



L'APPROCHE STRUCTURALE EN ANALYSE ET

AMENAGEMENT DE STOCKS

Projections à l'équilibre et simulations de production

I. S. T. P. M.  
BOULOGNE sur MER  
Novembre 1980  
Benoit MESNIL

L'APPROCHE STRUCTURALE EN ANALYSE ET  
AMENAGEMENT DE STOCKS

Projections à l'équilibre et simulations de production

I. S. T. P. M.  
BOULOGNE sur MER  
Novembre 1980  
Benoit MESNIL

- SOMMAIRE -

I - INTRODUCTION.

I.1. Introduction.

I.2. Implications de l'approche structurale.

II - ANALYSES DES ETATS D'EQUILIBRE.

II.1. Notion d'équilibre et ses corollaires.

II.2. Un modèle simple d'analyse des rendements à l'équilibre.

II.3. Présentation et interprétation des résultats.

II.4. Abondance, biomasse et fécondité à l'équilibre.

II.5. Production maximale à l'équilibre et relations stock-recrutement.

III - PREDICTION DE CAPTURES PAR SIMULATION.

III.1. Sélection des données.

III.2. Simulations de captures à court terme.

III.3. Présentation et interprétation des résultats.

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES: Programmes pour calculateurs de poche.

## I.1. Introduction.

— Pour analyser un stock exploité, et plus encore pour prévoir en termes quantitatifs les conséquences de mesures envisagées pour sa gestion, le recours à des représentations explicites des phénomènes régissant les états de ce stock s'impose.

Dans un premier temps, les statistiques associées aux facteurs élémentaires sont étudiées et leurs variations figurées sous un format approprié. La modélisation consiste en la recherche de la loi mathématique ou fonction dont la courbe caractéristique s'ajuste de la façon la plus étroite aux diagrammes des variations observées. Ce faisant, on réduit considérablement le volume des données: les quelques coefficients de la fonction retenue en assurent la synthèse et suffisent à représenter les phénomènes quand des valeurs numériques, choisies dans les limites d'ajustement, leur sont affectées. —

Sous réserve de quelques hypothèses, ces mêmes coefficients peuvent être combinés en des modèles de second ordre grâce auxquels on peut analyser les interactions entre facteurs élémentaires et évaluer des bilans de leurs effets simultanés.

Chaque fois que les données le permettent, on fera appel à une famille de modèles dits structuraux. Elaborés pour que soient pris en compte des mécanismes intimes agissant sur le système-stock, ils autorisent l'examen d'une gamme étendue de situations et, par conséquent, la définition de mesures d'aménagement susceptibles de peser sur un niveau précis du système.

Dans ce document, il est essentiellement question de l'utilisation pratique des techniques associées à cette famille de modèles, avec référence à l'usage courant dans les Groupes de Travail du C.I.E.M. Nous ne pouvons cependant écarter toute considération sur les principes car, dans ce domaine, toute généralisation abusive des concepts peut avoir des conséquences néfastes pour le stock ou ceux qui l'exploitent.

Après quelques rappels des notions et hypothèses fondamentales, nous évoquerons les modèles d'analyse à l'équilibre, puis les techniques de simulation sur les états de transition.

## 1.2. Implications de l'approche structurale.

En dynamique des populations marines, on s'intéresse au devenir de la fraction des populations présente dans une aire géographique délimitée et susceptible de faire l'objet d'une exploitation; cette fraction éventuellement exploitable selon les techniques de pêche mises en oeuvre est appelée stock.

Le stock peut être considéré comme un système clos dont la biomasse -masse cumulée des individus qui le composent- évolue sous l'effet de quatre facteurs primaires. Croissance pondérale et recrutement concourent à une augmentation de la biomasse, tandis que la mortalité pour toutes causes dites naturelles et les prélèvements par la pêche tendent à la diminuer. Une analyse plus fine conduira à identifier au sein du stock des sous-ensembles homogènes pour une caractéristique et à étudier l'effet des facteurs principaux sur chacun d'entre eux.

A un moment donné, on peut ainsi estimer l'âge des individus et définir des groupes d'âge, ensembles des animaux ayant le même âge (selon une unité ou une convention appropriées). Rétrospectivement, on peut préciser le millésime de naissance des membres d'un groupe et identifier des cohortes ou des classes annuelles, ensemble des individus nés au cours d'une saison ou d'une année données, que l'on peut reconnaître et suivre au fil des années.

Le terme de recrutement désigne les divers processus à l'issue desquels les jeunes individus d'une cohorte sont incorporés à la fraction exploitable de la population. Pour simplifier, on admet généralement que tous les individus d'une cohorte sont recrutés simultanément et massivement à un même âge moyen noté  $t_r$ .

C'est seulement à partir de cet âge qu'ils sont pris en considération dans les analyses, et que leur croissance ainsi que les variations d'effectif des cohortes commencent à être décrites par les modèles élémentaires respectifs.

Le recrutement, entrée dans la phase exploitable, correspond également à un seuil au-delà duquel les individus de la cohorte deviennent susceptibles de rencontrer les engins de pêche mis en oeuvre - ou qui pourraient l'être - sur l'aire occupée par le stock. Dans une pêcherie au chalut, par exemple, en fonction des caractéristiques respectives des individus recrutés et des engins, on pourra distinguer trois temps:

- dans le premier, la probabilité de rétention des recrues par l'engin (vulnérabilité) lors d'une rencontre est nulle: pas de capture.
- dans un deuxième temps, cette probabilité augmente graduellement (sélection); des membres de la cohorte commencent à apparaître dans les captures: ils sont entrés dans la phase exploitée.
- enfin, la probabilité de rétention atteint une limite finie correspondant à la pleine vulnérabilité. Négligeant le plus souvent les variations ultérieures de la vulnérabilité (évitement, ...), on supposera que celle-ci se maintient à son niveau maximum jusqu'à l'extinction de la cohorte.

Lorsqu'on analyse une pêcherie existante, les caractéristiques des engins sont connues et l'âge  $t_c$  de première capture pour le métier peut être déterminé par échantillonnage des captures, débarquements ou rejets. Son évaluation est plus complexe lorsque des modalités d'exploitation hypothétiques sont simulées: la phase de sélection intéressant alors des intervalles de tailles ou d'âges variables selon les cas testés, il faudra alors traduire en terme de mortalité par pêche l'évolution graduelle de la vulnérabilité.

A partir de l'âge  $t_c$ , les modèles représentatifs de la phase recrutée doivent en effet incorporer un terme supplémentaire dit de mortalité par pêche, fonction de la vulnérabilité des individus à l'âge ou à la taille considérés et des probabilités de rencontre entre engins et individus, fonctions quant à elles de l'intensité de pêche et de la densité des animaux.

Les modèles structuraux que nous évoquerons sont basés sur une même loi décrivant la décroissance des effectifs des cohortes au cours du temps.

Sur un intervalle de temps  $dt$ , suffisamment bref pour que l'effectif initial ne varie pas sensiblement, on admet par hypothèse que le nombre d'individus qui disparaissent est proportionnel à l'effectif  $N_i$  présent:

$$\frac{dN_i}{dt} = -Z_i \cdot N_i \quad (1)$$

Le coefficient  $Z_i$  de mortalité totale sur le groupe d'âge considéré à l'instant  $i$ , se décompose en un terme de mortalité par pêche  $F_i$  et un terme  $M_i$  de mortalité due à toutes autres causes; on écrit:

$$Z_i = F_i + M_i \quad (2)$$

La composante  $F_i$  est évidemment nulle pour tous les intervalles  $i$  couvrant les âges  $t_r$  à  $t_c - 1$ , mais les coefficients  $F_i$ ,  $M_i$  et donc  $Z_i$  peuvent éventuellement varier selon les intervalles, les âges ou les années. Aussi les modèles simples supposent-ils un découpage de la phase recrutée des cohortes en intervalles sur lesquels les coefficients instantanés de mortalité peuvent être considérés comme constants.

Considérons un de ces intervalles de durée  $\Delta i$ . La décroissance de l'effectif de la cohorte entre les instants  $i$  et  $i + \Delta i$  est donnée par intégration de la relation (1) dans laquelle, en intervertissant  $N_i$  et le dénominateur  $dt$ , on reconnaît la dérivée d'une fonction logarithme. Il vient:

$$\text{Log}(N_{i+\Delta i}) = -Z_i \cdot \Delta i + \text{constante} (= \text{Log } N_i)$$

soit:

$$N_{i+\Delta i} = N_i \cdot \exp(-Z_i \cdot \Delta i) = N_i \cdot \exp((-F_i - M_i) \cdot \Delta i) \quad (3)$$

dont on déduit immédiatement l'expression du taux de survie  $S_i$ :

$$S_i = \frac{N_{i+\Delta i}}{N_i} = \exp((-F_i - M_i) \cdot \Delta i) \quad (4)$$

et son complément, le taux de disparition  $A_i$ :

$$A_i = \frac{N_i - N_{i+\Delta i}}{N_i} = 1 - S_i = 1 - \exp(-Z_i \cdot \Delta i) \quad (5)$$

Pour évaluer la capture  $C_i$ , nombre d'individus de la cohorte prélevés par la pêche au cours de l'intervalle, à l'aide d'une relation de type (1) dans laquelle figurerait seul le coefficient  $F_i$ , on est amené à considérer le nombre moyen  $\bar{N}_i$  d'individus présents au cours de l'intervalle car la durée de ce dernier ne permet généralement pas de respecter l'hypothèse d'invariance de l'effectif initial  $N_i$ .

L'effectif moyen est défini à partir de l'équation de survie comme:

$$\bar{N}_i = \frac{1}{\Delta i} \cdot \int_i^{i+\Delta i} N_i \cdot e^{-Z_i \cdot u} \cdot du = \frac{N_i}{Z_i \cdot \Delta i} \cdot (1 - \exp(-Z_i \cdot \Delta i)) \quad (6)$$

Le nombre  $C_i$  d'individus appartenant à un certain groupe d'âge de la cohorte qui disparaissent du fait de la pêche au cours de l'intervalle est défini par:

$$\frac{\Delta N_i}{\Delta i} (F) = \frac{C_i}{\Delta i} = F_i \cdot \bar{N}_i$$

soit:

$$C_i = \frac{F_i}{Z_i} \cdot (1 - \exp(-Z_i \cdot \Delta i)) \cdot N_i = \frac{F_i \cdot A_i \cdot N_i}{Z_i} \quad (7)$$

Au cours de l'intervalle considéré,  $A_i \cdot N_i$  individus disparaissent au total; la capture représente une fraction  $E_i = F_i/Z_i$  de ce nombre.  $E_i$  est appelé taux d'exploitation; il est constant sur l'intervalle.

L'approche de l'équation des captures par l'effectif moyen permet d'explicitier une relation fort utile pour certains types d'analyses que nous évoquerons ultérieurement. Supposons que, au cours de l'intervalle  $(i, i+\Delta i)$ , la cohorte (i.e. un certain groupe d'âge) est exploitée par  $m$  métiers réalisant chacun une capture  $C_{i,j}$ . Chaque métier engendre une certaine mortalité par pêche  $F_{i,j}$  sur la cohorte, et on écrit:

$$C_i = \text{Somme } (C_{i,j})_1^m \quad ; \quad F_i = \text{Somme } (F_{i,j})_1^m \quad ; \quad Z_i = F_i + M$$

Du fait que chaque métier prélève une fraction d'un même nombre moyen, on a pour tout  $j$  (1, m):

$$C_{i,j} = F_{i,j} \cdot \bar{N}_i \cdot \Delta i$$

et:

$$C_i = F_i \cdot \bar{N}_i \cdot \Delta i$$

Par conséquent, la fraction de la mortalité par pêche globale exercée au cours de l'intervalle attribuable au métier  $j$  peut être estimée au pro rata des captures en nombre:

$$\frac{F_{i,j}}{F_i} = \frac{C_{i,j}}{C_i} \quad (8)$$

Quant à la capture en poids, elle est égale au produit de  $C_i$  par une valeur de la fonction de croissance pondérale:

$$Y_i = (E_i \cdot A_i \cdot N_i) \cdot w(i) \quad (9)$$

Sous certaines conditions liées à l'évaluation de cette fonction, le produit  $N_i \cdot w(i)$  est une estimation de la biomasse  $B_i$  du groupe d'âge considéré au début de l'intervalle, auquel cas:

$$Y_i = E_i \cdot A_i \cdot B_i$$

Chaque fois que l'on fait appel aux équations de base, il est indispensable de se référer à leur forme générale, telle qu'elle vient d'être donnée. Pour la suite de l'exposé, nous allons néanmoins utiliser des formes simplifiées de façon à faire apparaître plus explicitement des âges. Tout intervalle  $i$  correspond alors à un groupe d'âge  $t$  pour une cohorte et a une durée égale à l'unité ( $i = 1$ ).

Pour préciser les notions évoquées en début de ce paragraphe, considérons l'âge  $t_r$  comme origine du temps ( $t_r = 0$ ) et notons  $R$  l'effectif de la cohorte au recrutement. Dans l'équation (3) de survie, les coefficients de mortalité aux âges successifs sont additifs et l'on peut symboliser par les fonctions  $F(t)$ ,  $M(t)$ , ou  $Z(t)$  les mortalités cumulées sur tous les intervalles entre l'origine et l'âge  $t$ . Du début de la phase recrutée (exploitable) au début de la phase exploitée, la cohorte n'est affectée que par la mortalité naturelle. A la veille de la première exploitation, le nombre de survivants est alors:

$$N_{t_c} = R \cdot \exp(-M(t_c - 1) \cdot (t_c - 1)) = R'$$

$R'$  est la seule fraction observable dans les captures, voire mesurable par analyse de cohortes, de l'effectif réel au recrutement, lequel reste extrêmement difficile à évaluer;  $R'$  est en quelque sorte un "effectif apparent au recrutement", proportionnel à  $R$  et fonction de l'âge  $t_c$  de première capture. Cet âge étant donné,  $R'$  est le nombre d'individus de la cohorte qui seront ultérieurement soumis à des mortalités par pêche.

Si l'on développe les équations de survie (3) et des captures (7), on démontre que le nombre  $N_t$  de survivants de la cohorte à tout âge  $t$ , et par conséquent la capture  $C_t$  réalisée sur cet effectif pour une mortalité par pêche  $F_t$  exercée au cours d'une unité de temps, sont proportionnels à l'effectif réel  $R$  au recrutement. Pour se libérer de l'indétermination sur  $R$ , on peut ainsi analyser l'évolution et la production d'une cohorte soumise à diverses modalités d'exploitation sur la base d'un recrutement arbitraire constant, le cas le plus simple étant celui où  $R = 1$ . Les variations relatives de la production par recrue et de la fraction survivante pour différentes pressions d'exploitation seront représentatives à une constante  $R$  près des variations de production réelle de la cohorte.

Cette propriété est largement utilisée pour l'analyse des situations dites d'équilibre, lesquelles permettent une application simplifiée des modèles.

## II - ANALYSES DES ETATS D'EQUILIBRE.

### II.1. Notion d'équilibre et ses corollaires.

La notion d'équilibre évoquée dans le cadre des modèles structuraux diffère sensiblement de celle sur laquelle sont fondés les modèles globaux.

Considérons un stock à un instant donné; l'effectif de chaque groupe d'âge identifié dans ce stock est le nombre de survivants de la cohorte correspondante et il est donc fonction de l'effectif au recrutement et des taux de mortalité éprouvés jusque là par cette cohorte. Si l'on soumet à présent ce stock à une pression de pêche, celle-ci engendre sur chaque groupe d'âge présent, selon sa capturabilité propre, une certaine mortalité par pêche qui se traduit par une capture  $C_t$  proportionnelle à l'effectif initial du groupe d'âge.

La capture totale réalisée sur l'ensemble des cohortes constituant le stock à l'instant considéré, somme des contributions de chaque groupe d'âge, sera donc fonction d'une infinité de combinaisons entre les niveaux respectifs de recrutement des cohortes et les paramètres de leur exploitation présente et passée. Il est évident qu'un modèle destiné à analyser l'effet de variations d'un facteur sélectionné ne pourra prendre en compte toutes les combinaisons.

On impose donc à toutes les cohortes du stock un même effectif  $R$  au recrutement et des régimes d'exploitation identiques depuis le recrutement jusqu'à l'instant considéré. Ainsi définie, la notion d'équilibre s'accompagne des corollaires suivants:

- si le stock est, en début de période  $n$  par exemple, composé de  $P$  groupes d'âge issus d'autant de cohortes recrutées avec un même effectif  $R$  et toutes exploitées jusque là selon des schémas identiques, la production de ce stock au cours de la période  $n$  est égale, pour une même intensité globale de pêche, à la production cumulée des  $P$  groupes d'âge d'une des cohortes au cours de sa phase d'exploitation (équivalence stock:cohorte).

- si on analyse un régime particulier d'exploitation, on devra attendre que les  $P$  groupes d'âge en aient tous subi les effets, et que ceux-ci se soient stabilisés, pour en dresser le bilan (projection à long terme). Tels quels, les modèles ne sont pas adaptés à l'étude des états de transition.

- si, les effets d'un régime d'exploitation (intensité de pêche globale, âge  $t_c$ ) étant stabilisés, on projette l'état d'équilibre jusqu'à des temps infinis, le stock conservera d'année en année un effectif global et une biomasse constants, proportionnels à  $R$  (conservation de la biomasse). Il y a sur ce point convergence avec l'état d'équilibre évoqué dans l'approche globale.

- enfin, pour qu'une analyse à recrutement constant soit valide, il faut admettre que les capturabilités, les coefficients de mortalité et les paramètres de croissance propres à chaque groupe d'âge ne sont fonction que de l'âge des individus. Cela signifie avant tout qu'ils doivent être indépendants de l'effectif total ou de la biomasse du stock, et donc en particulier de l'effectif théorique  $R$  adopté. Si l'on veut analyser un autre compartiment du système que la production pondérale (fécondité, coûts, revenus, ...), il faut s'assurer que le paramètre qui le représente respecte cette condition d'indépendance.

La notion d'équilibre est parfois étendue aux modèles autorégénérants ou aux modèles stochastiques mais elle ne recouvre pas exactement les mêmes acceptions. Il n'y a pas pourtant contradiction absolue; les modèles d'analyse à l'équilibre exigent tout au plus que le recrutement ne présente pas de tendance temporelle.

Ceci étant posé, les modèles structuraux permettent d'analyser l'évolution du rendement d'une cohorte à l'équilibre en réponse à différents schémas d'exploitation caractérisés, chacun, par une intensité de pêche globale et un âge de première capture. Si l'on s'intéresse pour l'instant au premier de ces paramètres,  $t_c$  étant fixé, on pourra étudier les variations du rendement à l'équilibre de  $R$  recrutées en fonction de l'intensité de pêche exercée, c'est-à-dire de la mortalité par pêche  $F_t$  induite sur chaque groupe d'âge. Les courbes représentatives de ces variations passent nécessairement par l'origine: à effort de pêche nul ( $f = F_t = E_t = 0$ ), capture nulle. Quand au contraire l'effort de pêche tend vers l'infini et avec lui l'ensemble des mortalités  $F_t$  par groupe d'âge, le taux d'exploitation  $E_t$  (et  $E_{t_c}$  entre autres) tend vers 1: la capture en nombre est alors égale au recrutement apparent  $R'$ , fonction de  $R$  et de l'âge  $t_c$ , et elle est instantanément et totalement réalisée à cet âge. Le rendement correspondant, produit de  $R'$  par la valeur  $w(t_c)$  de la fonction de croissance, constitue donc une limite finie pour un effort de pêche infini en abscisse.

Entre l'origine et cette limite, les rendements se distribuent selon deux types principaux de courbes, dont le profil est essentiellement déterminé par la résultante entre pertes par mortalité naturelle et gains par croissance, ainsi que par la position relative de l'âge  $t_c$  et de l'âge  $t_{cri}$  de biomasse maximale d'une cohorte non exploitée.

Si  $t_c$  est supérieur à  $t_{cri}$ , on se trouve de toutes façons dans la phase de biomasse décroissante de la cohorte; un gain du rendement équilibré exige alors une intensification sensible de l'exploitation. La courbe aura une croissance continue mais lente vers l'asymptote.

Si, comme c'est le plus souvent le cas en pratique,  $t_c$  est inférieur à  $t_{cri}$ , tout dépend de l'interaction croissance-mortalité  $M$ , explicitement prise en compte par les paramètres  $M/K$  du modèle de BEVERTON et HOLT (1957, 1964) ou  $(G - Z)$  du modèle de RICKER (1958). On constatera généralement que la courbe de rendements équilibrés d'une cohorte (ou d'un stock) caractérisée par un taux de croissance faible ou soumise à une mortalité naturelle élevée présente un plateau: au delà d'un certain seuil, il faut un accroissement considérable de l'intensité de pêche pour obtenir une augmentation sensible du rendement. A l'inverse, un taux de croissance élevé ou une faible mortalité naturelle déterminent un profil en dôme présentant un maximum nettement défini. A des niveaux intermédiaires du taux d'exploitation, on peut tirer bénéfice de l'accroissement naturel de la biomasse.

Les calculs de rendement sont effectués à l'aide de modèles qui, dans des situations d'équilibre, sont d'une résolution simple. Ce sont:

- le modèle de BEVERTON et HOLT (1957) qui suppose des coefficients de mortalité par pêche  $F_t$  égaux à tous les âges; la sélection doit donc se produire de façon abrupte à un âge "moyen"  $t_c$  parfois difficile à préciser avec rigueur. Le modèle incorpore une fonction de croissance de type von BERTALANFFY (1938) dont l'usage et l'ajustement sont à certains égards contestables. En discrétisant la phase exploitée, on peut à la rigueur utiliser ce modèle pour traiter des situations dans lesquelles  $F_t$  varie avec l'âge; ce n'est guère simple:

- on préfère alors utiliser le modèle de RICKER (1958) dans lequel  $F_t$  peut varier librement avec l'âge; la croissance pondérale est décrite à partir d'observations et modélisée par une loi simple: interpolation arithmétique ou exponentielle négative, dont l'ajustement est assez sensible au pas de temps choisi.

- le modèle de B.W. JONES (1976) présente les mêmes avantages que celui de RICKER. Il est d'un usage courant dans le cadre du G.I.E.M., mais n'a pas fait l'objet d'une description détaillée, contrairement aux deux modèles précédents largement étudiés dans tous les ouvrages de base. Nous lui consacrerons donc le paragraphe suivant et il nous donnera l'occasion d'explicitier certaines notions évoquées précédemment.

## II.2. Un modèle simple d'analyse des rendements à l'équilibre.

L'approche de JONES s'apparente à la fois à celle de THOMSON et BELL (1934, cités par RICKER 1958, 1975) et à celle de RICKER (1958) dont elle diffère pour l'essentiel par la représentation du vecteur des mortalités par pêche sur les groupes d'âge considérés.

Soit une période (année) de référence au cours de laquelle le stock est composé de  $P$  groupes d'âge ( $t_r$  à  $T$ ). Nous sommes en situation d'équilibre et l'effectif de chaque groupe d'âge est le nombre de survivants en début de période soit de  $P$  cohortes toutes recrutées avec le même effectif  $R$  et précédemment exploitées selon des modalités immuables, soit d'une de ces cohortes au long de sa phase d'exploitation.

La pression de pêche exercée sur chaque groupe d'âge exploité, au cours d'un intervalle de temps, peut être caractérisée par un coefficient de mortalité par pêche  $F_t$  proportionnel à l'intensité de pêche globale  $f_i$  déployée au cours de l'intervalle et à la capturabilité  $q_t$  spécifique du groupe d'âge  $t$ . En vertu des hypothèses d'équilibre, toute capturabilité  $q_t$  est constante tant que le groupe conserve le même âge  $t$  durant l'intervalle si bien que, pour une intensité de pêche donnée, les coefficients de mortalité  $F_t$  relatifs à chaque groupe d'âge respectivement resteront constants sur l'intervalle.

Un certain régime d'exploitation affectant les  $P$  groupes d'âge peut donc être représenté par un vecteur  $\{F_t\}$  des mortalités par pêche ou par le produit du vecteur  $\{q_t\}$  des capturabilités et du scalaire  $f_i$ , intensité de pêche globale. On trouvera dans JENSEN (1976) une utilisation intéressante des représentations vectorielles. Une méthode particulièrement appropriée d'ajustement de ces vecteurs est l'analyse de cohortes, du moins pour des régimes d'exploitation effectivement mis en oeuvre.

Nous appellerons "diagramme d'exploitation" la répartition selon les âges des coefficients de mortalité par pêche  $F_t$ . Outre qu'elle traduit assez fidèlement le terme anglais "exploitation pattern", cette dénomination suggère une représentation graphique qu'il est, à notre avis, fort utile de tracer lorsque l'on cherche à vérifier la convergence dans les analyses de cohortes. A la constante  $f_i$  près (changement d'échelle), le diagramme d'exploitation figure également la répartition relative des capturabilités spécifiques de chaque groupe d'âge.

Dans la méthode de JONES, on effectue un changement d'échelle différent. Soit  $F_{sup}$  la composante du vecteur  $|F_t|$  résultant de l'analyse de cohortes qui a la plus forte valeur observée; à une constante  $F_{sup}$  près, le diagramme d'exploitation représente aussi les variations avec l'âge des paramètres  $P_t$  définis pour chaque âge  $t$  par:

$$P_t = F_t / F_{sup}$$

Pour une même intensité de pêche  $f_i$ , les composantes du vecteur  $|P_t|$  sont des capturabilités relatives,  $P_t = q_t / q_{sup}$ , dont la répartition selon les âges est également figurée par le diagramme d'exploitation.

Au total, il existe une relation simple entre les vecteurs des mortalités par pêche  $F_t$ , des paramètres  $P_t$  et des capturabilités  $q_t$ , et l'intensité de pêche  $f_i$  déployée au cours de l'intervalle:

$$|F_t| = |P_t| \cdot F_{sup} = |P_t| \cdot q_{sup} \cdot f_i$$

Le coefficient  $F_{sup}$  apparaît ainsi comme une mesure relative de l'intensité de pêche globale. Soit alors  $f_r$  l'intensité de pêche de référence exercée au cours de l'intervalle à la fin duquel  $|F_t|$  est ajusté. Pour un même diagramme d'exploitation caractérisé par un certain vecteur  $|P_t|$ ,  $q_{sup}$  étant une constante par hypothèse, le résultat d'une multiplication de  $F_{sup}$  par un facteur  $mf$  (notation de PAULIK et BAYLIFF, 1967) est représentatif en valeur relative de l'effet d'une multiplication de l'intensité de pêche  $f_r$  ou du vecteur des coefficients  $F_t$  par le même facteur. Cela s'écrit:

$$\hat{F} = mf \cdot F_{sup,r} = mf \cdot q_{sup} \cdot f_r = mf' \cdot f_r$$

$$|\hat{F}_t| = |P_t| \cdot \hat{F}$$

Dans cette deuxième équation, le vecteur  $|\hat{F}_t|$  caractérise un nouveau régime d'exploitation résultant d'un diagramme d'exploitation donné par  $|P_t|$  et d'une intensité de pêche globale dont  $\hat{F}$  est une mesure relative.

Pour le reste, le modèle est, comme celui de RICKER, basé sur une utilisation simple des équations de capture et de survie, la phase recrutée étant découpée en intervalles de durée quelconque sur lesquels les paramètres sont supposés constants. Si, sur un de ces intervalles, les membres d'une cohorte appartiennent au groupe d'âge  $t$ , l'effectif de ce groupe survivant en début d'intervalle est, à l'équilibre, une fraction de  $R$  dépendant de la fonction cumulative de mortalité  $Z(t)$ :

$$Z(t) = \text{Somme}_{t_r}^{t-1} (P_i \cdot \hat{F} + M_i)$$

dans laquelle  $P_i = 0$  pour  $i = t_r$  à  $t_c - 1$ , et:

$$N_t = R \cdot \exp(-Z(t))$$

La contribution du groupe au rendement (en nombre) de la cohorte, i.e. du stock à l'équilibre, est évaluée comme:

$$C_t = \frac{P_t \cdot \hat{F}}{(P_t \cdot \hat{F}) + M_t} \cdot (1 - \exp(-P_t \cdot \hat{F} - M_t)) \cdot N_t$$

La contribution pondérale correspondante,  $Y_t$ , peut être calculée comme le produit de  $C_t$  par une estimation  $\bar{w}_t$  du poids moyen des individus appartenant au groupe d'âge  $t$ ; nous reviendrons ultérieurement sur les problèmes posés par l'utilisation des poids moyens observés.

Le rendement pondéral à l'équilibre peut être calculé, connaissant le diagramme d'exploitation, une mesure  $\hat{F}$  de l'intensité de pêche globale testée et les poids moyens par groupe d'âge, par la somme des contributions élémentaires:

$$Y_E = \sum_{t_r}^{T-1} \left[ \frac{P_i \cdot \hat{F}}{P_i \cdot \hat{F} + M_i} \cdot (1 - e^{-P_i \cdot \hat{F} - M_i}) \cdot N_i \cdot \bar{w}_i \right] + \frac{P_T \cdot \hat{F}}{P_T \cdot \hat{F} + M_T} \cdot N_T \cdot \bar{w}_T$$

Le terme final de cette équation du modèle de JONES correspond à une extinction totale de la cohorte par exploitation intégrale du groupe le plus âgé. Si tel n'est pas le cas, on étend la somme des termes généraux jusqu'à  $i = T$ . En tout état de cause, ce terme entraîne une très faible surestimation du rendement dans le cas où des individus cessent d'être vulnérables au delà d'un certain âge puis disparaissent par mortalité naturelle seule, mais la fraction de  $R$  survivant encore à l'âge  $T$  est généralement trop infime pour contribuer de façon significative, malgré un poids moyen élevé, au rendement total.

Dans ce modèle, comme dans les premières versions de celui de RICKER, la croissance pondérale est estimée simplement à partir des résultats d'échantillonnage. Le principal avantage de cette procédure est qu'elle libère des contraintes et faiblesses de lois explicites de croissance, linéaire ou pondérale, et des limites de leur ajustement. On constate que même des modélisations simples destinées à des interpolations sur des pas de temps convenablement choisis ne donnent pas toujours des ajustements satisfaisants.

L'inconvénient en revanche est que les estimations de poids moyen dépendent du régime d'exploitation en vigueur au moment de l'observation. La relation taille/poids est en effet pondérée par la distribution de tailles dans chaque groupe d'âge observée dans les captures présentes. Mais si, par exemple, on augmente la mortalité par pêche, la probabilité pour que chaque individu atteigne les tailles maximales pour l'âge considéré diminue, et par conséquent la taille moyenne ou le poids moyen observés seront plus faibles. Si donc le régime d'exploitation étudié diffère sensiblement du régime de référence, les poids moyens expérimentaux ne sont plus exacts. Plus grave est le fait que l'on quitte les conditions strictes d'équilibre définies auparavant puisque les paramètres de croissance ne sont plus seulement fonction de l'âge, mais aussi de l'intensité globale de pêche.

Si l'on veut se servir de poids moyens par âge, il convient en outre de distinguer deux cas. L'année étant prise comme unité de temps à titre d'exemple, les paramètres  $C_t$ ,  $F_t$  et  $M_t$  de l'équation des captures sont relatifs à l'"année moyenne"; pour calculer les rendements  $Y_t$ , il faut alors associer à  $C_t$  un poids moyen  $\bar{w}_t$  estimé par échantillonnage des captures de milieu d'année, ou par interpolation. En revanche, le paramètre  $N_t$  des équations de base est l'effectif présent en début d'intervalle (année) et, si l'on veut calculer la biomasse disponible du stock ou d'un groupe d'âge, le poids moyen correspondant doit être estimé en début d'année; mais alors, à moins d'intégrer au modèle un terme de correction pour année moyenne, on ne pourra pas respecter l'associativité dans la relation:

$$Y_t = (F_t \cdot \bar{N}_t) \cdot \bar{w}_t = F_t \cdot \bar{B}_t$$

$\bar{B}_t$  étant la biomasse moyenne du groupe d'âge  $t$ .

### II.3. Présentation et interprétation des résultats.

L'analyse des rendements à l'équilibre à l'aide de modèles comme celui de JONES ou celui de RICKER consiste en l'étude des variations relatives des résultats calculés pour diverses options en  $\hat{F}$ , mesure de l'intensité de pêche globale, i.e. de l'effort de pêche sur un stock occupant une aire constante et pour une unité de temps donnée. Pour un diagramme d'exploitation donné, les différents régimes d'exploitation possibles seront simplement représentés par des modulations du coefficient multiplicateur  $mf$  sur  $F_{sup}$  ou sur l'intensité de pêche de référence voire sur l'ensemble du vecteur mortalité par pêche ou sa norme. L'avantage est de pouvoir ainsi effectuer une représentation plane, les rendements en ordonnée étant portés en fonction des abscisses  $mf$ . On s'attachera à identifier l'état de référence ( $mf = 1$ ) et à rechercher l'abscisse  $mf_{max}$  pour laquelle le rendement pondéral à l'équilibre est maximum, ne serait-ce qu'en valeur relative. On définira alors le paramètre  $\hat{F}_{max}$  proportionnel à l'intensité de pêche globale qui maximise la capture pondérale que l'on peut extraire du stock en situation d'équilibre.

L'ordonnée correspondant à  $\hat{F}_{max}$  ou  $mf_{max}$  sur le graphe est couramment appelée "rendement maximum équilibré" par recrue ou par  $R$  recrues; nous discuterons plus loin des limites de cette notion. Soulignons encore qu'un seul élément du système est maximisé, la capture pondérale, et ceci par l'effet d'une seule variable de contrôle ( $\hat{F}$  ou  $mf$ ) liée à l'effort de pêche, et surtout par référence à un diagramme d'exploitation donné. L'avantage du modèle de JONES est qu'il prend en compte de façon explicite ce diagramme d'exploitation sous la forme du vecteur  $|P_t|$ . On préférera donc l'appellation de "rendement conditionnel (éventuellement maximum) à l'équilibre" (C.I.E.M., 1976).

Ceci n'interdit pas, bien au contraire, de rechercher le diagramme d'exploitation qui, en quelque sorte, maximise le maximum. Il s'agira le plus souvent d'analyser les effets d'un report de l'âge  $t_c$  de première capture. On conserve alors le même recrutement réel  $R$  et on module les paramètres  $P_t$  relatifs à certains groupes d'âge en tenant compte des caractéristiques de sélection; cela modifie, entre autres, le recrutement apparent  $R'$ . Il n'est pourtant pas toujours simple de faire correspondre un nouvel âge  $t_c$  à un nouveau maillage par exemple. Aussi,

pour établir les abaques de rendement équilibré pour divers diagrammes d'exploitation, on portera en abscisse la mortalité globale  $\hat{F}$  ou le multiplicateur  $mf$ , mais on préférera porter en ordonnée la taille  $l_c$  de première capture ou simplement le maillage testé plutôt que l'âge  $t_c$ . Grâce à ces abaques, on peut commencer à parler d'optimisation du rendement en considérant diverses combinaisons ( $t_c$ ,  $mf$ ); l'adoption de l'une d'entre elles sera alors fonction de critères complémentaires d'ordre biologique ou socio-économique.

L'analyse peut porter également sur des cas un peu plus complexes, comme par exemple l'étude du rendement combiné à l'équilibre de deux (ou  $n$ ) composantes, sous-stocks ou engins, caractérisées par des diagrammes d'exploitation différents, à savoir  $t_c$ ,  $|P_t|$  ou  $F_{sup}$  différents, et éventuellement des recrutements inégaux. Le premier exemple est fourni par les stocks pour lesquels, au niveau de l'analyse de cohortes, on distingue les sexes du fait de différences dans les coefficients de mortalité naturelle ou les paramètres de croissance et les capturabilités. Dans un premier temps, on aura tracé les courbes respectives de rendement à l'équilibre pour chaque composante en fonction d'une mesure  $\hat{F}$  de l'intensité de pêche globale qui, à l'évidence, influe simultanément sur les deux sexes. Le problème est alors de ramener les résultats à un même état de référence; or si l'on veut porter les deux courbes selon une même abscisse en  $mf$ , elles ne sont pas à la même échelle puisque:

$$\hat{F} = mf_1 \cdot F_{sup1} = mf_2 \cdot F_{sup2}$$

Pour pouvoir superposer les deux courbes sur un même graphique, la procédure est la suivante. Soit une certaine valeur de  $\hat{F}$  parmi toutes celles qui ont été testées, appliquée à la première composante, elle permet un rendement équilibré  $Y_{E1}$ , et un rendement  $Y_{E2}$  sur la seconde; sur l'axe des coefficients multiplicateurs, l'ordonnée  $Y_{E1}$  correspondra à une abscisse  $mf_1 = \hat{F}/F_{sup1}$  alors que l'on portera  $Y_{E2}$  en regard d'une abscisse différente,  $mf_2 = \hat{F}/F_{sup2}$ . La procédure est répétée pour toutes les valeurs  $\hat{F}$  testées et l'on peut finalement tracer les deux courbes à partir d'une même origine et selon une même échelle d'abscisses. Soit une de ces abscisses  $mf$ , on détermine graphiquement ou par interpolation l'ordonnée  $Y_1$  sur la première courbe, l'ordonnée  $Y_2$  sur la seconde. Si  $Y_1$  et  $Y_2$  ont été calculés respectivement pour  $R_1$  et  $R_2$  recrues, ou si l'on sait que, statistiquement, il y a  $R_1$  mâles recrutés pour  $R_2$  femelles, dans le stock ou la cohorte, le rendement

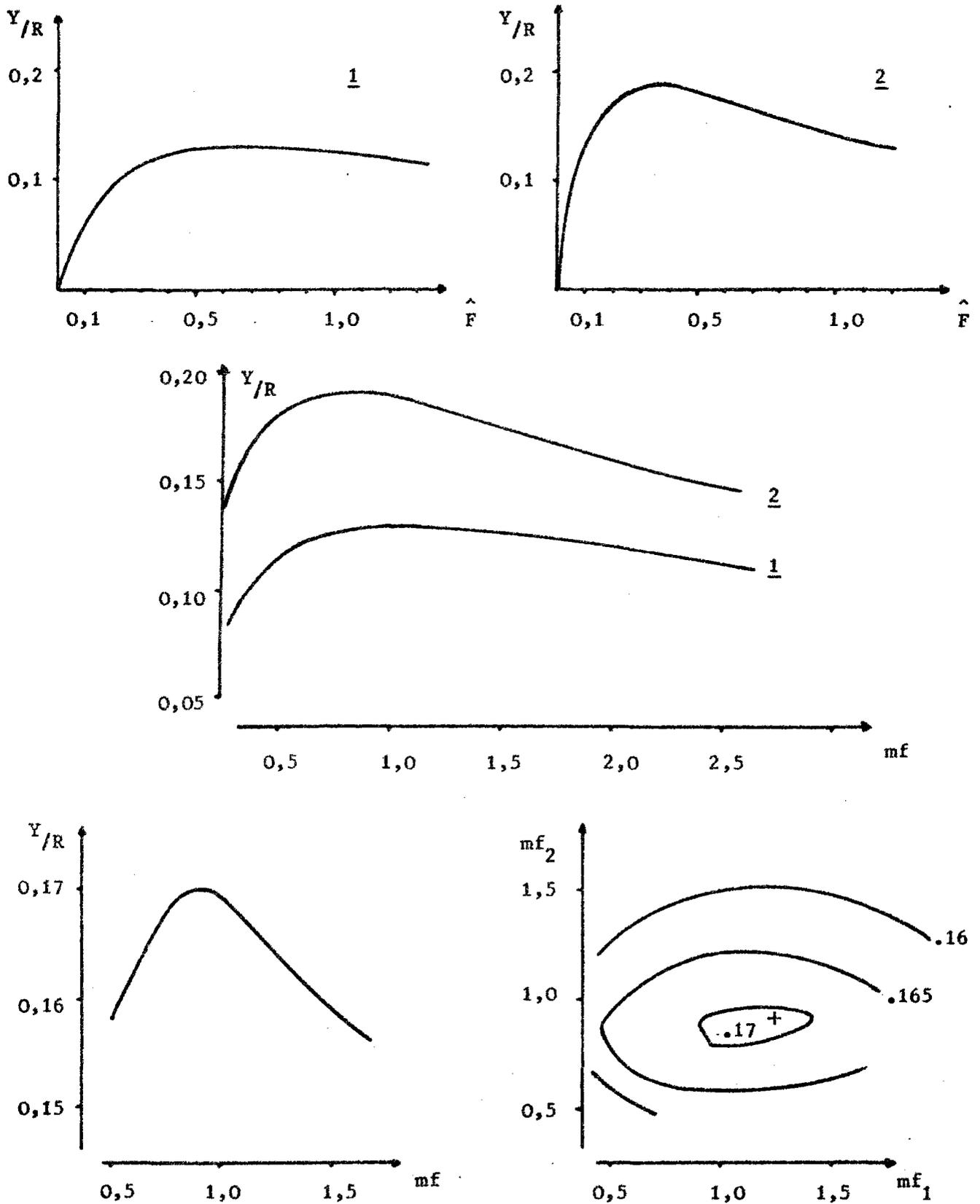


Figure 1 - Analyse du rendement combiné de deux composantes exploitées simultanément (courbe) ou indépendamment (isoplèthes).

combiné des deux composantes pour  $R = R_1 + R_2$  recrues est, pour l'abscisse mf, donné par:

$$Y_{E/R} = \frac{(R_1 \cdot Y_1) + (R_2 \cdot Y_2)}{R_1 + R_2}$$

On procède ainsi pour toute une série de valeurs caractéristiques ou commodes de mf. La méthode peut être élargie à la combinaison de n sous-ensembles identifiables dans le stock.

Dans le même ordre d'idée, une autre analyse intéressante est celle des combinaisons de deux métiers avec leur diagramme d'exploitation respectif. Nous avons précisé en première partie que ceux-ci pouvaient être déduits du diagramme global ajusté par analyse de cohortes par les proportions des captures sur chaque groupe d'âge, dans la mesure toutefois où les deux métiers affectent simultanément des effectifs moyens identiques. Pour l'analyse "en aval", le problème peut être de déterminer un recrutement pour chaque pêcherie sachant que R recrues entrent dans le stock total. Si l'on ne considère que deux métiers, on peut donner une représentation plane des résultats obtenus en modulant leur taux d'exploitation respectivement par un multiplicateur mf1 en abscisse, et un multiplicateur mf2 en ordonnée. Sinon, on peut reconstituer le vecteur des mortalités par pêche correspondant à diverses combinaisons de "plans de pêche"; pour chaque groupe d'âge, on a:

$$F_t = mf1 \cdot F_{1,t} + mf2 \cdot F_{2,t}$$

relation à laquelle s'ajoute, dans le modèle de JONES:  $F_{i,t} = P_{i,t} \cdot F_{sup i}$

A cette occasion, on pourra introduire un critère supplémentaire dans l'analyse en étudiant les variations de rendement à l'équilibre par unité d'effort de pêche et pour R recrues, que ce soit pour l'ensemble d'une pêcherie ou sur le graphe des combinaisons de deux métiers. Cela peut être fort utile pour affiner le diagnostic sur l'état du stock ou pour étudier les coûts d'exploitation.

Enfin, toujours dans le cadre des états d'équilibre, il existe d'autres compartiments du système dont on peut analyser les fluctuations sous l'effet de divers régimes d'exploitation. L'analyse n'est plus faite en termes de capture ou de rendement mais en termes de survie et par conséquent, même si les approches sont très semblables, on ne se réfère plus aux modèles explicités jusqu'ici. Nous préférons donc en traiter dans un paragraphe séparé.

#### II.4. Abondance, biomasse et fécondité à l'équilibre.

Dans le même esprit que les méthodes de JONES ou de RICKER, il est possible d'utiliser simplement les équations du modèle exponentiel, et plus particulièrement l'équation de survie, pour d'autres analyses. Une des plus utiles concerne les effectifs ou les biomasses à l'équilibre.

La contribution de chaque groupe d'âge  $t$  à l'effectif à l'équilibre est donnée comme fonction de la mortalité cumulée par:

$$N_t = R \cdot \exp - \sum_{tr}^{t-1} (P_i \cdot \hat{F} + M_i)$$

équation dans laquelle, conformément aux formules de JONES, nous retrouvons:

$$P_t = \frac{F_t}{F_{sup}} \quad (\text{diagramme d'exploitation de référence})$$

$$\hat{F} = mf \cdot F_{sup}$$

et à l'évidence,  $P_i = 0$  pour  $i = t_r$  à  $t_c - 1$ .

Connaissant le vecteur des poids moyens expérimentaux par groupe d'âge en début d'année, on pourra calculer la biomasse équilibrée correspondante par:

$$B/R = \text{Somme } (N_{t/R} \cdot \bar{w}_t)$$

Selon la fraction à laquelle on s'intéresse, biomasse exploitable, exploitée ou d'adultes seuls, la somme sera calculée à partir des âges (moyens) au recrutement  $t_r$ , de première capture  $t_c$  ou de première maturité  $t_s$  respectivement.

Contrairement à la courbe des rendements, la courbe de biomasse conditionnelle à l'équilibre décroît constamment quand  $mf$  ou  $\hat{F}$  croissent: une exploitation plus intense ne peut que faire diminuer les taux de survie et les biomasses de survivants d'une cohorte. L'examen des variations de cette biomasse parallèlement à celles du rendement pour un même diagramme d'exploitation peut être d'un intérêt déterminant pour la conservation du stock; c'est un bon signal d'alarme, soit parce que l'on veut maintenir un certain niveau de biomasse à l'équilibre par  $R$  recrues, soit parce qu'un certain régime d'exploitation pourra être bénéfique en termes de rendement mais désastreux en termes de survie relative.

Dans ce "modèle" simple de survie, on pourra aussi associer à l'effectif à l'équilibre de chaque groupe d'âge des paramètres de production dont on s'assurera qu'ils sont indépendants de l'abondance du stock mais spécifiques de l'âge. Un de

ces paramètres peut être par exemple une mesure de fécondité, nulle pour tout âge  $t$  inférieur à  $t_s$  puis généralement croissante avec la taille ou l'âge des individus jusqu'à une limite supérieure. Selon la notation de LAUREC (1977) on peut ainsi définir un vecteur (ou un diagramme)  $\{O_t\}$  de production (relative) d'oeufs par femelle du groupe d'âge  $t$ ; si  $SR_t$  est la proportion de femelles dans ce groupe, on calculera la fécondité conditionnelle d'une cohorte, ou du stock à l'équilibre, pour  $R$  recrues par la somme des contributions élémentaires:

$$O_E = \sum_{ts}^T (SR_t \cdot N_t \cdot O_t)$$

On pourra ainsi étudier les variations de  $O_E$  en fonction de  $mf$  et pour divers diagrammes d'exploitation. L'intérêt de cette mesure est toutefois limité du fait que, si la production d'oeufs est parfois un bon indice d'abondance du stock parental, la relation avec le recrutement ultérieur n'est pas toujours évidente. Là encore, elle servira essentiellement de signal d'alarme: il y a un risque certain si un régime d'exploitation entraîne, par rapport à l'état de référence, une chute de la fécondité potentielle. Pour une vue plus synthétique des phénomènes, on représentera les variations de rendement conditionnel et de biomasse d'adultes ou de fécondité conditionnelles à l'équilibre en fonction du multiplicateur  $mf$  sur un même graphique.

## II.5. Production maximale à l'équilibre et relations stock-recrutement.

Jusqu'à présent, nous n'avons envisagé qu'une application simple des modèles structuraux: rechercher les modalités d'exploitation qui maximisent, au moins en valeur relative, le rendement conditionnel. Or ces modèles ont été conçus pour prévoir, en termes quantitatifs, les états du stock et pour définir des mesures de gestion adaptées aux conclusions de l'analyse. On est ainsi amené à passer de l'analyse à la prévision, et à étendre à des situations réelles les conclusions obtenues dans le cadre des situations d'équilibre.

La solution la plus simple est l'extrapolation des courbes de rendement calculées à recrutement constant, qui permet de traduire un rendement en une production. On multiplie donc les ordonnées des courbes par une estimation du recrutement attendu. C'est une simple translation qui conserve toutes les caractéristiques des

courbes et le sens des gains ou pertes à attendre d'une modification des régimes d'exploitation. On définira ainsi la Production Maximum Equilibrée, produit de l'ordonnée maximum, à l'abscisse  $F_{\max}$  ou  $mf_{\max}$ , d'une courbe de rendement équilibré par recrue et d'une estimation de recrutement. Cette notion, mieux connue sous son sigle anglais "M.S.Y." (Maximum Sustainable Yield), a longtemps servi de base aux recommandations des commissions scientifiques et conserve un succès certain auprès des instances administratives en raison d'une prétendue simplicité. En fait, cela n'est vrai que pour ses aspects effectivement les plus élémentaires mais la notion n'est pas exempte de très réels dangers (C.I.E.M., 1976; DAAN, 1977).

Dans le vocabulaire déjà, les termes "équilibré" et "sustainable" introduisent un risque de confusion entre la nécessité d'une projection à long terme, sous-entendue dans la notion d'équilibre telle que nous l'avons définie, et l'existence très hypothétique d'un "niveau d'équilibre" auquel le stock se maintiendrait s'il était indéfiniment exploité avec une intensité de pêche proportionnelle à  $F_{\max}$ .

Définies pour faciliter la résolution des modèles, les hypothèses d'équilibre sont très strictes et de plus pas forcément réalistes, surtout si l'on pense aux très larges fluctuations du recrutement dans la plupart des stocks. En projetant une constance du recrutement à venir, et en préconisant une exploitation au niveau de  $F_{\max}$ , on prend le risque de voir la survie du stock profondément affectée si le succès du recrutement ne se confirme pas sur quelques années consécutives.

Plus grave encore est le danger d'assimilation du maximum, surtout si on le prétend "soutenable", à un optimum absolu. Or nous avons bien précisé que ce maximum n'est défini que pour un critère, la capture pondérale, pour une variable de contrôle et le plus souvent par référence à un diagramme d'exploitation donné, lequel n'est pas forcément le meilleur possible; c'est pourquoi nous avons pris la précaution d'user alors du qualificatif "conditionnel". La mortalité par pêche nominale  $F_{\max}$  étant définie pour le seul critère de rendement à l'équilibre, on néglige l'effet de cette mortalité sur l'évolution de l'effectif ou de la biomasse du stock, et plus particulièrement sur la fraction adulte de ce stock et ses capacités de reproduction. Autrement dit, lorsque l'on admet les hypothèses d'équilibre, on suppose implicitement qu'il n'y a pas d'interaction entre la biomasse du stock de géniteurs et l'effectif au recrutement de leurs descendants, lequel demeure constant quels que soient les régimes d'exploitation testés.

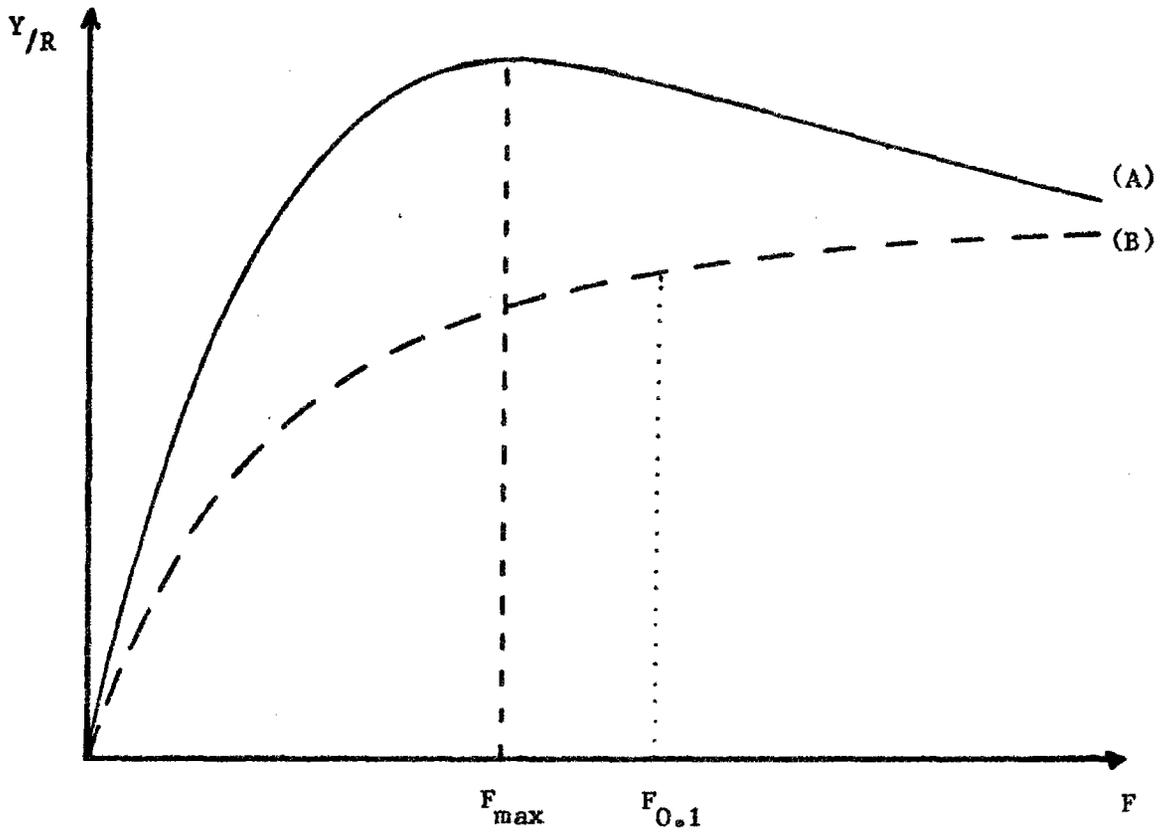
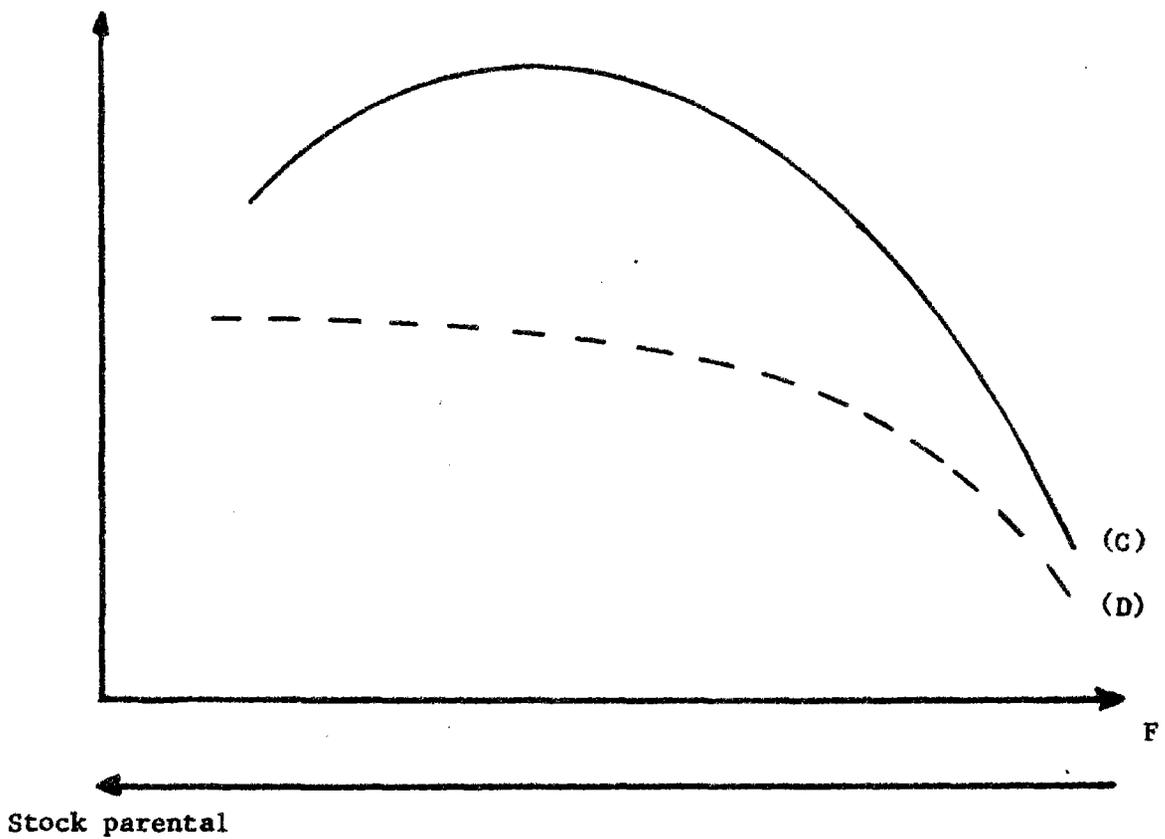


Figure 2 - Distributions schématiques du rendement par recrue (ci-dessus) et de l'interaction stock-recrutement (ci-dessous) en fonction de la mortalité par pêche  $F$ .



De fait, il est exceptionnel qu'une telle interaction dite de stock-recrutement ait pu être caractérisée avec certitude. Une foule de phénomènes naturels intervient entre ponte et recrutement et rend ce dernier extrêmement fluctuant. Pour identifier la loi mathématique décrivant la relation stock-recrutement et ajuster ses paramètres, il faudrait en outre pouvoir observer de très amples variations des stocks parentaux. Or on observe généralement une relative stabilité; par conséquent il existe une vaste dispersion des points observations en ordonnée (recrutement) sur une échelle restreinte en abscisse (stock parental) et il est difficile de déceler des tendances. Tout au plus peut-on être certain que les courbes représentatives de cette relation passent par l'origine (pas de descendance s'il n'y a pas de parents) et qu'il existe une limite finie pour certains niveaux supérieurs de biomasse parentale.

Sans aller plus loin dans le détail, nous voudrions montrer ici quelle peut être l'importance d'une relation stock-recrutement dans l'interprétation d'une analyse à l'équilibre. Pour cela, nous nous référons à la figure 2. Dans la partie supérieure, nous avons représenté deux courbes types de production équilibrée (extrapolation de courbes de rendement par recrue) en fonction de la mortalité par pêche globale. La courbe (A) présente un maximum net, la courbe (B) un plateau. En dessous, nous suggérons très schématiquement deux profils de relations entre recrutement et mortalité par pêche exercée sur le stock, en rappelant par un deuxième axe d'abscisse qu'une augmentation de la pression de pêche équivaut à une diminution du stock parental; nous avons ignoré à dessein les mécanismes pouvant intervenir quand le stock est très abondant ou peu exploité. La courbe (C) a un profil en dôme, type RICKER, la courbe (D) montre une croissance continue jusqu'à un palier, type BEVERTON et HOLT.

Quand on cherche à déterminer des options de gestion à long terme en combinant une courbe de rendement équilibré par recrue et une prévision de recrutement, la production en valeur absolue correspondante est, pour toute abscisse F, calculée comme produit de l'ordonnée d'une des courbes (A) ou (B) de rendement par celle d'une courbe (C) ou (D) de recrutement. On va ainsi distinguer trois cas:

1) Si la relation stock-recrutement obéit à une loi de type (D), le recrutement reste stable, sans tendance exagérée, pour une large gamme de taux d'exploitation. C'est la relation implicitement admise par les hypothèses d'équilibre.

Le maximum des productions, "produits" (A)x(D) ou (B)x(D), coïncidera certainement avec le maximum de (A) ou de (B) respectivement, aux abscisses  $F_{\max}$  ou  $F_{0,1}$ .

2) Le rendement par recrue varie selon une courbe (B), le recrutement selon une courbe (C). Le premier conserve des valeurs stables en dépit de variations notables des abscisses F, et il faut même recourir à un artifice du type  $F_{0,1}$  pour dégager un maximum. Réciproquement, de faibles dépassements de la production maximum se traduisent en abscisse par de forts accroissements de la pression de pêche et, par référence à la courbe (C), par une dégradation du recrutement. Incontestablement la meilleure option de gestion à long terme consiste à maximiser le recrutement; du même coup, la production sera maximisée. Si, en retour, la biomasse de géniteurs survivants permet de maintenir le recrutement ultérieur dans la zone du maximum, cette option concilie à la fois les impératifs de production et de survie à long terme. Il y a danger certain en revanche de ne considérer que la maximisation du rendement.

3) Si l'on admet l'éventualité d'un produit (A)x(C), la détermination de la pression de pêche optimale va dépendre de la distribution relative des points sur les deux courbes. Mais vu la différence des échelles en ordonnées (fractions de kilogramme sur la première, millions d'individus sur la seconde), il est très probable que la meilleure option à terme consiste à viser un recrutement équilibré maximum, plutôt qu'un rendement maximum.

Il apparaît donc bien qu'une gestion basée sur la Prise Maximum Equilibrée n'est appropriée qu'au premier cas. En revanche, dans les deux autres hypothèses, préconiser une intensité de pêche proportionnelle à  $F_{\max}$  expose à un risque de dégradation du stock et du recrutement. Autrement dit, il est très incertain de fonder une prévision ou une gestion sur une analyse de situation d'équilibre, avec ce que cette notion comporte comme limites et comme inconvénients, surtout si la forme de la relation stock-recrutement n'a pu être mise en évidence.

Les analyses à l'équilibre conservent malgré cela un intérêt indéniable. Les modèles permettent de synthétiser les données et d'examiner le fonctionnement de certains compartiments du système sous l'effet de facteurs sélectionnés, toutes choses restant égales par ailleurs. Ils sont un moyen de standardiser les procédures: répétées d'année en année, les analyses effectuées sur les mêmes bases donnent des indications précieuses sur les tendances. Elles fournissent en outre

une aide au diagnostic, en termes semi-quantitatifs, sur le signe de l'interaction mortalité-croissance, ou sur le sens des mesures à adopter pour ramener le taux d'exploitation vers l'orbite du rendement maximum équilibré. Quoi qu'il arrive, ce dernier correspond à la mortalité par pêche grâce à laquelle on peut tirer le meilleur bénéfice pondéral d'un recrutement, quelle que soit l'importance de ce dernier. Mais, pour définir des modalités de gestion, on poursuivra l'analyse en faisant appel à des méthodes qui prennent en compte les variations historiques, puis prévisibles à court terme, du recrutement et des régimes d'exploitation.

### III - PREDICTION DE CAPTURES PAR SIMULATION.

Les projections à l'équilibre ne donnant qu'une image incomplète des états futurs du stock, on est amené à bâtir de nouvelles hypothèses qui admettent que chaque cohorte présente à un moment donné a eu, et aura, une histoire singulière. A cette particularité près, les méthodes d'analyse et de prévision que nous allons examiner reposent sur des concepts et principes communs, pour la plupart, avec ceux des situations d'équilibre, mais cette fois appliqués dans un cadre élargi. L'approche structurale est conservée, ainsi que la loi de décroissance exponentielle négative des effectifs de cohortes avec le temps; les calculs restent donc basés sur les équations de capture et de survie explicitées auparavant.

En phase d'analyse, on peut éventuellement faire intervenir des phénomènes plus complexes que la seule production, qu'ils soient d'ordre biologique (fécondité, relation stock-recrutement, prédation ...) ou socio-économique, dans la mesure toutefois où les paramètres qui en décrivent les variations ou les effets peuvent être ajustés. Pour des prédictions, et c'est à dessein que nous adoptons ce terme qui laisse place à la conjecture, on exigera en outre que les valeurs adoptées pour les paramètres aient quelque probabilité de se réaliser.

Un moyen pratique de lever les indéterminations sur les variables est d'affecter à chacune une série de valeurs vraisemblables et de simuler par calcul l'effet des diverses combinaisons possibles. Il sera fait appel au jugement de l'analyste pour décider des options qui méritent un examen approfondi. La masse de calculs

qu'implique cette technique est parfois imposante malgré une sélection des paramètres liée à la validité des données; elle ne devrait plus être un obstacle compte tenu de la facilité de programmation des relations.

### III.1. Sélection des données.

Considérant ici le problème des prédictions, nous devons avant tout définir un état initial du stock, tel qu'il ressort des observations effectuées au cours d'une période de référence à choisir parmi les plus récentes. Cet état se caractérise par une composition en groupes d'âge dont les effectifs sont les fractions survivantes du recrutement dans chacune des cohortes correspondantes, soumises jusque là à des régimes d'exploitation variables. Pour ajuster le vecteur  $\{N_c\}$  des effectifs de groupes d'âge  $t_c$  à  $T$  (valeurs de référence), la méthode la plus appropriée est sans doute l'analyse de cohortes, avec une réserve toutefois: les paramètres relatifs aux périodes les plus récentes sont, dans cette méthode, sujets aux erreurs commises sur les paramètres d'initialisation et il est indispensable de les recouper avec des évaluations indépendantes obtenues grâce à des procédures complémentaires (cf. MESNIL, 1980). Rappelons aussi que l'analyse se fonde sur des données de captures observées; l'estimation d'effectif du groupe le plus jeune correspond donc à un âge  $t_c$  expérimental, c'est le sens de notre parenthèse ci-dessus, et représente donc ce que nous avons appelé un recrutement apparent ( $R'$  et non  $R$ ).

Si l'on veut simuler des variations de l'âge de première capture, il faut alors se donner une estimation de l'effectif réel au recrutement pour toutes les périodes incluses dans l'échéance de prédiction, y compris la période de référence. Pour certains stocks, cette estimation est obtenue grâce à des méthodes d'évaluation directe utilisées en routine pour affiner les résultats d'analyses de cohortes. Les pêches expérimentales, par exemple, fournissent des indices relatifs d'abondance des groupes d'âge ou des cohortes que l'on s'efforce de calibrer par corrélation avec les effectifs correspondants calculés par analyse de cohortes sur les périodes où celle-ci "converge" de façon satisfaisante. L'importance d'une évaluation correcte des effectifs initiaux sera soulignée dans la suite de la discussion.

Si l'on s'en tient à une prédiction simple de captures, les autres paramètres nécessaires sont connus et ont été déjà utilisés pour les analyses à l'équilibre. Ce sont en premier lieu la mortalité naturelle  $M$ , ou les vecteurs de ses valeurs variables selon les âges ou les années, et les paramètres de la fonction de croissance ou les poids moyens par groupe d'âge.

Il s'agit en second lieu du vecteur des mortalités par pêche  $|F_t|$  pour les groupes d'âge  $t_c$  à  $T$  (diagramme d'exploitation de référence). Plus intéressant peut être serait le vecteur  $|q_t|$  des capturabilités par groupe d'âge, dont les éléments seraient déterminés par le rapport des coefficients  $F_t$  de mortalité par pêche sur l'intensité de pêche globale déployée au cours d'une même période. L'ajustement peut être effectué à partir d'une série de vecteurs  $|F_t|$  déterminés par analyse de cohortes sur la zone de convergence, auxquels on peut associer des estimations correctes de l'intensité de pêche contemporaine, ou grâce à des méthodes plus complexes d'analyse multicohorte (DOUBLEDAY, 1976; POPE, 1974). Si l'on veut moduler l'âge  $t_c$  par rapport à l'état de référence, il faut tenir compte des variations de capturabilité et des caractéristiques de sélection relatives à certains groupes d'âge. Une fois fixé un diagramme de capturabilités, on conserve l'hypothèse que celles-ci sont indépendantes de la taille du stock et restent constantes dans le temps tant que les caractéristiques des flottilles (engins et puissances de pêche) ne sont pas modifiées. Ainsi, en simulant une intensité globale de pêche, on déduira aisément le vecteur  $|F_t|$  du vecteur  $|q_t|$ .

La technique de simulations est par essence assez souple pour admettre que d'autres compartiments du système soient pris en compte (FONTENEAU, 1977). Si éventuellement une relation stock-recrutement a pu être ajustée, on pourra moduler les estimations de recrutement prévisible par inférence de la biomasse parentale calculée en première itération (système autorégénérant). De nombreuses tentatives sont faites actuellement de déterminer des "fourchettes" par simulations parallèles sur des modèles stochastiques de recrutement; ce dernier peut, suivant les hypothèses, fluctuer autour de niveaux moyens dépendants ou indépendants de la biomasse parentale. Ces études sont une contribution heureuse au problème crucial de prédiction de l'effectif recruté, mais il est difficile de juger de la vraisemblance des estimations calculées et il convient de les considérer avec les précautions d'usage à l'égard de toute simulation.

De la même façon, on peut amender les valeurs prédites de production pondérale ou de survie s'il s'avère que les paramètres de croissance ou les coefficients de mortalité naturelle des individus considérés sont fonctions de la taille du stock lui-même ou d'un stock prédateur ou proie. Il suffit une fois encore que les phénomènes soient correctement modélisés.

### III.2. Simulations de captures à court terme.

Pour expliciter la procédure utilisée dans les prédictions simples, nous nous référons à la figure 3. Les paramètres relatifs à la période de référence, état initial, étant connus, la première étape consiste en l'évaluation du nombre de survivants de chaque groupe d'âge ou cohorte à la fin de cette période  $r$ , c'est-à-dire en début de la première période couverte par la prédiction. Il suffit d'appliquer l'équation de survie à tous les effectifs  $N_t$  de début de période  $r$  connaissant les coefficients de mortalité  $F_t$  (ajustés, comme les  $N_t$ , par analyses de cohortes) et  $M_t$ .

Cette opération, passage de l'observation à la prédiction, s'accompagne d'un décalage obligatoire du rang des groupes d'âge qui fait apparaître deux cas particuliers. Le premier concerne le groupe d'âge le plus élevé: s'il s'agit d'un groupe simple, on peut soit augmenter la dimension des vecteurs soit négliger le devenir de la cohorte. S'il s'agit d'un groupe "+", l'effectif survivant s'ajoute à celui du groupe d'âge  $T-1$  de la période  $r$ .

Plus important est ce qui se produit à l'autre extrémité de l'échelle des âges. Dès cette première étape, il manque l'effectif du groupe le plus jeune, d'âge  $t_c$  ou  $t_r$  suivant les données du problème. Il faut donc injecter une estimation du recrutement  $R_n$  ( $n = r+1$ ) ou du recrutement apparent  $R'_n$ . Pour une explication plus claire, il faudrait disposer d'un cas concret: tout dépend en effet du laps de temps qui sépare le recrutement de la première capture,  $t_r$  de  $t_c$ , et  $R'_n$  est l'effectif survivant d'un recrutement  $R$  survenu ( $t_c - t_r$ ) périodes auparavant. Ce dernier n'apparaîtra dans le tableau des données que si le laps de temps est assez bref. A défaut de pouvoir calculer  $R'$  à partir du recrutement réel  $R$  de la même cohorte, on cherchera à le déterminer par observation directe.

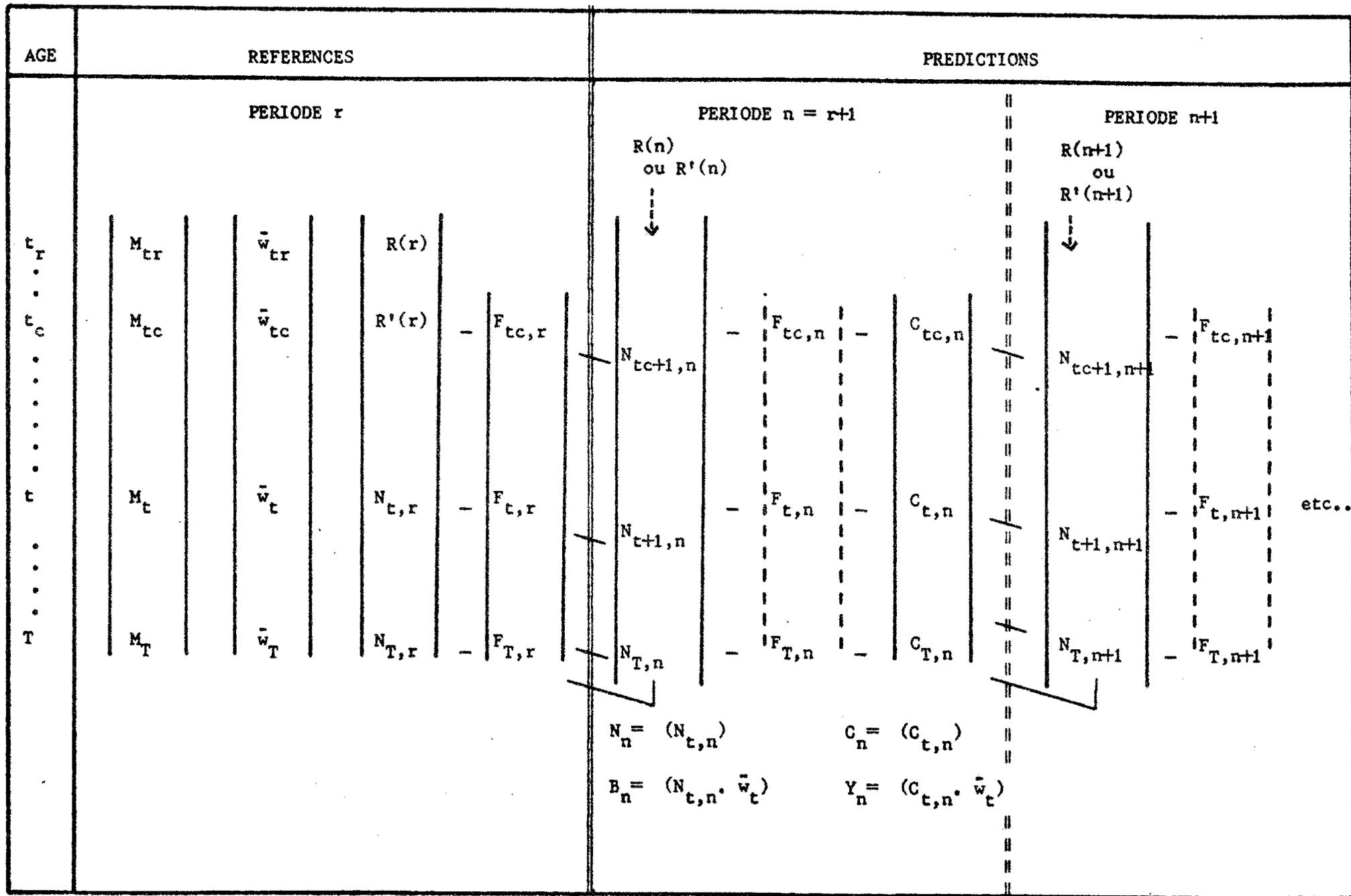


Figure 3 - Données et procédures d'une simulation simple de production et survie.

A partir de l'état du stock évalué en début de période  $n$ , on peut simuler l'effet de régimes d'exploitation variables, caractérisés par diverses options sur les éléments du vecteur  $\{F_t\}_n$ . En appliquant l'équation des captures à chaque cohorte, on estime le vecteur  $\{C_t\}_n$  des captures en nombre résultant; connaissant la fonction de croissance pondérale, on en déduit le vecteur  $\{Y_t\}_n$  des captures en poids, dont les éléments sont définis par:

$$Y_{t,n} = C_{t,n} \cdot \bar{w}_t$$

La somme de ces éléments entre les âges  $t_c$  et  $T$  est l'estimation de production pondérale totale du stock prédite sur la période  $n$ , pour une intensité de pêche  $f_n$  et un diagramme d'exploitation simulés. En général, ce dernier est défini en valeur relative par rapport au vecteur  $\{F_t\}_r$  de la période de référence, et l'intensité de pêche  $f_n$  est proportionnelle à la norme du vecteur  $\{F_t\}_n$  simulé donc multiple de l'intensité de pêche de référence  $f_r$ .

A chaque option sur le diagramme d'exploitation correspond également un taux de survie dans les cohortes exploitées; l'équation de survie permet d'estimer le vecteur  $\{N_t\}_{n+1}$  des effectifs survivants en fin de période  $n$ , début de période  $n+1$ , avec le décalage de rang des groupes d'âges explicité précédemment. Tout autant que par la production, on est intéressé dans cet exercice par la conservation du stock en terme de biomasse de survivants. Suivant les âges pris en compte, les sommes d'éléments des vecteurs  $\{N_t\}$  sont un effectif total du stock survivant, ou celui de la fraction exploitée, voire celui de la fraction adulte; les deux premières doivent inclure les estimations de recrutement, respectivement réel ou apparent, simulé pour le début de la période correspondante. Connaissant le vecteur des poids moyens par âge relatifs aux débuts de périodes, on peut faire correspondre à ces sommes les biomasses respectives et étudier leurs variations sous l'effet des différents régimes d'exploitation simulés.

Pour certains stocks, on envisage des situations un peu plus complexes dans lesquelles des pêcheries agissant spécifiquement sur certaines fractions sont prises isolément. Au lieu de considérer un diagramme d'exploitation unique et des multiples de tous ses éléments, on cherche à reconnaître dans le vecteur  $\{F_t\}_r$  de référence des composantes liées aux différents métiers; la résolution se fait, comme nous l'avons déjà signalé, dans la proportion de la capture  $C_{t,j}$  du métier  $j$  sur la capture totale  $C_t$ . On estime ainsi les diagrammes d'exploitation élémentaires spécifiques de chaque métier, après quoi on peut simuler des variations

de la stratégie de pêche: composition des flottilles, variations du maillage ou de l'effort sur tel ou tel métier. C'est ainsi que l'on analyse certains stocks de Mer du Nord en distinguant d'une part les pêcheries dites "industrielles" à la senne et petit maillage (Recommandation 2), d'autre part les pêcheries pour la consommation humaine avec distinction des débarquements et des rejets. Parmi les scénarios possibles, citons: augmentation d'effort général, ou des pêcheries de consommation au détriment des pêcheries industrielles avec plusieurs cas liés aux maillages (conservation ou altération de la proportion des rejets), interdictions saisonnières ou locales (effets sur des structures démographiques particulières), etc ... La production prévisible dans chaque cas est la somme des contributions réalisées par chaque métier sur chaque groupe d'âge; les taux de survie peuvent être calculés après reconstitution du vecteur de mortalité totale.

Quelle que soit la complexité des situations décrites, on retrouve en fin de simulation un nouvel état du stock, déduit de l'état de référence, et caractéristique du début de période  $n+1$ . Pour des prédictions sur cette période  $n+1$  et au delà, on répète exactement les mêmes procédures: entrée d'un recrutement  $R$  ou  $R'$  dans la case laissée vide après incrémentation du pas de temps, simulations de diverses modalités de pêche définies relativement à la période immédiatement antérieure ou à la période de référence, sur les effectifs survivants.

Si pour une analyse du stock à moyen terme il est effectivement possible de prolonger les échéances de prédiction, de simuler toutes les situations possibles du point de vue recrutement et mortalités par pêche, il est évident que, pour une prédiction destinée à l'aménagement du stock, seules doivent être retenues les options dont la réalisation est probable. Autrement dit, on restreindra l'échéance de prédiction aux périodes pour lesquelles les données présentes permettent un contrôle précis des valeurs de paramètres simulés.

Généralement, le paramètre limitant est le recrutement ( $R$  ou  $R'$ ) prévisible. On a vérifié que les mesures directes de l'effectif pré-recruté ou pré-exploité ne sont utilisables que si l'observation est effectuée aussi tôt que possible avant l'entrée des cohortes dans la pêcherie. Ainsi par exemple, une mesure d'abondance du groupe 0 n'est utilisable pour une inférence du recrutement apparent que si l'âge  $t_c$  est peu différent de 1; si en revanche l'exploitation débute

sur les groupes 2 ou 3, l'effectif  $R'$  constaté a posteriori risque d'être fort différent de la valeur prédite à partir de l'évaluation directe, la mortalité juvénile et les accidents écologiques ayant tout loisir d'infirmier la corrélation. En attendant des progrès décisifs dans l'ajustement des modèles déterministes ou stochastiques d'interaction stock-recrutement, la méthode reste la plus adéquate en pratique, mais on restreindra son emploi à un contrôle du recrutement à court terme. A défaut de données, il est courant d'adopter une valeur moyenne du recrutement (apparent) calculée sur sa distribution historique estimée par analyse de cohortes. Ce n'est qu'une solution de précaution mais la moyenne n'a aucune valeur prévisionnelle; cela revient à considérer un recrutement stable et l'on est à nouveau confronté aux limites des projections à l'équilibre.

Le second paramètre limitant est la mortalité par pêche. A l'évidence, il ne sert à rien de simuler une baisse de l'effort de pêche si de nombreux navires neufs sont prêts à être lancés, ou si l'on ne met pas effectivement en oeuvre les mesures réglementaires et les moyens de contrôle assortis; et réciproquement. De même, pour une intensité de pêche globale testée, on ne pourra déduire le vecteur des mortalités par pêche  $F_t$  du vecteur des capturabilités que si ce dernier n'est pas altéré par l'adoption prévisible de nouveaux engins, par des variations des puissances de pêche, ou par une nouvelle distribution des flottilles ou des métiers dans les pêcheries. L'hypothèse de constance des capturabilités au cours du temps ne peut donc être admise que pour de brèves échéances.

Dans un autre ordre d'idées, il ne faut pas sousestimer le rôle des erreurs commises lors de l'ajustement des états initiaux, et en particulier des effectifs par groupe d'âge dont vont dépendre tous les résultats de simulations. C'est le sens des critiques formulées par POPE et GARROD (1975) à l'égard de cette utilisation des résultats d'analyses de cohortes relatifs aux périodes récentes, très sensibles aux erreurs. Ces dernières résultent du choix erroné de certains paramètres, mortalité(s) naturelle(s) surtout, d'une mauvaise ventilation des captures par âge (erreurs d'échantillonnages) et, nous l'ajoutons, d'une estimation biaisée de ces captures qui, dans une majorité de cas, ne sont que la fraction débarquée et il manque la part des rejets.

Comme l'indique FONTENEAU (1977), on devrait pouvoir confronter les résultats de simulations aux observations ultérieures. Mais, contrepartie d'hypothèses moins sévères, la simulation n'obéit pas à des procédures standardisées comme dans le cas des modèles à l'équilibre, et ne vaut que par l'exactitude des estimations de paramètres; il faut pouvoir juger de la validité des données. A la limite, une solution serait d'assurer un recouvrement entre les échéances de prévision et des périodes sur lesquelles on pourrait effectivement vérifier les résultats intermédiaires; cette procédure est cependant difficilement compatible avec les impératifs de courts termes et de constance contrôlée des variables. Dans les groupes de travail du C.I.E.M., production et effectifs survivants sont généralement prévus sur échéances de deux années, la première étant celle au cours de laquelle le groupe se réunit; on peut ainsi amender les résultats partiels (année n) en fonction des informations les plus récentes et, l'année suivante, réviser les conclusions relatives à l'année n+1.

En contrepartie d'une limitation au court terme pour lequel elle est fiable, la technique de simulation s'avère particulièrement appropriée à l'analyse des états de transition entre régimes d'exploitation bien caractérisés. On fixe alors certains paramètres ou on les prend en valeurs relatives, et on observe les effets des variables de contrôle sur chaque cohorte avec ses caractéristiques spécifiques. L'analyse ainsi réalisée sera toujours plus réaliste, plus prévisionnelle, que celle des situations d'équilibre, quelque peu artificielles.

### III.3. Présentation et interprétation des résultats.

Pour synthétiser les résultats de simulations, on a avantage à en donner des représentations inspirées de celles des rendements équilibrés. La plus simple consiste à porter les variations de la production prédite sur la période n en fonction de l'intensité de pêche globale simulée, exprimée en valeur absolue ou relativement à une valeur de référence sous forme d'un multiplicateur mf. Il est évident que l'on a avantage à adopter la même période de référence que celle déjà choisie pour les analyses à l'équilibre.

Si, outre des variations d'effort de pêche, on a simulé des modifications des diagrammes d'exploitation, on dressera les isoplèthes de production calculée pour divers multiplicateurs mf portés en abscisses, et les âges  $t_c$ , les tailles  $l_c$  ou

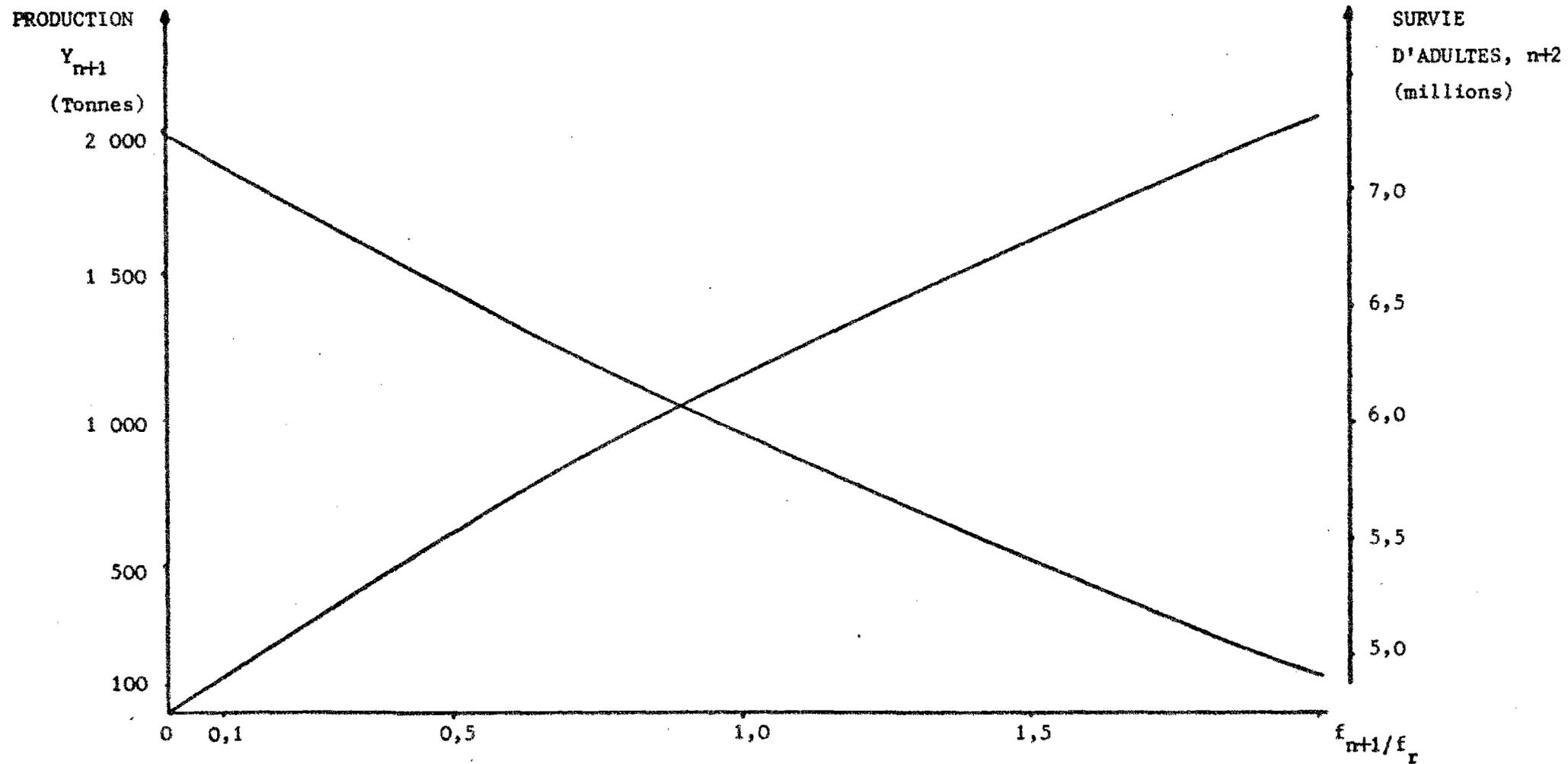


Figure 4. Courbes de résultats d'une simulation: production  $Y_{n+1}$  et survie en début de période  $n+2$ .

les maillages en ordonnée. Si l'on a distingué les métiers avec leur diagramme d'exploitation spécifique, on peut représenter leurs interactions deux à deux par des isoplèthes de production en fonction de multiplicateurs respectifs  $mf_j$  et  $mf_k$ . Cette fois, les problèmes de recrutement ne sont plus liés aux conditions d'équilibre, mais si l'on veut démontrer l'effet de modulations de l'effort exercé par chaque métier, on doit admettre qu'une proportion constante du recrutement total est disponible à chacun.

Si l'on se sert des simulations pour des analyses à long terme des états de transition, une représentation chronologique est mieux adaptée pour juger des conséquences des options envisagées.

Pour en revenir au cas simple de prédiction de production  $Y_n$  en fonction de  $mf_n$  global, on note que les courbes de production ont un profil sensiblement différent de celui des courbes de rendement équilibré (ou de production équilibrée, après extrapolation). Sur l'intervalle des valeurs concrètement admissibles des multiplicateurs, la production croît de façon continue avec  $mf_n$ ; on ne peut donc pas déceler de maximum. Si l'on se préoccupe uniquement d'accroître la production, on se réfère alors aux conclusions de l'analyse à l'équilibre: on identifie sur la courbe les ordonnées correspondant à l'état de référence ( $mf = 1$ ) et au rendement maximum ( $mf_{max}$  ou  $mf_{0,1}$ ). La production maximale ainsi estimée intègre les variations de recrutement et de taux d'exploitation des cohortes; elle peut ainsi paraître plus exacte, mais aucun des dangers signalés à propos du "M.S.Y." n'est pourtant écarté.

Il devient alors impératif d'analyser les variations de biomasse, totale mais surtout parentale, survivant en fin de période  $n$ , après prélèvement de  $Y_n$ , sous l'effet des régimes d'exploitation simulés. Il est recommandé de tracer les variations de production et de biomasse d'adultes sur une même figure, avec un axe d'abscisses commun; d'un même coup d'oeil, on peut ainsi évaluer l'effet d'une mesure tant en terme de production qu'en terme de survie de géniteurs. Rappelons toutefois que la biomasse de survivants ne peut que diminuer quand on augmente la pression de pêche par rapport à un état de référence; précisons aussi que le point d'intersection entre courbe de production et courbe de biomasse n'a aucune signification particulière, les échelles d'ordonnées étant arbitraires et indépendantes.

## CONCLUSION:

### CRITERES ET OBJECTIFS DE L'AMENAGEMENT D'UN STOCK

La gamme des mesures concrètement envisageables pour régler l'exploitation d'un stock est extrêmement restreinte: on ne connaît guère que les limitations de l'effort de pêche, dans l'espace ou dans le temps, des quantités totales capturées ou débarquées et la définition de maillages ou de tailles au débarquement minimums. Pourtant chacune de ces trois mesures peut avoir une signification très différente selon l'objectif qui est recherché à terme. Ce dernier peut être associé à 3 critères de conservation:

#### 1. Production pondérale.

L'analyse des rendements conditionnels à l'équilibre permet de définir (le multiplicateur de) l'intensité de pêche, proportionnelle à la mortalité par pêche globale  $F_{max}$ , pour laquelle le rendement du stock exploité est maximum, quels que soient les effectifs au recrutement. D'autres combinaisons d'intensité de pêche et de diagramme d'exploitation peuvent permettre des rendements équivalents au maximum, ou être adoptées pour un meilleur compromis avec des impératifs socio-économiques. La simulation permet d'évaluer, sur la base des états récents du stock, la capture totale prévisible à court terme si l'exploitation se fait en accord avec les régimes ainsi définis.

L'option d'une exploitation au niveau de  $F_{max}$ , visant donc à un maximum de capture, ne peut être raisonnable à terme que s'il n'y a pas d'interaction significative entre la biomasse de géniteurs et le recrutement, autrement dit que si la mésexploitation n'est supposée relative qu'à la croissance; un cas fortuit serait la coïncidence de  $F_{max}$  avec le taux d'exploitation pour lequel le recrutement à venir est dans la zone du maximum. Si tel n'est pas le cas, et plus particulièrement encore si la courbe de rendement équilibré présente un plateau, il est impératif de se préoccuper des conditions de recrutement; en maximisant le recrutement, on maximisera alors la production à coup sûr et pour longtemps. Si l'on ne dispose d'aucune indication sur la relation stock-recrutement, des simulations portant sur les captures, les taux de survie et divers niveaux probables de recrutement devraient permettre d'infléchir la décision au profit de la production ou

de la survie de géniteurs. L'alternative se complique quelque peu lorsque l'on se trouve en présence d'une cohorte particulièrement "forte": doit-on en profiter pour accroître la Prise Maximale Autorisée, ou plutôt maintenir un effort modéré pour que les membres de la cohorte aillent conforter le stock de géniteurs ? La première solution plait aux administrations qui démontrent ainsi qu'elles savent accéder aux prières des administrés; les scientifiques sont plus réservés car recommander des P.M.A. en dents de scie est extrêmement néfaste à leur crédibilité.

## 2. Biomasse d'adultes.

Constamment décroissantes quand la pression de pêche augmente, les courbes de variation de la biomasse parentale ne peuvent suffire à fonder un avis, sauf s'il s'avère que certains diagrammes d'exploitation, par le choix d'âges de première capture, sont plus profitables en terme de survie. Pour ce critère aussi, l'existence d'une relation stock-recrutement est cruciale. Si le niveau de recrutement est une fonction directe de la biomasse de géniteurs, il est certainement avantageux à terme de le maximiser; cette option s'impose encore plus nettement si l'on constate une tendance à la baisse du recrutement moyen. L'intensité de pêche, ou la P.M.A. correspondante, pour laquelle cet objectif peut être atteint dans des délais raisonnables seront déterminées grâce aux techniques de simulation. On s'assurera tout de même qu'en retour ce recrutement conforté détermine une biomasse parentale stable, redonnant un recrutement proche du maximum.

Dans tous les cas où une interaction entre biomasse de géniteurs et recrutement ultérieur n'a pas pu être mise en évidence, une précaution s'impose pour éviter le risque d'une surexploitation relative au recrutement: on ne laissera pas la biomasse d'adultes diminuer en deçà d'une valeur minimum ou moyenne, estimée retrospectivement par analyse de cohortes, dont on a la preuve concrète qu'elle a assuré un recrutement décent. Cette précaution résulte du fait que l'on peut rarement estimer l'effectif réel au recrutement, que l'on ne dispose pas de variations d'ampleur suffisante de la biomasses d'adulte pour ajuster la relation stock-recrutement, et que par conséquent on ne peut exercer un contrôle direct du recrutement; c'est pourquoi nous ne le prenons pas ici comme critère.

### 3. Biomasse totale.

Il paraît trivial d'affirmer qu'une gestion de stock doit pour le moins viser le maintien d'une certaine biomasse exploitable. Si l'on exclut la préoccupation de survie à long terme du stock, cet objectif ressort à la limite du domaine économique plus que du domaine biologique: la densité du stock sur son aire de répartition ne saurait décroître à un point tel que la moindre capture exige une intensité de pêche démesurée et, partant, coûteuse.

En revanche, il n'est pas forcément judicieux de sous-exploiter un stock. Il n'est d'abord pas rationnel de laisser la mortalité naturelle consommer ce que fournit la croissance; il n'est pas prouvé de plus que la biomasse inexploitée s'équilibre à une valeur maximale en regard des capacités du milieu. On peut supposer que des régulations inter- ou intra-spécifiques interviennent: une surabondance momentanée peut avoir des effets néfastes sur un stock-proie ou sur la croissance et la mortalité propres du stock considéré.

Au moment de recommander une mesure d'aménagement du stock, l'analyste doit donc définir l'objectif prioritaire et fixer le niveau optimal du critère correspondant. Les options pratiques les plus appropriées sont alors déterminées compte tenu des informations fournies par les méthodes d'analyse historique ou prédictive, dont celles que nous avons explicitées sont quelques exemples.

BIBLIOGRAPHIE

- BEVERTON (R.J.H.) et HOLT (S.J.), 1957.- On the dynamics of exploited fish populations.- Fish.Invest., Londres, Ser. 2, 19: 533 p.
- -- , 1964.- Tables of yield functions for fishery assessment.- F.A.O. Fish. Tech. Pap., 38: 49 p.
- CADDY (J.F.), 1975.- Spatial model for an exploited shellfish population, and its application to the Georges Bank scallop fishery.- J. Fish. Res. Bd Canada, 32(8): 1305-1328.
- C.I.E.M., 1976.- Report of the ad hoc meeting on the provision of advice on the biological basis for fisheries management.- Cons.int. Explor. Mer, C.M. 1976/Gen:3: 16 p. (ronéo); ou Coop. Res. Rep., 62: 16 p.
- CUSHING (D.H.), 1973.- The variability of a yield curve calculated from a stock and recruitment relationship.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1973/F:29: 4 p. (ronéo).
- DAAN (N.), 1976.- Comments on the concepts of  $F_{0.1}$  and stock/recruitment relationship in relation to fisheries management.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1976/F:7: 9 p. (ronéo).
- DOUBLEDAY (W.G.), 1979.- A sensitivity analysis of selected catch projections.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1979/G:53: 24 p. (ronéo).
- EDWARDS (R.) et HENNEMUTH (R.), 1975.- Maximum Yield: assessment and attainment.- Oceanus, 18(2): 3-9.
- F.A.O., 1977.- Les modèles d'évaluation des stocks halieutiques. Annexe au rapport sur le second stage FAO/CNEXO de formation sur les méthodes d'évaluation des stocks halieutiques.- F.A.O. Fish. Circ., FIRS/C701: 164 p.

- FONTENEAU (A.), 1974.- Modèle de simulation de la pêcherie d'albacore (Thunnus albacares) de l'Atlantique.- Rec. doc. Scient. C.I.C.T.A., WTPD-Nantes/74/6: 66-102.
- , 1977.- Introduction aux techniques de simulation.- in: F.A.O. (1977), F.A.O. Circ. Pêches, FIRS/C701: 67-70.
- GALES (L.E.), BUSS (J.A.) et BLEDSOE (L.J.), 1977.- Simulation concepts for fishery systems.- J. Fish. Res. Bd Canada, 34: 2374-2380.
- GARROD (D.J.), POPE (J.G.) et KNIGHTS (B.J.), 1977.- The ICES stock evaluation course: an experiment in replicate assessments.- Cons. int. Explor. Mer, G.M. 1977/F:20: 12 p. (ronéo).
- GULLAND (J.A.) (Réd.), 1964.- Contributions to symposium 1963 on the measurement of abundance of fish stocks.- Cons. int. Explor. Mer, Rapp. et P.V., 155: 223 p.
- , 1968.- The concept of the marginal yield from exploited fish stocks.- J. Cons. int. Explor. Mer, 32(2): 256-261.
- , 1968.- The concept of the maximum sustainable yield and fishery management.- F.A.O. Fish. Tech. Pap., 70:
- , 1977.- Buts et objectifs de l'aménagement des pêches.- F.A.O. Fish. Tech. Pap. FIRS/T166: 15 p.
- (Réd.), 1977.- Fish populations dynamics.- Wiley-Interscience, New York, 1977: 372 p.
- , 1978.- Fishery management: new strategies for new conditions.- Trans. Am. Fish. Soc., 107(1): 1-11.
- HANNESSON (R.), 1974.- Relation between reproductive potential and sustained yield of fisheries.- J. Fish. Res. Bd Canada, 31(3): 359-362.
- HILBORN (R.), 1979.- Comparison of fisheries control systems that utilize catch and effort data.- J. Fish. Res. Bd Canada, 36: 1477-1489.

- HOUGHTON (R.G.), 1979.- Long term forecasts.- Doc. N. Sea Flatfish W. G. 1979: 8 p. (ronéo).
- et BANNISTER (R.C.A.), 1979.- Assessment and management of the North Sea sole stock.- Cons. Int. Explor. Mer, C.M. 1979/G:21: 32 p. (ronéo).
- et FLATMAN (S.), 1978.- A bias in calculating mean weight from a mean length and a discussion of the methodology used in Working Groups.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1978/G:18: 9 p. (ronéo).
- HOYDAL (K.), 1980.- Large scale changes in fisheries and their effects on stock assessments.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1980/G:27: 14 p. (ronéo).
- HUANG (C.C.), VERTINSKY (I.B.) et WILIMOVSKY (N.J.), 1976.- Optimal controls for a single species fishery and the economic value of research.- J. Fish. Res. Bd Canada, 33(4, 1): 793-809.
- HYLEN (A.) et RØRVIK (C.J.), 1975.- Assessments of the Arcto-Norwegian cod stock. The yield and size of the mature stock versus fishing pattern, fishing effort, natural mortality and mesh size.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1975/F:34: 23 p. (ronéo).
- I.C.N.A.F., 1976.- Report of Standing Committee on Research and Statistics 7th Special Commission Meeting - September 1975.- I.C.N.A.F. Redbook 1976 Pt A: 7-12.
- JENSEN (A.L.), 1976.- Relation between yield and fishing mortality for Ricker's yield equation.- J. Fish. Res. Bd Canada, 33(2): 275-277.
- JONES (B.W.), 1976.- Appendix to the Report of the Saithe (Coalfish) Working Group.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1976/F:2: 33-34.
- JONES (R.), 1957.- A much simpler version of the fish yield equation.- in: F.A.O., 1960: Proceedings of the Joint Scientific Meeting of the ICNAF, ICES and FAO on fishing effort, the effect of fishing on resources and the selectivity of fishing gear, Lisbon 1957; Vol. 2: Contributed papers.

- KRISHNAN KUTTY (M.) et QASIM (S.Z.), 1968.- The estimation of optimum age of exploitation and potential yield in fish populations.- J. Cons. int. Explor. Mer, 32(2): 249-255.
- LARKIN (P.A.), 1977.- An epitaph for the concept of Maximum Sustained Yield.- Trans. Am. Fish. Soc., 106(1): 1-11.
- LASSEN (H.), 1980.- On the quality of the TACs recommended through ICES.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1980/G:39: 13 p. (ronéo).
- LAUREC (A.), 1977.- Combinaison d'une relation stock-recrutement avec un modèle décrivant la phase recrutée: des modèles structuraux aux modèles globaux.- in F.A.O., 1977: F.A.O. Fish. Circ. FIRS/C701: 111-130.
- , 1979.- Analyse des données et modèles prévisionnels en écologie marine.- Thèse Doc. d'Etat, Univ. Aix-Marseille II, 1979: 405 p.
- , 1980.- Collecte des données en recherche halieutique: modélisation et rôle des moyens à la mer.- Océanis, 6(1): 57-98.
- LE GALL (J.Y.), LAUREC (A.), BARD (F.X.) et DAO (J.C.), 1974.- Etude de l'état du stock nord-Atlantique de germon Thunnus alalunga par l'analyse des cohortes.- Rec. doc. Scient. C.I.C.T.A., 1974(IV), SGRS/74/34: 109-127.
- MAGER (G.T.), JONES (B.W.) et BANNISTER (R.G.A.), 1979.- Factors affecting the accuracy of catch predictions in some demersal fish stocks.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1979/G:34: 12 p. (ronéo).
- NIELSEN (E.), 1980.- A simulation method for calculation of TAC of North Sea sole.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1980/G:34: 22 p. (ronéo).
- NIELSEN (N.A.), 1979.- Prediction of spawning stock and yield using a stochastic model for stock/recruitment.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1979/H:51: 15 p. (ronéo).
- PARRISH (B.B.), (Réd.), 1973.- Fish stocks and recruitment. Proceedings of a meeting held in Aarhus 7-10 July 1970.- Cons. int. Explor. Mer, Rapp. et P.V., 164: 372 p.

- PAULIK (G.J.) et BAYLIFF (W.H.), 1967.- A generalized computer program for the Ricker model of equilibrium yield per recruitment.- J. Fish. Res. Bd Canada, 24(2): 249-259.
- POPE (J.G.) et GARROD (D.J.), 1975.- Sources of error in catch and effort quota regulations with particular reference to variations in the catchability coefficients.- Int. Comm. Northw. Atlant. Fish., Res. Bull., 11: 17-30.
- RICKER (W.E.), 1958.- Handbook of computations for biological statistics of fish populations.- Bull. Fish. Res. Bd Canada, 119: 300 p.
- , 1975.- Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. (Calcul et interprétation des statistiques biologiques des populations de poissons.)- Bull. Fish. Res. Bd Canada, 191: 382 p. (Version française: *ibid.*, 191 F (1980): 409 p.).
- SHEPHERD (J.G.), 1977.- The sensitivity of exploited populations to environmental "noise", and the implications for management.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1977/F:27: 5 p. (ronéo).
- SILVERT (W.), 1977.- The price of knowledge: fisheries management as a research tool.- J. Fish. Res. Bd Canada, 35: 208-212.
- SISSEWINE (M.P.), 1978.- Is MSY an adequate foundation for optimum yield ?- Fisheries, 3(6): 22-42.
- SPARRE (P.), 1980.- A goal function of fisheries (Legion analysis).- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1980/G:40: 81 p. (ronéo).
- SUDA (A.), 1974.- Some comments on the Y/R study.- Rec. doc. Scient. C.I.C.T.A., WTPD-Nantes/74/5: 61-65.
- TAUTZ (A.), LARKIN (P.A.) et RICKER (W.E.), 1969.- Some effects of simulated long-term environmental fluctuations on Maximum Sustained Yield.- J. Fish. Res. Bd Canada, 26: 2715-2726.
- ULLTANG (Ø.), 1975.- Some aspects of fishing patterns in relation to fishery management.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1975/H:52: 22 p. (ronéo).

VEEN (J.F. de), 1976.- Some remarks on uncertainties in our assessments with special reference to the North Sea sole.- Doc. N. Sea Flatfish W.G. 1976: 14 p. (ronéo).

--- , 1976.- On the exploitation pattern in the Dutch North Sea sole fishery.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1976/F:19: 26 p. (ronéo).

--- et PANHORST (W.L.), 1976.- Prognosis of catch and stock of North Sea sole by quarters of the year.- Cons. int. Explor. Mer, C.M. 1976/F:18: 35 p. (ronéo).

WALTERS (C.J.), 1975.- Optimal harvest strategies for salmon in relation to environmental variability and uncertain production parameters.- J. Fish. Res. Bd Canada, 32: 1777-1784.

WATT (K.E.F.), 1956.- The choice and solution of mathematical models for predicting and maximizing the yield of a fishery.- J. Fish. Res. Bd Canada, 13(5): 613-645.

. ANNEXES .

PROGRAMMES POUR CALCULATEURS DE POCHE

Les méthodes mentionnées dans le document peuvent être aisément programmées sur calculateur de poche et, à titre indicatif, nous décrivons ici des programmes implantés sur calculettes HP 67/97. Par essence, leur emploi devrait être réservé à des circonstances exceptionnelles: indisponibilité temporaire ou sous-équipement anormal en moyens informatiques de base dans les laboratoires ou lieux de réunions. Il devient en effet vite fastidieux d'entrer manuellement des séries de paramètres pour chaque option testée, d'autant que l'on perd facilement le fil des opérations car il est impossible de donner un message explicite à l'écran.

- Caractéristiques communes -

Pour éviter ce dernier inconvénient, nous profitons des facilités associées au registre I. A chaque arrêt de programme prévu pour une saisie de paramètre, le numéro de groupe d'âge contenu en I est affiché à l'écran sans partie décimale; le paramètre est ensuite stocké dans le registre ayant même numéro que le groupe d'âge. Ainsi, dans tous les programmes, les paramètres spécifiques du groupe d'âge 10, par exemple, seront stockés dans le registre R 10. A la limite, si l'âge au recrutement est élevé, on peut considérer non plus le numéro des groupes mais leur rang par rapport à  $t_r$ ; on élargit ainsi les limites d'utilisation, au détriment de la clarté.

Vu la nécessité de conserver quelques registres disponibles pour les paramètres communs, on est effectivement limité dans la gamme d'âge; dans le programme de saisie des poids moyens sur carte et de calcul des "S.O.P." et biomasses, le maximum admissible est le groupe d'âge 21. Dans la première partie des programmes BWJ, RICKER et PREDICAP, cette limite est même ramenée automatiquement au groupe 19; on aura donc tout intérêt à stocker en R 19 le poids moyen du groupe "19 +".

Dans tous les programmes de cette série, des registres sont systématiquement réservés à certains paramètres et on veillera à respecter ce "formatage". Le numéro du groupe d'âge initial,  $t_r$  ou  $t_c$ , se trouve toujours en D, le numéro T de groupe d'âge final en E. Le registre C est réservé au cumul des résultats partiels par groupe d'âge, rendement équilibré ou production simulée; en fin de calcul, il contient le résultat recherché.

En A, on stocke au moins provisoirement, un coefficient K qui joue un rôle très important. Les registres R  $t_r$  à R T (R 0 à R 19 maximum) doivent pouvoir contenir plusieurs paramètres simultanément, l'un en partie entière, l'autre en partie fractionnaire; ce dernier sera ici le poids moyen par âge. K sera donc choisi pour que, une fois divisés par K, tous les poids moyens considérés soient transformés en nombres fractionnaires. Si par exemple les poids moyens aux âges extrêmes sont de l'ordre du kilogramme (resp. de la dizaine de kg), on donnera à K la valeur 10 (resp. 100). Il arrivera également que le paramètre devant figurer en partie entière soit multiplié par K avant d'être tronqué par INT; tout en respectant la première condition, obligatoire, sur K, on pourra augmenter ce dernier pour que le paramètre entier conserve une précision suffisante après troncature.

De la même façon, le coefficient M de mortalité naturelle partage le registre B avec un autre paramètre; M doit donc être strictement inférieur à 1.

Pour chaque programme, la configuration et le contenu des registres sont indiqués dans un tableau.

#### - Caractéristiques particulières -

Les programmes d'analyse dynamique proprement dite nécessitent tous une carte de données qui contient toujours, sous une forme appropriée, la distribution des poids moyens par groupe d'âge que l'on saisit à l'aide du premier programme. Il s'agit toujours des poids moyens relatifs aux captures, c'est-à-dire aux milieux de périodes considérées.

Le sous-programme "S.O.P." permet de calculer les captures pondérales à partir des poids moyens et de la distribution des captures en nombre; dans un groupe de travail, cela sert surtout pour réajuster ces dernières par rapport aux tonnages de captures officiellement déclarées. Pour pouvoir utiliser les mêmes données, le sous-programme biomasse prévoit d'estimer le poids moyen en début d'intervalle par une interpolation arithmétique simple:

$$\bar{w}_{N,t} = \frac{1}{2} \cdot (\bar{w}_{C,t-1} + \bar{w}_{C,t})$$

Noter que pour l'âge initial, on conserve l'estimation  $\bar{w}_{C,t_0}$ .

Le programme BWJ permet d'analyser les variations de rendement conditionnel à l'équilibre d'après la méthode de B.W. JONES. En première partie, on saisit le diagramme d'exploitation de référence qui est stocké en valeurs relatives à  $F_{sup}$  en partage avec les poids moyens réduits. Le sous-programme B calcule les rendements correspondant à diverses options en  $F$ ,  $F = mf \cdot F_{sup}$ , coefficient proportionnel à l'intensité de pêche globale.

Le programme d'analyse type RICKER effectue un calcul comparable, mais cette fois, les multiplicateurs  $mf$  peuvent varier avec l'âge; il se prête donc mieux à des analyses de variations de l'âge  $t_c$  ou des caractéristiques de sélection des engins. On saisit d'abord un vecteur de mortalités par pêche de référence (diagramme d'exploitation en valeur absolue), stocké en partage avec les poids moyens. On calcule ensuite les rendements équilibrés correspondant à diverses options sur les multiplicateurs  $mf_t$  appliqués à ce vecteur.

Dans ces deux programmes de rendement équilibré, on vérifiera que la partie fractionnaire du registre A est la fraction survivante à l'âge  $T+1$  du recrutement unité.

Le programme PREDICAP permet de simuler la production prévisible en situation de transition. En première partie, on entre à chaque âge  $t$  affiché l'effectif  $N_t$  puis le coefficient de mortalité par pêche  $F_t$  de référence calculés par analyse de cohortes pour la période  $r$ . Les effectifs survivant en début de période  $n$  sont alors calculés puis stockés après incrémentation de l'âge en partage avec les poids moyens, sous une forme qui permet d'ignorer le facteur  $K$  dans les calculs ultérieurs. Ces paramètres décrivant la situation initiale sont enregistrés sur la carte  $n$ .

Grâce au sous-programme B, on simule l'effet d'une pression de pêche, caractérisée par des coefficients de mortalité  $F_{t,n}$ , sur ces effectifs initiaux; il en résulte une production  $Y_n$  et un nouvel état du stock en début de période  $n+1$ , fin de période  $n$ . L'effectif de chaque cohorte considérée survivant en début de période  $n+1$  est calculé puis stocké comme précédemment en partage avec le poids moyen après incrémentation de l'âge. On crée ainsi la carte  $n+1$  de données intermédiaires; seule exception: l'effectif au recrutement contenu en mémoire et sur la carte est la valeur entrée en début de programme et correspond donc au début de période  $n$ , alors que tous les autres effectifs correspondent au début de période  $n+1$ .

Pour transformer ces nombres de survivants en biomasses, on dispose de deux sous-programmes utilisables dès la fin du calcul de production, avec les données en mémoire, ou après relecture de la carte intermédiaire. Le sous-programme C utilise les poids moyens tels quels et ignore donc la différence entre début et milieu de période; dans certaines circonstances, on peut espérer éviter cette erreur en utilisant le sous-programme D dans lequel on estime le poids moyen en début d'intervalle par interpolation arithmétique. Le cumul est fait dans la pile opérationnelle et n'utilise, ni ne modifie, aucun registre. Généralement, on s'intéresse à la biomasse d'adultes survivants; cela se justifie d'autant plus ici que nous commettons deux erreurs sur l'âge initial: pas d'interpolation possible du poids moyen, et effectif  $R$  décalé d'un an. Le premier groupe d'âge que l'on désire prendre en compte dans la biomasse est donné en début de sous-programme dans le registre I.

Le même calcul peut être repris à partir de la carte intermédiaire pour une prévision de production en période  $n+1$  et survie en début de période  $n+2$ . Pour tester une autre séquence possible de régimes d'exploitation en périodes  $n$  et  $n+1$ , on reprendra le calcul à partir de la carte  $n$  de l'état initial, en appliquant de nouveaux vecteurs de mortalité par pêche.



SAISIE DES POIDS MOYENS PAR GROUPE D'AGE - Programmes "S.O.P." et BIOMASSE

| PAS | FONCTION  | COMMENTAIRE  | PAS | FONCTION                                     | COMMENTAIRE   |
|-----|---|--|-----|--|---|
| 001 | f LBL A<br>DSP O<br>RCL D<br>h ST I             | + Saisie des $\bar{w}_t$ (captures)<br>$t_o$ ( $t_r$ ou $t_c$ )  | 038 | RCL C<br>h RTN                               | Somme des $Y_t$<br>- FIN- Lire la capture pondérale.                                    |
| 005 | f LBL O<br>h RC I<br>R/S<br>STO (i)<br>f ISZ    | + boucle de saisie<br>t<br>DONNER $\bar{w}$ à l'âge t affiché<br>$\bar{w}_t$ en registre n° t<br>t = t+1                           | 040 | f LBL C<br>DSP O<br>CL X<br>STO C<br>RCL D   | + BIOMASSE avec interpolation des $\bar{w}_t$<br>mise à 0 du cumul<br>$t_o$             |
| 010 | RCL E<br>h RC I<br>g X ≤ Y<br>GTO O<br>f W/DATA | âge maximum T<br>t<br>t ≤ T ?<br>oui, reprendre pour t+1<br>t=T, ENREGISTRER ( $\bar{w}_t$ ) <sup>T</sup> <sub>t<sub>o</sub></sub> | 045 | h ST I<br>R/S<br>RCL (i)<br>GTO 3<br>f LBL 2 | Lire t<br>DONNER $N_{t_o}$<br>$\bar{w}_{t_o}$<br>saut<br>+ boucle biomasse              |
| 015 | DSP 3<br>CL X<br>h RTN<br>f LBL B               | -FIN: 0.000 est affiché.<br>+ S.O.P. - Capture Y   | 050 | RCL (i)<br>f ISZ<br>RCL (i)<br>+<br>2<br>:   | $\bar{w}_{t-1}$<br>incrémenter t<br>$\bar{w}_t$<br>$\bar{w}_t$ début d'intervalles<br>t |
| 020 | DSP O<br>CL X<br>STO C<br>RCL D<br>h ST I       | mise à 0 du cumul en C<br>$t_o$  | 055 | h RC I<br>R/S<br>h X ↔ Y<br>h R ↓            | DONNER $N_t$<br>évacue t, rappelle $\bar{w}_t$  |
| 025 | f LBL 1<br>h RC I<br>R/S<br>RCL (i)<br>x        | + Boucle $t_o$ à T<br>t<br>DONNER $C_t$ pour l'âge t<br>$\bar{w}_t$<br>$Y_t = C_t \cdot \bar{w}_t$                                 | 060 | f LBL 3<br>x<br>RCL C<br>+<br>STO C          | + produit $N \cdot \bar{w}$<br>$B_t = N_t \cdot \bar{w}_{t,N}$<br>cumul des $B_t$       |
| 030 | RCL C<br>+<br>STO C<br>f ISZ<br>RCL E<br>h RC I | cumul des $Y_t$ en C<br>t = t+1<br>T<br>t  | 065 | RCL E<br>h RC I<br>f X ≠ Y<br>GTO 2<br>DSP 3 | T<br>t<br>t = T ?<br>non, reprendre la boucle<br>oui, fin                               |
| 035 | g X ≤ Y<br>GTO 1<br>DSP 3                       | t ≤ T ?<br>oui, reprendre la boucle<br>non, résultat:  | 070 | RCL C<br>h RTN                               | FIN- lire la biomasse B   |

II - RENDEMENT EQUILIBRE - méthode de B.W. JONES, 1976.

A - Saisie du diagramme d'exploitation.

- A.1. Lire la carte  $\bar{w}$  des poids moyens par âge mode RUN  
Choisir le coefficient K ( $\bar{w}_t/K$  inférieur à 1) K STO A  
Donner  $F_{sup}$  le plus grand coefficient de mortalité  
par pêche observé en période de référence  $F_{sup}$   
et lancer le programme A
- A.2. Pour chaque âge t affiché,  
entrer le coefficient  $F_t$  du vecteur mortalité  $F_t$  R/S  
En fin de saisie, t = T, enregistrer les données Crd

B - Calcul du rendement équilibré en fonction de  $\hat{F}$ .

- B.1. S'ils ne sont pas en mémoire, lire les ( $P_t, \bar{w}_t$ )  
de la carte des données mode RUN  
Indiquer la mortalité naturelle M STO B
- B.2. Entrer la mortalité globale  $\hat{F}$  testée  $\hat{F}$   
puis lancer le programme B  
Au bout d'une minute environ, lire le résultat Y/R
- \*\* On vérifie que la partie fractionnaire du registre A  
est la fraction survivante à T+1 du recrutement R
- B.3. Pour tester une autre valeur de  $\hat{F}$ , reprendre en B.2.

| PAS | FONCTION | COMMENTAIRE                                 | PAS | FONCTION | COMMENTAIRE  |
|-----|----------|---|-----|----------|--|
| 001 | f LBL A  | Saisie Fishing-Pattern                      | 039 | f INT    | 100.F,   |
|     | STO B    | Fsup stocké en B                            |     | RCL B    | M  |
|     | DSP O    |   |     | g FRAC   |  |
|     | RCL D    | to  |     | +        | (100.F, M)   |
| 005 | h ST I   |   |     | STO B    |  |
|     | 1        |   |     | CL X     |  |
|     | 9        |   | 045 | STO C    | cumul à 0  |
|     | RCL E    | âge T maximum                               |     | h CF O   |  |
|     | g X ≤ Y  | T ≤ 19 ?                                    |     | RCL D    | to   |
| 010 | GTO O    | oui, .saut                                  |     | h ST I   |  |
|     | h X ↔ Y  | rappelle 19                                 |     | 1        | Recrutement= 1   |
|     | STO E    | maxi T = 19 en E                            | 050 | ENTER    |  |
|     | f LBL O  | boucle saisie                               |     | 1        |  |
|     | h RC I   | t   |     | h CF 2   |  |
| 015 | R/S      | DONNER mortalité $F_t$                      |     | f GSB 5  | SUB calcul de $\begin{matrix} F \text{ si SF 2} \\ Z \text{ si CF 2} \end{matrix}$ |
|     | RCL B    | Fsup  |     | f LBL 1  | Boucle Y/R   |
|     | :        | $P_t = F_t / Fsup$                          | 055 | CHS      | -Z   |
|     | EEX      |   |     | g $e^X$  | $\exp(-Z)$   |
|     | 3        |   |     | x        | $N_{t+1} = N_t \cdot \exp(-Z_t) < 1$   |
| 020 | x        |   |     | RCL A    |  |
|     | f INT    | $1000 \cdot P_t$                            |     | f INT    | K  |
|     | RCL (i)  | $\bar{w}_t$                                 | 060 | +        | $(K, N_{t+1})$   |
|     | RCL A    | K   |     | STO A    |  |
|     | :        | $\bar{w}/K$                                 |     | f INT    | K  |
| 025 | +        | $(1000 \cdot P_t, \bar{w}_t/K)$             |     | x        | K.1 puis $K \cdot N_t$   |
|     | STO (i)  |   |     | RCL (i)  | $(1000 \cdot P_t, \bar{w}_t/K)$  |
|     | f ISZ    | t = t+1                                     | 065 | g FRAC   | $\bar{w}_t/K$  |
|     | RCL E    | T   |     | x        | $N_t \cdot \bar{w}_t$  |
|     | h RC I   | t   |     | h SF 2   |  |
| 030 | g X ≤ Y  | t ≤ T ?                                     |     | f GSB 5  | calcule $F_t$ et CF 2  |
|     | GTO O    | oui, reprendre boucle                       |     | x        | $F_t \cdot N_t \cdot \bar{w}_t$  |
|     | CL X     | non, fin de saisie                          | 070 | f GSB 5  | calcule $Z_t$ (CF 2)   |
|     | f W/DATA | ENREGISTRER $(1000 \cdot P_t, \bar{w}_t/K)$ |     | :        | $F \cdot N \cdot \bar{w}/Z$  |
|     | h RTN    | FIN DE SAISIE                               |     | h F? O   | t = T ?  |
| 035 | f LBL B  | Rendement par Recrue                        |     | GTO 2    | oui, saut vers fin   |
|     | EEX      | F en X                                      |     | h LST X  | non, rappelle $Z_t$  |
|     | 2        |   | 075 | CHS      | -Z   |
|     | x        | 100.F                                       |     | g $e^X$  | $\exp(-Z)$   |
|     |          |   |     | CHS      |  |

| PAS | FONCTION        | COMMENTAIRE  | PAS | FONCTION | COMMENTAIRE |
|-----|-----------------|--|-----|----------|-------------|
| 078 | 1<br>+          | $1 - e^{-Z_t}$   |     |          |             |
| 080 | x<br>RCL C<br>+ | $Y_t = F_t \cdot N_t \cdot \bar{w}_t \cdot (1 - e^{-Z_t}) / Z_t$ |     |          |             |
|     | STO C           | cumul des $Y_t$ en C   |     |          |             |
|     | f ISZ           | $t = t+1$  |     |          |             |
| 085 | RCL E           | T  |     |          |             |
|     | h RC I          | t  |     |          |             |
|     | g X = Y         | $t = T ?$  |     |          |             |
|     | h SF 0          | oui, SF 0  |     |          |             |
|     | RCL A           | $(X, N_{t+1})$   |     |          |             |
| 090 | g FRAC          | $N_{t+1} (<1)$   |     |          |             |
|     | ENTER<br>ENTER  |  |     |          |             |
|     | h CF 2          |  |     |          |             |
|     | f GSB 5         | calcule Z  |     |          |             |
| 095 | GTO 1           | reprendre la boucle, $t=t+1$                                     |     |          |             |
|     | f LBL 2         | fin, $t=T$   |     |          |             |
|     | RCL C<br>+      |  |     |          |             |
| 100 | STO C<br>DSP 4  | Somme $(Y_t)^T$ to   |     |          |             |
|     | h RTN           | FIN - Affiche Y/R  |     |          |             |
|     | f LBL 5         | SUB F ou Z   |     |          |             |
|     | RCL B           | $(100.F, M)$   |     |          |             |
|     | f INT           | $100.F$  |     |          |             |
| 105 | RCL (i)         | $(1000.P_t, \bar{w}_t/K)$  |     |          |             |
|     | f INT           | $1000.P_t$   |     |          |             |
|     | x<br>EEX<br>5   |  |     |          |             |
| 110 | :               | $F_t = P_t \cdot F$  |     |          |             |
|     | h F? 2          | Flag 2 = 1 ? (CF 2)  |     |          |             |
|     | h RTN           | oui, retour avec F   |     |          |             |
|     | RCL B           | non, calculer Z  |     |          |             |
|     | g FRAC          | M  |     |          |             |
| 115 | +<br>h RTN      | retour avec Z  |     |          |             |

| REG. | Données                  | LBL A<br>saisie du diagramme d'exploitation | LBL B<br>calcul du rendement équilibré |
|------|--------------------------|---|--|
| A    | $\bar{w}_{20}$ éventuels | K entier                                    | $(K, N_t)$ variable                    |
| B    | $\bar{w}_{21}$           | Fsup  | $(100.\hat{F}, M)$                     |
| C    | 0                        | 0   | Cumul $Y_t/R$                          |
| D    | to                       | to  | to                                     |
| E    | T                        | T   | T                                      |
| I    | t variable               | t   | t                                      |
| R 0  | -                        | -   |  |
| R to | $\bar{w}_{to}$           | $(1000.P_{to}, \bar{w}_{to}/K)$             |  |
| R t  | $\bar{w}_t$              | $(1000.P_t, \bar{w}_t/K)$                   | Régistres<br>inchangés                 |
| R T  | $\bar{w}_T$              | $(1000.P_T, \bar{w}_T/K)$                   |  |
| R 19 | -                        | -   |  |
|      | Carte $\bar{w}$          | Carte FP                                    |  |

III - RENDEMENT EQUILIBRE PAR RECRUE - type RICKER -

A - Saisie du vecteur  $\{F_t\}$  de référence.

- A.1. Lire la carte  $\bar{w}$  des poids moyens par âge mode RUN  
 Choisir le coefficient K ( $\bar{w}_t/K$  inférieur à 1) K STO A  
 Lancer le programme A
- A.2. Pour chaque âge t affiché à l'écran, entrer le R/S  
 coefficient  $F_t$  de référence à l'âge t  $F_t$
- A.3. Fin de saisie, t = T Crd  
 à la demande, enregistrer la carte des données O.  
 Fin

B - Calcul du rendement par recrue - mf variable avec l'âge.

- B.1. S'ils ne sont pas en mémoire, lire les ( $F_t, \bar{w}_t$ ) mode RUN  
 de la carte des données STO B  
 Indiquer la mortalité naturelle M  
 Lancer le programme B
- B.2. Pour chaque âge t affiché, entrer le multiplicateur R/S  
 du coefficient  $F_t$  de référence à l'âge t  $mf_t$   
 Quand t = T, lire le rendement par recrue Y/R
- \*\* Vérifier que la partie fractionnaire du registre A est  
 la fraction survivante à T+1 du rendement R.
- B.3. Pour analyser l'effet d'un autre vecteur de multiplicateurs,  
 relancer le programme B

| PAS | FONCTION   | COMMENTAIRE   | PAS | FONCTION  | COMMENTAIRE   |
|-----|--|---|-----|---|---|
| 001 | f LBL A<br>DSP O<br>RCL D<br>h ST I                          | + SAISIE vecteur $\{F_t\}$ réf.<br>$t_0$ ( $t_r$ ou $t_c$ )                                 | 040 | g FRAC<br>+<br>STO B<br>CL X<br>STO C                         | mortalité M<br>(K, M) en registre B<br>mise à 0 du cumul  |
| 005 | 1<br>9<br>RCL E<br>g X $\leftrightarrow$ Y<br>GTO O          | T<br>T $\leq$ 19 ?<br>oui, saut   | 045 | h SF 2<br>DSP O<br>f LBL 1<br>h RC I<br>R/S                   | Flag 1er tour; $N_{t_0} = R = 1$<br>+ boucle Y/R<br>t<br>DONNER multiplicateur $mf_t$             |
| 010 | h X $\leftrightarrow$ Y<br>STO E<br>f LBL O<br>h RC I<br>R/S | non, rappeler 19<br>imposer T = 19<br>+ boucle de saisie<br>t<br>DONNER $F_t$ de référence  | 050 | RCL (i)<br>f INT<br>x<br>EEX<br>3<br>:                        | ( $1000 \cdot F_t, \bar{w}_t/K$ )<br>$\hat{F}_t = mf_t \cdot F_t$                                 |
| 015 | EEX<br>3<br>x<br>f INT<br>RCL (i)                            | INT( $1000 \cdot F_t$ )<br>$\bar{w}_t$  | 055 | ENTER<br>ENTER<br>RCL B                                       | (K, M)  |
| 020 | RCL A<br>f INT<br>:<br>+<br>STO (i)                          | K<br>$\bar{w}_t/K$<br>( $1000 \cdot F_t, \bar{w}_t/K$ ), partage<br>du registre n° t        | 060 | g FRAC<br>+<br>:<br>h LST X<br>CHS<br>g $e^x$                 | M<br>Z<br>E = F/Z<br>Z<br>-Z<br>$S_t = e^{-Zt}$   |
| 025 | f ISZ<br>RCL E<br>h RC I<br>g X $\leq$ Y<br>GTO O            | t = t+1<br>T<br>t<br>t T ?<br>oui, reprendre la boucle                                      | 065 | h F? 2<br>GTO 2<br>RCL A<br>g FRAC<br>h X $\leftrightarrow$ Y | Groupe d'âge initial ?<br>oui, N = 1, saut<br>non, rappel (K, $N_t$ )<br>$N_t$<br>S ! $N_t$ ! F/Z |
| 030 | CL X<br>f W/DATA<br>h RTN<br>f LBL B<br>RCL D                | non, fin de saisie<br>ENREGISTRER les données<br>- FIN.<br>+ RENDEMENT PAR RECRUE.<br>$t_0$ | 070 | h R $\downarrow$<br>x<br>h R $\uparrow$<br>ENTER<br>ENTER     | $N_t$ ! F/Z<br>F.N/Z<br>S ! F.N/Z   |
| 035 | h ST I<br>RCL A<br>f INT<br>STO A<br>RCL B                   | K   | 075 | RCL A<br>g FRAC<br>x<br>GTO 3<br>f LBL 2                      | $N_t$ ! $S_t$ ! $S_t$ ! F.N/Z<br>$N_{t+1} = N_t \cdot S_t$<br>+ Groupe initial, N = 1             |
|     |  |   | 080 | ENTER   | $S_{t_0}$ ! $S_{t_0}$ ! F/Z   |

| PAS | FONCTION | COMMENTAIRE                             |
|-----|----------|---|
| 081 | f LBL 3  | + suite                                 |
|     | RCL A    |   |
|     | f INT    | K                                       |
|     | +        |   |
| 085 | STO A    | $(K, S_{t_0})$ puis $(K, N_{t+1})$      |
|     | h R ↓    | $S_t \neq F.N/Z$                        |
|     | CHS      |   |
|     | 1        |   |
|     | +        | $A_t = 1 - S_t$                         |
| 090 | x        | $C_t = (F_t \cdot A_t \cdot N_t) / Z_t$ |
|     | RCL (i)  |   |
|     | g FRAC   | $\bar{w}_t / X$                         |
|     | RCL A    |   |
|     | f INT    | $\frac{K}{\bar{w}_t}$                   |
| 095 | x        |   |
|     | x        | $Y_t = C_t \cdot \bar{w}_t$             |
|     | RCL C    |   |
|     | +        |   |
|     | STO C    | cumul des $Y_t$                         |
| 100 | f ISZ    | $t = t+1$                               |
|     | RCL E    | T                                       |
|     | h RC I   | t                                       |
|     | g X & Y  | $t \leq T ?$                            |
|     | GTO 1    | oui, reprendre la boucle                |
| 105 | DSP 4    | non, fin                                |
|     | RCL C    | rappeler le résultat                    |
|     | h RTN    | - FIN: lire Y/R                         |

| REG.    | LBL A                    |  | LBL B                         |
|---------|--------------------------|--|-------------------------------|
|         | DONNEES                  | Saisie du vecteur $\{F_t\}$ de référence | calcul du rendement équilibré |
| A       | $\bar{w}_{20}$ éventuels | K entier                                 | (K, $N_{t+1}$ variable)       |
| B       | $\bar{w}_{21}$           | -  | M puis (K, M)                 |
| C       | 0                        | 0  | cumul des $Y_t$               |
| D       | $t_0$                    | $t_0$                                    | $t_0$                         |
| E       | T                        | T  | T                             |
| I       | t variable               | t  | t                             |
| R 0     | -                        | -  |                               |
| R $t_0$ | $\bar{w}_{t_0}$          | $(1000 \cdot F_{t_0}, \bar{w}_{t_0}/K)$  |                               |
| R t     | $\bar{w}_t$              | $(1000 \cdot F_t, \bar{w}_t/K)$          | Régistres<br>inchangés        |
| R T     | $\bar{w}_T$              | $(1000 \cdot F_T, \bar{w}_T/K)$          |                               |
| R 19    | -                        | -  |                               |
|         | Carte $\bar{w}$          | Carte F, W                               |                               |

IV - PREDICTION DE CAPTURES par SIMULATION -

A - Initialisation - Survie de période r à période n.

- A.1. Lire la carte des poids moyens par âge mode RUN  
 Choisir le coefficient K ( $\bar{w}_t/K$  inférieur à 1) K STO A  
 Donner le coefficient M de mortalité naturelle M STO B  
     Lancer le programme A
- A.2. Pour chaque âge t affiché, donner les paramètres de  
 référence, successivement l'effectif  $N_{t,r}$  ENTER  
     le coefficient de mortalité par pêche  $F_{t,r}$  R/S
- A.3. En fin de saisie, t = T, enregistrer à la  
 demande la carte n des données initiales Crd

B - Prédiction de production  $Y_n$  et survies  $N_{t,n+i}$

- B.1. S'ils ne sont pas en mémoire, lire les ( $N_t, \bar{w}_t$ )  
 de la carte des données mode RUN
- B.2. Entrer le recrutement  $R_n$  attendu l'année n  $R_n$  ou  $R'_n$   
     Lancer le programme B  
 Pour chaque âge t affiché, entrer le coefficient  
 de mortalité par pêche simulée  $F_{t,n}$  R/S
- B.3. Fin de calcul, t = T; à la demande, enregistrer  
 la carte intermédiaire n+1 Crd  
 Lire la production prédite  $Y_n$

\*\* Appeler les sous-programmes C ou D pour calculer les biomasses.

- B.4. Production  $Y_{n+1}$  et survie  $N_{t,n+2}$ , reprendre B.2. avec le  
 recrutement  $R_{n+1}$  et les données intermédiaires.
- B.5. Simulations sur une autre séquence  $F_{t,n}$  et  $F_{t,n+1}$   
 Reprendre en B.1. avec la carte des données initiales

PREDICTION DE SURVIE PAR SIMULATION

C - Calcul des biomasses de survivants.

C.1 Profiter si possible de la présence des données en mémoire  
en fin de calculs précédents, sinon relire les cartes mode RUN

Indiquer le premier groupe d'âge pris en compte:

|                      |       |        |
|----------------------|-------|--------|
| . biomasse totale,   | $t_r$ | h ST I |
| . biomasse exploitée | $t_c$ | h ST I |
| . biomasse d'adultes | $t_s$ | h ST I |

C.2. Lancer le programme:  
- avec interpolation D  
- sans interpolation C

Lire le résultat, biomasse de survivants  $B_n$

C.3. Pour estimer une autre fraction, reprendre en C.1.

| PAS | FONCTION   | COMMENTAIRE   | PAS | FONCTION  | COMMENTAIRE  |
|-----|--|---|-----|---|--|
| 001 | f LBL A<br>DSP O<br>RCL D<br>h ST I                  | + Initialisation, année r<br>to, 1er groupe d'âge   | 044 | RCL (i)<br>RCL B<br>f INT<br>:<br>+<br>STO (i)                              | $\bar{w}_{t+1}$<br>(K,M)<br>K<br>$\bar{w}/K$<br>$(K \cdot N_{t+1}^n, \bar{w}_{t+1}/K)$                                     |
| 005 | RCL A<br>RCL B<br>g FRAC<br>+<br>STO B               | coeff. K (entier)<br>mortalité M (frac.)<br>(K,M)   | 050 | GTO O<br>f LBL 1<br>R ↓<br>STO + (i)<br>f W/DATA                            | reprise pour t = t+1<br>+ fin, t = T<br>rappelle $K \cdot N_{T+1}$ arrondi<br>$N_T = N_T + N_{T+1}$<br>ENREGISTRER Carte n |
| 010 | RCL (i)<br>RCL A<br>:<br>STO (i)                     | $\bar{w}_{to}$<br>K<br>$\bar{w}_{to}/K$   | 055 | h RTN<br>f LBL B<br>DSP O<br>h CF O<br>RCL D                                | FIN<br>+ Prédiction ( $n_A, n+1$ )<br>Recrutement $R^n$ en X<br>to   |
| 015 | 1<br>9<br>RCL E<br>g X ≤ Y<br>GTO O                  | T, groupe d'âge maximum<br>T ≤ 19 ?<br>oui, saut  | 060 | h ST I<br>CL X<br>STO C<br>h X ↔ Y<br>RCL B<br>f INT                        | mise à 0 du cumul<br>rappelle $R^n$<br>(K,M)<br>K  |
| 020 | h X ↔ Y<br>STO E<br>f LBL O<br>h RC I<br>R/S         | non, rappeler 19<br>imposer T = 19<br>+ Boucle to à T<br>t pour affichage<br>DONNER: $N_t^r$ , ENTER, $F_t^r$ | 065 | x<br>STO A<br>f INT<br>RCL (i)<br>g FRAC<br>+<br>STO (i)<br>g FRAC<br>RCL A | sauvegarde K.R<br>$\bar{w}_{to}/K$<br>$(K \cdot R^n, \bar{w}_{to}/K)$<br>K.R   |
| 025 | RCL B<br>g FRAC<br>+<br>CHS<br>g e <sup>X</sup><br>x | (K,M)<br>,M<br>$Z_t = F_t + M$<br>$\exp(-Z)$<br>$N_{t+1}^n = N_t^r \cdot \exp(-Z_t^r)$                        | 070 | x<br>STO A<br>f INT<br>RCL (i)<br>g FRAC<br>+<br>STO (i)<br>g FRAC<br>RCL A | $R \cdot \bar{w}_{to}$<br>+ Boucle PREDICAP, to à T<br>t pour affichage<br>DONNER $F_t^n$                                  |
| 030 | RCL B<br>f INT<br>x<br>5<br>+                        | (K,M)<br>K<br>$K \cdot N_{t+1}$<br>-  | 075 | x<br>f LBL 2<br>h RC I<br>R/S   | évacue t<br>( $N \cdot \bar{w} \cdot F$ ) <sub>t</sub><br>rappelle $F_t$<br>(K,M)<br>,M                                    |
| 035 | f INT<br>RCL E<br>h RC I<br>-                        | $K \cdot N_{t+1}$ arrondi<br>T<br>t<br>T-t  | 080 | h X ↔ Y<br>h R ↓<br>x<br>h LST X<br>RCL B<br>g FRAC<br>+<br>:<br>h LST X    | $Z_t = F_t + M$<br>$(N \cdot \bar{w} \cdot F)/Z$<br>rappelle $Z_t$   |
| 040 | f X = 0<br>GTO 1<br>f ISZ<br>CL X                    | t = T ?<br>oui, saut vers fin<br>non, incrémenter t en I  | 085 |   |  |

| PAS | FONCTION         | COMMENTAIRE  | PAS       | FONCTION | COMMENTAIRE                                     |
|-----|------------------|--|-----------|----------|---|
| 088 | CHS              |  | 128       | h LST X  | $(K \cdot N_{t+1}^n, \bar{w}_{t+1}/K)$          |
|     | g e <sup>X</sup> | $\exp(-Z)$   | g FRAC    |          |   |
| 090 | ENTER            |  | 130       | x        | $N_{t+1}^n \cdot \bar{w}_{t+1}$                 |
|     | CHS              |  | GTO 2     |          | reprise pour t = t+1                            |
|     | 1                |  | f LBL 4   |          | + fin, t = T                                    |
|     | +                | $1 - e^{-Z_t}$   | STO + (i) |          | $N_T = N_T + N_{T+1}$                           |
|     | h X ↔ Y          | $e^{-Z} ! 1 - e^{-Z} ! N \cdot \bar{w} \cdot F/Z ! -$        | DSP 3     |          |   |
| 095 | h R ↓            | $1 - e^{-Z} ! N \cdot \bar{w} \cdot F/Z ! - ! e^{-Z}$        | 135       | RCL C    | rappel cumul                                    |
|     | x                | $Y_t^n = (F \cdot (1 - e^{-Z}) \cdot N \cdot \bar{w}/Z)_t^n$ | f W/DATA  |          | ENREGISTRER les $(N, \bar{w})_t^{n+1}$          |
|     | RCL C            |  | h RTN     |          | FIN - lire somme $(Y_t^n)_t^T$                  |
|     | +                |  | f LBL C   |          | + Programme BIOMASSE                            |
| 100 | STO C            | cumul des $Y_t$  |           | CL X     | 1er âge en I                                    |
|     | -                | redescend la pile  | 140       | x        |   |
|     | CL X             | $0 ! e^{-Z} ! e^{-Z} ! e^{-Z}$                               | x         |          |   |
|     | h RC I           | t  | f LBL 5   |          | + boucle biomasse I à T                         |
|     | RCL E            | T  | RCL (i)   |          | $(K \cdot N_t, \bar{w}_t/K)$                    |
|     | g X > Y          | T > t ?  | f INT     |          |   |
| 105 | GTO 3            | oui, saut  | 145       | h LST X  | (" , " )  |
|     | h SF 0           | Flag 0 = 1 dès que t = T                                     | g FRAC    |          |   |
|     | f LBL 3          | +  | x         |          | $B_t = N_t \cdot \bar{w}_t$                     |
|     | -                |  | +         |          | cumul des $B_t$ en pile                         |
|     | CL X             | $0 ! e^{-Z} ! e^{-Z} ! e^{-Z}$                               | h RC I    |          | t   |
| 110 | RCL A            | $K \cdot N_t^n$  | 150       | RCL E    | T   |
|     | x                | $K \cdot N_{t+1}^{n+1} = K \cdot N_t^n \cdot e^{-Z_t^n}$     | -         |          |   |
|     | .                |  | f X = 0   |          | t = T ?   |
|     | 5                |  | GTO 6     |          | oui, saut                                       |
|     | +                |  | f ISZ     |          | non, incrémenter t en I                         |
| 115 | f INT            | $K \cdot N_{t+1}$ arrondi                                    | 155       | h R ↓    | rappeler cumul en X                             |
|     | h F? 0           | t = T ?  | GTO 5     |          | reprendre la boucle                             |
|     | GTO 4            | oui, saut  | f LBL 6   |          | + fin t = T                                     |
|     | f ISZ            | non, incrémenter t en I                                      | DSP 2     |          |   |
|     | RCL (i)          | $(K \cdot N_{t+1}^n, \bar{w}_{t+1}/K)$                       | h R ↓     |          |   |
| 120 | g FRAC           | $\bar{w}_{t+1}/K$  | 160       | h RTN    | FIN - lire la biomasse:                         |
|     | +                | $(K \cdot N_{t+1}^{n+1}, \bar{w}_{t+1}/K)$                   |           |          | $B^n = \text{Somme}(N_t^n \cdot \bar{w}_t)_I^T$ |
|     | RCL (i)          | effectif âge t+1, année n                                    |           |          |   |
|     | h X ↔ Y          | rappel " " " , " n+1   |           |          |   |
|     | STO (i)          | échange n à n+1 en (i)                                       |           |          |   |
| 125 | h R ↓            | rappel effectif année n                                      |           |          |   |
|     | f INT            | $K \cdot N_{t+1}^n$  |           |          |   |
|     | STO A            | sauvegarde   |           |          |   |

| PAS | FONCTION | COMMENTAIRE  |  |  |  |
|-----|----------|--|--|--|--|
| 161 | f LBL D  | + Programme BIOMASSE   |  |  |  |
|     | CL X     | avec interpolation   |  |  |  |
|     | x        |  |  |  |  |
|     | x        | mise à zéro  |  |  |  |
| 165 | RCL D    | $t_0$  |  |  |  |
|     | h RC I   | t initial  |  |  |  |
|     | -        |  |  |  |  |
|     | f X = 0  | t init. = $t_0$ ?  |  |  |  |
|     | GTO 7    | oui, saut  |  |  |  |
| 170 | f DSZ    | non, se replacer à t-1   |  |  |  |
|     | f LBL 9  | + boucle I à T   |  |  |  |
|     | h R ↓    |  |  |  |  |
|     | RCL (1)  |  |  |  |  |
|     | g FRAC   | $\bar{w}_{t-1/K}$  |  |  |  |
| 175 | f ISZ    | reprendre t  |  |  |  |
|     | RCL (1)  |  |  |  |  |
|     | g FRAC   | $\bar{w}_t/K$  |  |  |  |
|     | +        |  |  |  |  |
|     | 2        |  |  |  |  |
| 180 | :        | $\bar{w}_{N,t} = \frac{1}{2}(\bar{w}_{c,t-1} + \bar{w}_{c,t})$ |  |  |  |
|     | GTO 8    | saut   |  |  |  |
|     | f LBL 7  | + t init. = $t_0$  |  |  |  |
|     | RCL (1)  |  |  |  |  |
|     | g FRAC   | $\bar{w}_{N,to} = \bar{w}_{c,to}$                              |  |  |  |
| 185 | f LBL 8  | + reprise  |  |  |  |
|     | RCL (1)  | $K \cdot N_t$  |  |  |  |
|     | f INT    |  |  |  |  |
|     | x        | $N_t \cdot \bar{w}_t$  |  |  |  |
|     | +        | cumul  |  |  |  |
| 190 | RCL E    | T  |  |  |  |
|     | h RC I   | t  |  |  |  |
|     | -        |  |  |  |  |
|     | f X ≠ 0  | t = T ?  |  |  |  |
|     | GTO 9    | non, reprendre la boucle                                       |  |  |  |
| 195 | h R ↓    | remettre le cumul en X   |  |  |  |
|     | DSP 2    |  |  |  |  |
|     | h RTN    | - FIN: lire la biomasse  |  |  |  |

| REG. | Données                  | LBL A<br>survie r,n                                      | LBL B<br>prédiction n, n+1                                       | reprise LBL B<br>prédiction n+1, n+2 | LBL C ou D<br>Biomasse |
|------|--------------------------|--|--|--------------------------------------|------------------------|
| A    | $\bar{w}_{20}$ éventuels | K entier   | $K \cdot N_t^n$ variable   | $K \cdot N_t^{n+1}$                  |                        |
| B    | $\bar{w}_{21}$           | (K, M)   | (K, M)   | (K, M)                               |                        |
| C    | 0                        | 0  | cumul $Y_t^n$  | cumul $Y_t^{n+1}$                    | Réglés                 |
| D    | to                       | to   | to   | to                                   | inchangés              |
| E    | T                        | T  | T  | T                                    | sauf:                  |
| I    | t variable               | t  | t  | t                                    | 1er âge pris en compte |
| R 0  | -                        | -  | -  | -                                    |                        |
| •    |                          |  |  |                                      |                        |
| •    |                          |  |  |                                      |                        |
| R to | $\bar{w}_{to}$           | $\bar{w}_{to}/K$   | $(K \cdot R^n, \bar{w}_{to}/K)$                                  |                                      |                        |
| •    |                          |  |  | mêmes                                |                        |
| •    |                          |  |  | paramètres                           | Inchangés              |
| R t  | $\bar{w}_t$              | $(K \cdot N_t^n, \bar{w}_t/K)$                           | $(K \cdot N_t^{n+1}, \bar{w}_t/K)$                               | année                                |                        |
| •    |                          |  |  | n+2                                  |                        |
| •    |                          |  |  |                                      |                        |
| R T  | $\bar{w}_T$              | $(K \cdot N_T^n, \bar{w}_T/K)$<br>$(+K \cdot N_{T+1}^n)$ | $(K \cdot N_T^{n+1}, \bar{w}_T/K)$<br>$(+K \cdot N_{T+1}^{n+1})$ |                                      |                        |
| •    |                          |  |  |                                      |                        |
| •    |                          |  |  |                                      |                        |
| R 19 | -                        | -  | -  | -                                    |                        |
|      | Carte $\bar{w}$          | Carte n  | Carte n+1  |                                      |                        |