeurs du paramètre m : 0,3 ; 1,5 ; 5. Les valeurs 0,3 et 5 conduisent à des sommes de carrés résiduelles (SC) équivalentes. Dans un tel cas on est conduit à imposer pour m une valeur réaliste, ce qui est une démarche classique dans les études faites par des biologistes. Ici la valeur $m = 0,3$ conduit à une estimation très faible de la biomasse initiale, ce qui nous a amené à imposer pour ce paramètre une très faible valeur. La valeur $m = 5$ conduit à une estimation de la PME très élevée, avec une imprécision considérable. Imposer ici une valeur "plausible" d'après les connaissances biologiques, par exemple 1,5, donne des estimations assez précises de la PME (mais non de l'effort optimal). Cet exemple illustre les difficultés d'utilisation du modèle : impossibilité d'estimer le paramètre m , nécessité de recourir aux connaissances de la biologie des espèces, lorsque c'est possible, pour imposer des garde-fous.

L'utilisation de ce type de modèles n'est peut-être pas bien justifiée

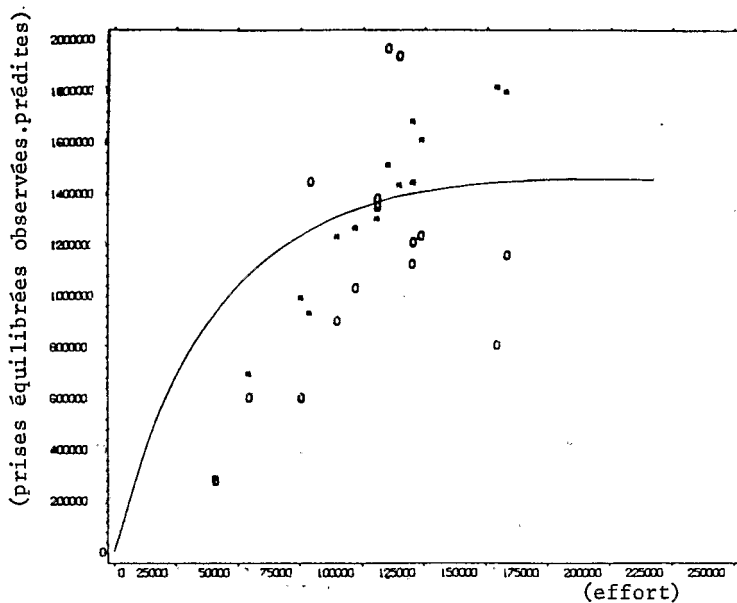


Figure 6a - Résultats d'une simulation sur une pêcherie dont les statistiques ont une précision analogue à celles disponibles pour la pêche artisanale sénégalaise. Ici la prise maximale équilibrée est estimée à $1,46 \cdot 10^6$.

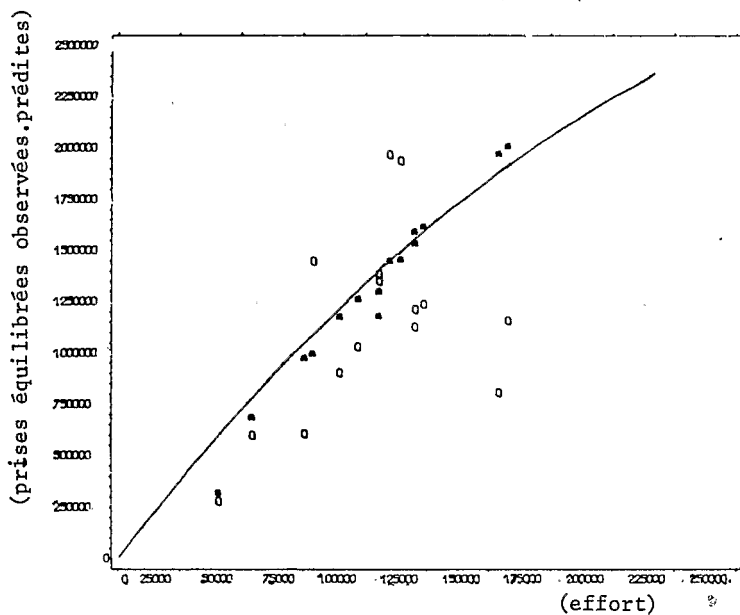


Figure 6b - Résultats obtenus avec les mêmes données en imposant une prise maximale équilibrée égale à $3 \cdot 10^6$.

| | B_0 | B_p | PME .10 ⁶ | f _{opt} .10 ⁵ | q .10 ⁻⁶ | SC |
|-----------|--------------------------------|-------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------|
| $m = 0,3$ | imposé = 5000 | 3.PME | 1,44 (0,13) | 1,41 (0,58) | 15,0 | 1,16 |
| $m = 1,5$ | $9,95.10^5$ ($15,5.10^5$) | 3.PME | 1,51 (0,29) | 1,31 (1,29) | 5,6 | 1,25 |
| $m = 5$ | $1,82.10^6$ ($0,72.10^6$) | 3.PME | 4,68 (69,10) | 1,22 (0,26) | 4,1 | 1,15 |

Tableau 4. Simulation d'une pêcherie avec un effort moyen équivalent à l'effort optimal. Résultats pour certaines valeurs de m imposés. Les chiffres du haut sont les valeurs des estimations, ceux du bas entre parenthèses sont les "écarts-types" des estimateurs.

et elle pourrait être abandonnée au profit des approches s'appuyant sur l'analyse des fréquences d'âge (à travers les fréquences de tailles). Ces dernières méthodes sont abondamment utilisées aux Philippines par l'équipe menée par D. Pauly (voir par exemple PAULY, 1982) pour l'étude des pêches artisanales ; des études sur la sensibilité de ces méthodes se développent (voir par exemple LAUREC & MESNIL, 1985 ; HAMPTON & MAJKOWSKI, 1985).

Les modèles globaux peuvent tout de même être utilisés et nous avons vu l'exemple de l'impact des vents sur la pêcherie de sardinelles rondes et sardinelles plates au Sénégal. Dans cet exemple l'étude concerne les captures de deux populations différentes, ce qui réduit les problèmes posés par les reports d'efforts (FRÉON, 1983) : l'étude menée sur une seule espèce ne permettait pas de mettre aussi bien en évidence l'impact des vents.

Le plus important reste, à notre avis, le fait que ce modèle comporte dans son expression l'impact de l'activité de la pêche, exprimée en effort, sur les stocks. Il paraît donc plus directement utilisable pour la gestion de la pêcherie. Le modèle peut être adapté pour prendre en compte plusieurs stocks et plusieurs engins (voir par exemple POPE, 1976 ; HORWOOD, 1976) mais, à notre connaissance, ces adaptations n'ont été faites que pour ajuster les prises ou les PUE (variables "dépendantes") par les efforts (variable "indépendante"). Nous avons beaucoup insisté sur la souplesse d'adaptation des unités de pêche ; GULLAND & GARCIA (1984) ont évoqué les "multiple target single fisheries" à propos des pêcheries modernes...et des pêcheries traditionnelles. Pour l'étude de ces pêcheries, il nous semble qu'une voie de recherche intéressante est l'introduction d'une liaison entre les efforts et l'histoire de la pêcherie c'est-à-dire les efforts et PUE des périodes précédentes. Ces prises observées en premier lieu par les pêcheurs peuvent conduire, selon la souplesse d'adaptation des unités de pêche, à la modification de répartition de l'effort ultérieur. La description de cette souplesse relève en partie de l'outil mathématique, mais également des études économiques et sociologiques. Il apparaît que dans une pêcherie en pleine évolution, exploitant une ressource fluctuant en raison des variations climatiques et de la mortalité par pêche, la capacité d'adaptation des unités de pêche est un facteur déterminant. Ceci apparaît clairement dans le cas de la pêche artisanale sénégalaise, pour laquelle, malgré des fluctuations considérables constatées dans les résultats partiels, on observe que la prise totale est en légère augmentation dans la période récente (autour d'une moyenne de 160.000 tonnes par an). Il est donc indispensable de bien comprendre la part due à la souplesse de la pêcherie dans ces résultats, afin de fournir aux décideurs des éléments nécessaires à l'évaluation des aménagements qu'ils envisagent.

- BINET (D.), 1982 - Influence des variations climatiques sur la pêche des *Sardinella aurita* ivoiro-ghanéennes : relation sécheresse - surpêche. *Oceanol. Acta*, 4 : 443-452.
- FLETCHER (R.J.), 1978 - On the restructuring of the Pella-Tomlinson system. *Fish Bull.*, US, 76 : 515-521.
- FOX (W.W.), 1970 - An exponential surplus yield model for optimizing exploited fish populations. *Trans. am. Fish. Soc.*, 99 : 80-88.
- FOX (W.W.), 1974 - An overview of production modelling. ICCAT workshop on tuna population dynamics. Nantes, France, 1974. *Rec. Doc. Scient. CTCTA*, 3 : 142-156.
- FOX (W.W.), 1975 - Fitting the generalized stock-production model by least square and equilibrium approximation. *Fish. Bull.*, US, 73 : 23-37.
- FREON (P.), 1983 - Production models as applied to substocks depending on upwelling fluctuations. *Proceed. of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*, San Jose, Costa Rica, 18-29 April 1983. *FAO Fish. Rep.* 291, vol.3.
- GARROD (D.J.), 1969 - Empirical assessments of catch-effort relationship in the North Atlantic cod stock. *Res. Bull. ICNAFT*, 6 : 26-34.
- GRAHAM (M.), 1935 - Modern theory of exploiting a fishery, and application to North Sea trawling. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.*, 10 : 264-274.
- GULLAND (J.), 1969 - Manuel d'évaluation des stocks d'animaux aquatiques. Première partie : analyse des populations. *Man. FAO Sci. Halieut.*, 4 : 160 pp.
- GULLAND (J.) & GARCIA (S.), 1984 - Observed patterns in multispecies fisheries. In R.M. May edit., *Exploitation of marine communities*, Dahlem Conferences, Springer Verlag : 155-190.
- HAMPTON (J.) & MAJKOWSKI (J.), 1985 - An examination of the accuracy of the ELEFAN computer programs for length based stock assessment. *Communic. intern. Conf. on the Theory and Application of length based methods in stock assessment*, Mazzara del Vallo, Sicily, Italy, 11-16 February 1985.
- HORWOOD (J.W.), 1976 - Interactive fisheries : a two species Schaeffer model. *ICNAF sel. paper*, 1 : 151-155.
- I.A.T.T.C., 1985 - Annual Report of the Inter-american tropical Tuna Commission, 1984.
- LALOE (F.), 1985 - Etude de la précision des estimations de captures et de prises par unité d'effort obtenues à l'aide du système d'enquêtes de la Section "Pêches Artisanales" du CRODT. *Doc. sci. Centre Rech. océanogr. Dakar Thiarye*, 100 : 36 pp.
- LAUREC (A.) & LE GUEN (J.C.), 1981 - *Dynamique des populations marines exploitées*. IFREMER, Rapports Scient. Tech. 45 : 117 pp.
- LAUREC (A.) & MESNIL (B.), 1985 - Rendements par recrue et analyse des cohortes de Jones : étude de sensibilité. *Communic. CIEM, Comité des poissons démersaux*, CM 1985/G34 : 16 pp.
- LE GUEN (J.C.) & WISE (J.P.), 1967 - Méthode nouvelle d'application du modèle de Schaeffer aux populations exploitées d'albacores dans l'Atlantique. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 5 : 79-94.

- MAC CALL (A.D.), 1976 - Density dependence of catchability coefficient in the California Pacific Sardine (*Sardinops coerulea*) purse seine fishery. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.*, 18 : 136-148.
- MARCHESSEAU (G.D.), SAILA (S.D.) & PALM (W.J.), 1976 - Delayed recruitment models and the application to the americal lobster (*Homarus americanus*) fishery. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 33 : 1779-1787.
- MARQUARDT (D.W.), 1963. An algorithm for least square estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11 : 431-441.
- PAULY (D.), 1982 - Studying single species dynamics in a tropical multispecies context. In D. Pauly & G.I. Murphy edit., *Theory and management of tropical fisheries*. ICLARM Conf. Proceedings : 33-70.
- PELLA (J.G.) & TOMLINSON (P.K.), 1969 - A generalized stock-production model. *Bull. IATTC*, 13 : 419-496.
- POPE (J.G.), 1976 - The effect of biological interactions on the theory of mixed fisheries. *ICNAF sel. Paper 1* : 157-162.
- SCHAEFER (M.B.), 1954 - Some aspects of the dynamics of population important to the management of the commercial marine fisheries. *Bull. inter-am. trop. Tuna Comm.*, 1 : 26-56.
- RIVARD (D.) & BLEDSOE (L.J.), 1978 - Parameter estimation for the Pella-Tomlinson stock production model under non-equilibrium conditions. *Fish Bull., US*, 76 : 523-534.
- TSOA (E.), SCHRANK (W.E.) & ROY (N.), 1985 - Generalizing fisheries model : an extension of the Schaefer analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42 : 44-50.
- UHLER (R.S.), 1980 - Least squares regression estimates of the Schaeffer production model : some Monte Carlo simulation results. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37 : 1284- 1294.
- WALTER (G.G.), 1973 - Delay differential equation models for fisheries. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 30 : 939-945.