
Analyse rectifiée des pseudo-cohortes

Activité 'MODELES EN ENVIRONNEMENT DATA-POOR'
GT ISTAM, 6-12 November 2006

—
Chassot E, Guitton J et D Gascuel

1 Introduction

L'analyse des cohortes (Gulland, 1965 ; Murphy, 1965) est une méthode d'estimation des taux instantanés de mortalité par pêche (F) ayant affecté le stock au cours du temps et des effectifs (N) passés du stock, à partir de données de captures aux âges. Elle pose comme unique hypothèse que les taux instantanés de mortalité totale (naturelle et par pêche) d'une cohorte donnée peuvent être représentés par une valeur constante au cours d'un intervalle de temps donné. L'analyse des cohortes est le plus souvent conduite en mode inverse car elle a l'avantage d'intégrer une propriété fondamentale de convergence (Jones, 1961 cité par Mesnil, 1980) : l'erreur relative liée aux procédures d'estimation d'une valeur de F_T (choix arbitraire ou calibration sur des données externes) tend à s'estomper lorsqu'on estime les paramètres démographiques (effectif et mortalité) des groupes d'âges les plus jeunes de la population recrutée. Pour les âges les plus élevés, la convergence ne joue guère mais les conséquences de ces incertitudes sont d'autant plus réduites que le stock est intensément exploité, les groupes d'âges les plus âgés ayant alors peu de poids dans les captures (Laurec, 1993).

L'application de l'analyse des cohortes nécessite cependant la connaissance de la structure démographique des captures sur plusieurs années. Dans le cas de nombreuses pêcheries d'Afrique de l'Ouest, de telles séries de données sont rarement disponibles. Une analyse de pseudo-cohorte peut alors être conduite en s'appuyant sur les données relatives à quelques années, voire une seule. Cette analyse suppose que le stock et les pêcheries se sont conformés à une hypothèse d'équilibre, i.e. le recrutement et les mortalités aux différents âges sont supposés constants au cours des années précédentes celle qui est considérée. Lorsque cette hypothèse n'est pas respectée (et cela est souvent le cas), on montre aisément que l'analyse peut conduire à des résultats profondément erronés. En particulier, en période d'expansion des pêcheries (efforts croissants), les mortalités peuvent être gravement sous-estimées, conduisant à un diagnostic éminemment optimiste qui peut être lourd de conséquences. Pour pallier à cette hypothèse d'équilibre, Laurec et Santarelli-Chaurand (1986) ont proposé un algorithme qui permet de substituer à l'hypothèse de constance des mortalités aux âges celle d'une capturabilité aux âges constante d'une année sur l'autre. Cette hypothèse s'avère beaucoup moins contraignante et n'a pas les conséquences néfastes précédemment évoquées. Bien que cela soit d'un usage plus rare, il est également possible d'intégrer au modèle d'éventuelles variations interannuelles de recrutement lorsque des indices sont disponibles. La méthode permet ainsi de tenir compte d'éventuels changements d'efforts de pêche et/ou du recrutement pour corriger les estimations obtenues sous hypothèse d'équilibre. Elle a été utilisée comme première approche d'évaluation

pour différents stocks sur lesquels peu d'information était disponible (Santarelli-Chaurand, 1985 ; Bertignac, 1987 ; Lorance et al., 2001), en particulier dans le cas de ressources marines d'Afrique de l'Ouest (Sidibé, 2003 ; Sidibé et al., 2003 ; Laurans, 2005) à partir du logiciel ANACO développé par la FAO (Mesnil, 1988).

Les objectifs de la sous-activité "Analyse rectifiée des pseudo-cohortes" au sein de l'activité "Modèles en environnement data-poor" sont de (1) présenter les hypothèses, principes et équations de la méthode d'analyse rectifiée des pseudo-cohortes, (2) développer la méthode sous le logiciel libre R, (3) l'appliquer à un certain nombre de cas d'étude identifiés par les partenaires du projet ISTAM afin d'en montrer l'intérêt en terme d'évaluation pour certaines pêcheries ouest-africaines. Les scripts développés sous le logiciel en R ainsi qu'un exemple commenté sont fournis en annexe. Cette sous-activité sera par ailleurs utilisée en complément de l'activité "conversion taille/âge" pour tester le sensibilité des diagnostics scientifiques à l'estimation des paramètres de croissance.

2 Rappels

2.1 Définitions

Cohorte. Une cohorte est définie comme l'ensemble des individus d'un stock donné, nés à une période donnée. Dans les cas simples, il existe une seule saison de reproduction par an et donc une cohorte par an. La cohorte est alors définie soit par son année de naissance, soit par son année de recrutement. Tous les animaux d'une cohorte appartiennent donc au même groupe d'âge, et changent naturellement de groupe d'âge (mais pas de cohorte!) chaque année. Le stock, quant à lui, est constitué à un moment donné de différentes cohortes correspondant à différents groupes d'âge.

Pseudo-cohorte. Une pseudo-cohorte est définie comme l'ensemble des individus observés à différents âges, non pas d'année en année au fil de la vie d'une cohorte vraie, mais au cours d'une année donnée.

Si les recrutements et les taux de mortalité par âge sont identiques d'année en année au cours de la période considérée, le stock est dit en équilibre et les états de la pseudo-cohorte aux âges successifs une année équivalent ceux de l'une quelconque des cohortes du stock au cours du temps.

2.2 Équations de l'analyse des cohortes

L'analyse des cohortes s'appuie sur deux formules essentielles : l'équation de survie et l'équation des captures. Le pas de temps le plus souvent utilisé est l'année bien que l'utilisation d'un autre pas de temps et l'identification de plusieurs périodes de reproduction au cours de ce pas de temps modifient peu le formalisme retenu (Laurec, 1993).

L'équation de survie implique que la décroissance de l'effectif d'une classe annuelle est une fonction exponentielle du temps :

$$N_{t+1, a+1} = N_{t, a} \exp(-(F_{t, a} + M_{t, a})) \quad (1)$$

où N représente les effectifs de poissons, t est l'âge, a est l'année, F est le taux de mortalité par pêche et M est le taux de mortalité naturelle.

L'équation des captures exprime le fait que le nombre d'individus pêchés au cours de la période de temps a est proportionnel à l'effectif moyen de la cohorte :

$$C_{t, a} = \frac{F_{t, a}}{F_{t, a} + M_{t, a}} N_{t, a} [1 - \exp(-(F_{t, a} + M_{t, a}))] \quad (2)$$

où C représente les captures.

A partir de ces équations, on peut établir une relation (3) qui permet de déduire les effectifs du stock par groupe d'âge (N_t) et les mortalités par pêche (F_t) de la connaissance des captures (C_t) et des mortalités naturelles (M_t) :

$$N_{t+1, a+1} = C_{t, a} \frac{(F_{t, a} + M_{t, a}) \exp(-(F_{t, a} + M_{t, a}))}{F_{t, a} (1 - \exp(-(F_{t, a} + M_{t, a})))} \quad (3)$$

2.3 Analyse non rectifiée des pseudo-cohortes

L'analyse des pseudo-cohortes "classique" suppose que le recrutement et les mortalités aux différents âges sont demeurés constants au cours des années d'exploitation qui ont conduit aux données de captures observées. Cette hypothèse d'un stock à l'équilibre permet d'estimer simplement les effectifs N du stock et les mortalités par pêche F exercées par les flottilles. Le calcul repose sur les équations (1) et (2) et nécessite d'être initialisé par une valeur de mortalité F_T par pêche à l'âge terminal. L'estimation de la mortalité à l'âge t à partir de M_t , C_t et N_{t+1} nécessite un calcul par itérations car il n'est pas possible d'exprimer analytiquement F_t en fonction de ces paramètres. La fonction 'optim' du logiciel R (R Development Core Team, 2006) est utilisée pour estimer la valeur de F à chaque âge. Le principe de résolution est résumé dans la Figure 1a.

Il est également possible pour l'analyse de pseudo-cohorte de recourir à l'approximation de Pope (1972) qui permet de calculer les effectifs directement à partir des données de mortalité naturelle (généralement supposée constante aux âges), et de captures (Fig. 1b) :

$$N_t = N_{t+1} \exp(M_t) + C_t \exp(M_t/2) \quad (4)$$

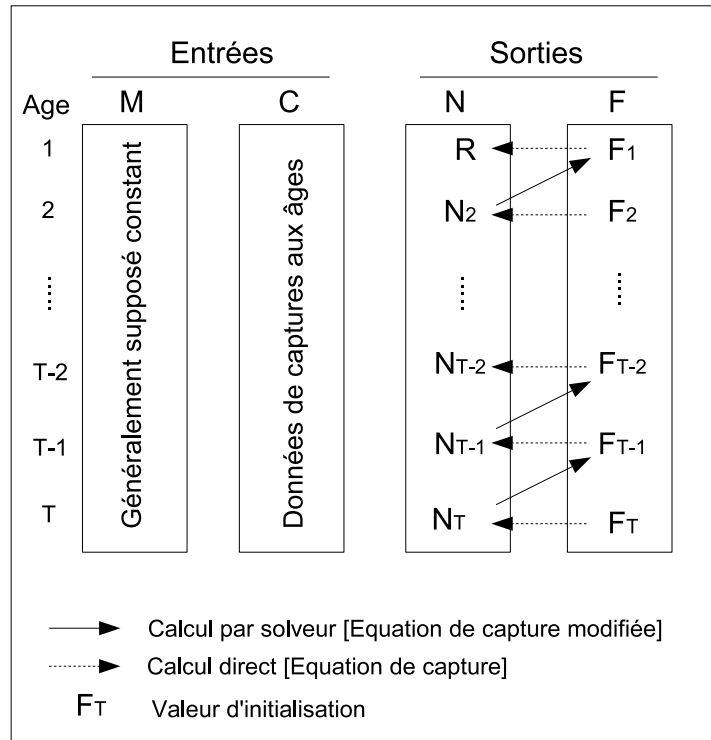


FIG. 1 – Schéma représentant le calcul des effectifs et des mortalités par pêche aux âges dans le cas d'une analyse de pseudo-cohorte.

où t est l'âge, N représente les effectifs, M le taux de mortalité naturelle et C les captures.

Dans un deuxième temps, les mortalités par pêche sont ainsi déduites des effectifs à partir de l'équation de survie (Éq. 1). L'approximation de Pope (1972) est considérée acceptable pour des valeurs de F inférieures à 1,2 et des valeurs de M ne dépassant pas 0,3. Dans ces limites, l'erreur relative sur les effectifs N_t n'excède pas 4% par rapport aux résultats de la méthode générale.

3 Analyse rectifiée des pseudo-cohortes

3.1 Données initiales

Les données initiales nécessaires à la résolution du modèle sont :

- $C_{t,g,A}$: les captures à l'âge t , pour le métier g et pour l'année finale A ,
- $E_{g,a}$: l'effort de pêche du métier g pour l'année a ,
- M_t : la mortalité naturelle supposée constante pour l'âge t quelque soit l'année,
- R_a : le recrutement de l'année a (et notamment R_A pour la dernière année).

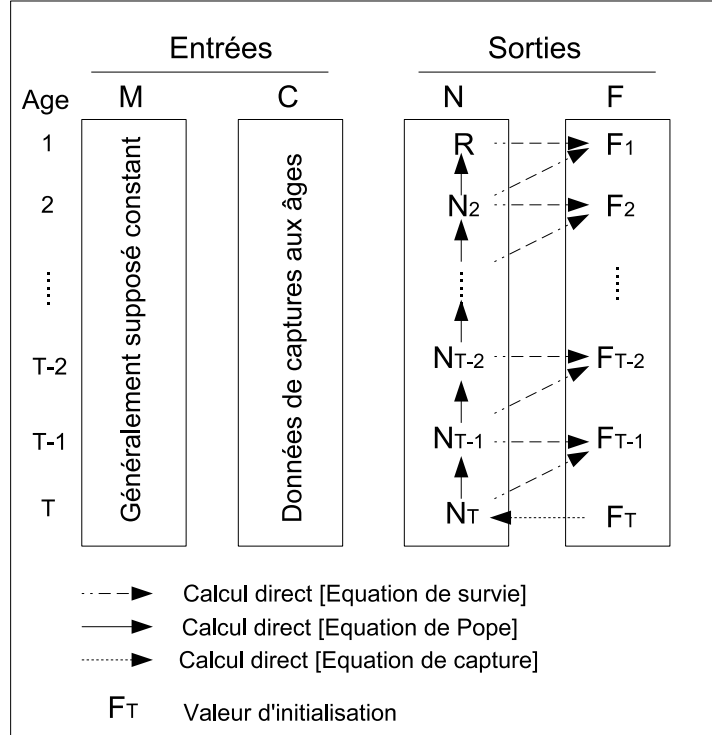


FIG. 2 – Schéma représentant le calcul des effectifs et des mortalités par pêche aux âges dans le cas d'une analyse de pseudo-cohorte en utilisant l'approximation de Pope (1972).

3.2 Principes de résolution

Par rapport aux méthodes classiques de calcul de l'analyse des cohortes qui sont réalisées en mode ascendant (ou indirect), l'analyse rectifiée des pseudo-cohortes est conduite en mode descendant (ou direct), i.e. du plus jeune vers le plus vieux groupe d'âge exploité. Elle repose sur un processus itératif qui s'appuie sur des re-formulations des équations de survie et de captures.

- L'équation des captures permet d'estimer la mortalité par pêche F par un processus itératif, en initialisant le calcul par une valeur de recrutement R suivant l'équation des captures :

$$C_{t,A} = N_{t,A} \frac{F_{t,A}}{F_{t,A} + M_t} (1 - \exp - (F_{t,A} + M_t)) \quad (5)$$

où $C_{t,A}$, $N_{t,A}$ et $F_{t,A}$ représentent respectivement les captures, les effectifs et les mortalités par pêche à l'âge t pour l'année finale A (année disponible) et M_t est la mortalité naturelle, supposée constante pour chaque âge et chaque année.

- La mortalité par pêche $F_{t,A,g}$ à l'âge t pour l'année A et le métier g est estimée au prorata des captures effectuées par le métier g , suivant l'équation dite équation de ventilation :

$$F_{t,A,g} = F_{t,A} \frac{C_{t,A,g}}{C_{t,A}}$$

où $F_{t,A}$ a été estimée précédemment (Eq. 5), $C_{t,A,g}$ représente les captures à l'âge t pour l'année A de le métier g et $C_{t,A}$ représente les captures totales à l'âge t pour l'année A .

• A partir de l'estimation de $F_{t,A}$, la capturabilité $q_{t,g}$ de l'âge t pour chaque métier g est estimée suivant l'hypothèse de séparabilité :

$$q_{t,g} = \frac{F_{t,A,g}}{E_{A,g}}$$

où $E_{A,g}$ est l'effort de pêche du métier g l'année A .

• Connaissant les capturabilités et la mortalité par pêche, l'équation de survie permet alors d'estimer les effectifs suivant :

$$N_{t,A} = R_A \exp - \left(\sum_{k=1}^{t-1} \left(\sum_{g=1}^G q_{k,g} E_{A-(t-k),g} \right) + (t-1)M \right) \quad (6)$$

où $N_{t,A}$ représente les effectifs de la classe d'âge t l'année A , R_A est le recrutement de l'année A , G est le nombre de métiers, $q_{k,g}$ est la capturabilité à l'âge k du métier g et $E_{A-(t-k)}$ est l'effort de pêche du métier g l'année $A - (t - k)$.

On notera que la méthode est souvent utilisée en considérant que l'ensemble de la pêcherie constitue une seule flottille, ce qui simplifie évidemment les équations. Il reste cependant vrai que l'hypothèse de séparabilité est moins contraignante lorsqu'elle peut s'appliquer à un métier clairement défini.

3.3 Corriger les variations de recrutement

Lorsque l'on dispose d'une série d'indications sur les variations interannuelles de recrutement (e.g. prises par unité d'effort commerciales pour le premier groupe d'âge), le recrutement R_a peut être exprimé en fonction du recrutement R_A de l'année finale et des indices de recrutement IR disponibles :

$$R_a = R_A \frac{IR_a}{IR_A} \quad (7)$$

L'équation (6) est alors ré-exprimée suivant :

$$N_{t,A} = R_a \exp - \left(\sum_{k=1}^{t-1} \left(\sum_{g=1}^G q_{k,g} E_{A-(t-k),g} \right) + (t-1)M \right) \quad (8)$$

La procédure de résolution afin d'estimer les effectifs N et mortalités par pêche F à partir de la valeur d'initialisation de recrutement R_A pour l'année finale I peut être résumée dans la figure (3).

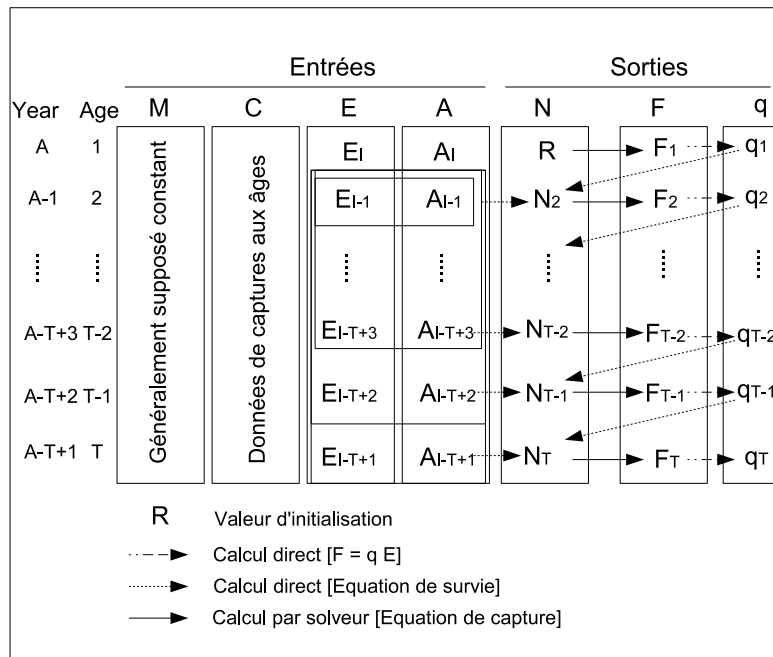


FIG. 3 – Schéma représentant le calcul des effectifs et des mortalités par pêche aux âges dans le cas d'une analyse de pseudo-cohorte rectifiée.

L'initialisation de la procédure nécessite que l'on introduise soit le recrutement R_A de l'année finale, soit une estimation de la mortalité par pêche ou de la capturabilité du groupe d'âge au recrutement. Pour se retrouver dans les conditions "classiques" d'analyse des cohortes, l'initialisation se fait par le choix d'une mortalité par pêche sur l'âge terminal (soit $F_{T,A}$, un processus itératif au sein de l'algorithme de résolution permettant alors d'estimer le recrutement qui conduit à la valeur de F terminale d'initialisation (Mesnil, 1988).

4 Cas d'étude

4.1 Le bobo de Guinée

4.2 La sardinelle de Mauritanie

4.3 Le merlu d'Espagne

5 Références

- Bertignac, M. (1987). L'exploitation du bar (*Dicentrarchus labrax*) dans le Mor Bras (Bretagne Sud). Thesis. Rennes No. 7. Publ. Dep. Halieut. Ec. Natl. Super. Agron., 235 pp.
- Gulland, J.A. (1965). Estimation of mortality rates. Annex to Arctic Fisheries Working Group Report (mimeo).
- Jones, R. (1961). The assessment of the long-term effects of changes in gear selectivity and fishing effort. Marine Resources of Scotland, 2, 19p.
- Laurans, M. (2005). Evaluation des ressources halieutiques en Afrique de l'ouest : dynamique des populations et variabilité écologique. Thèse pour l'obtention du Diplôme de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, mention Halieutique, Rennes, France.
- Laurec, A. (1993). Étalonnage de l'analyse des cohortes en halieutique. In Lebreton, J.D. et Asselain, B. (eds), Biométrie et Environnement. Masson, Paris, France, pp. 205-239.
- Laurec, A., Santarelli-Chaurand, L. (1986). Analyse rectifiée des pseudo-cohortes (Analyse des cohortes à partir d'une année de structures démographiques des captures corrections des variations d'effort et/ou de recrutement), 19 pp. Unpublished report.
- Lorance, P., Dupouy, H., and Allain, V. (2001). Assesment of the roundnose grenadier (*Coryphaenoides rupestris*) stock in the Rockall Trough and neighbouring areas (ICES Subareas V-VII). Fisheries Research, 51, 151-163.
- Mesnil, B. (1980). Théorie et pratique de l'analyse des cohortes. Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes, 44, 119-155.
- Mesnil B. (1988). Logiciels pour l'évaluation des stocks de poissons. ANACO : Logiciel d'analyse des données de captures par classe d'âge sur IBM PC et compatibles. FAO Doc. Tech. Pêche, 101, suppl. 3 : 78p
- Murphy, G.I. (1965). A solution of the catch equation. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 22(1),191-2002.
- Pope, J.G. (1972). An investigation of the accuracy of Virtual Population Analysis using Cohort Analysis. ICNAF Research Bulletin, 9, 65-74.
- R Development Core Team. 2006. R : a language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria.
- Santarelli-Chaurand, L. (1985). Les pêcheries de Buccin (*Buccinum undatum* L. Gastropoda) du golfe Normand-Breton. Eléments de gestion de la ressource. Thesis Univ. Aix-Marseille II, Fac. Sci. Luminy, 194 pp.

Sidibé, A. (2003). Les ressources halieutiques démersales côtières de la Guinée : exploitation, biologie et dynamique des principales espèces de la communauté à Sciaenidés. Thèse de Doctorat Halieutique, Ensa-Rennes, 320 p.

Sidibé, A., Gascuel, D. and F. Domain. (2003). Evaluation et diagnostic par l'approche structurale : application à quatre stocks de poissons démersaux côtiers de Guinée (*Galeoides decadactylus*, *Pseudolithus elongatus*, *P. senegalensis* et *P. typus*). In Gascuel, D., Barry, M., Laurans, D. and A. Sidibé. (eds). 2003. Evaluation des stocks démersaux en Afrique du Nord-Ouest. Travaux du groupe "Analyses monospécifiques" du projet SIAP. COPACE/PACE/SERIES 03/65. FAO, Rome : pp. 79-100.

6 Annexes

Annexe 1 – Exemple d'application : le bar du MORBRAS

L'exemple de la pêcherie de bar (*Dicentrarchus labrax*) du MORBRAS (Bretagne Sud) est considéré pour illustrer les résultats d'une application de la méthode de pseudo-cohorte rectifiée développée sous R. On reprend ici les données disponibles dans la thèse de doctorat de Bertignac (1987) qui a pris en compte 4 métiers exploitant le bar : les palangriers, les chalutiers pélagiques, les chalutiers petite pêche côtière et un métier "divers" qui regroupe les chalutiers petite pêche polyvalents, les métiers de traîne et les fileyeurs.

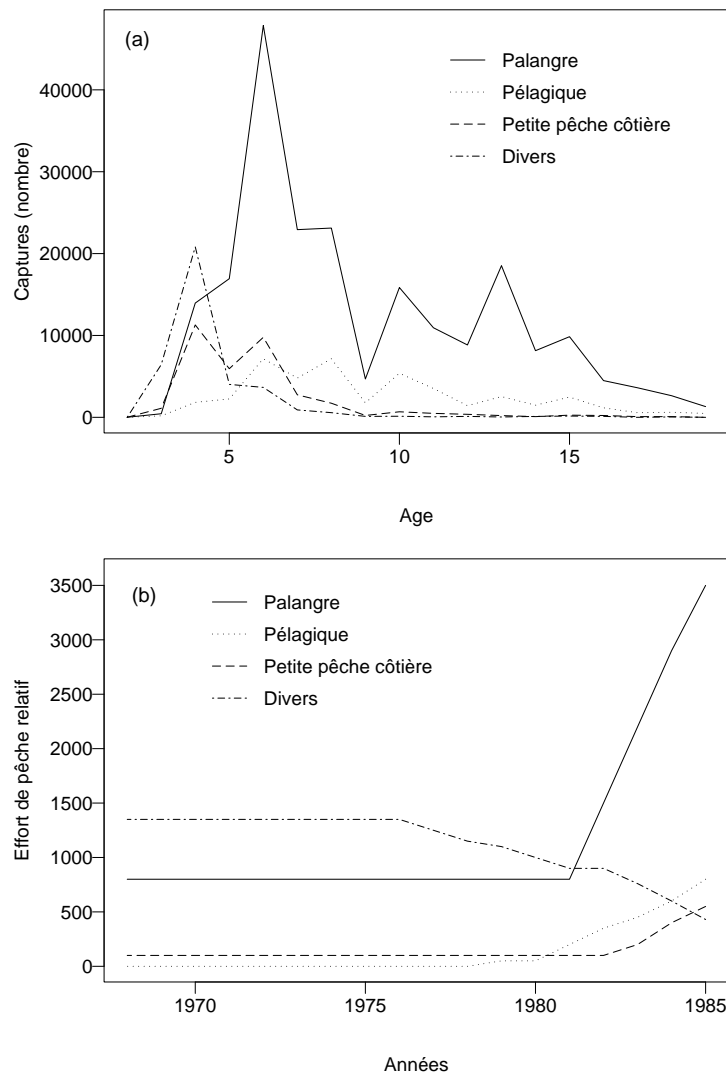


FIG. 4 – (a) Effectifs de bar débarqués par groupe d'âge et par métier dans le MORBRAS en 1985 (b) Évolution temporelle des efforts effectifs par métier exploitant le bar dans le MORBRAS de 1968 à 1985.

Les données d'entrées sont principalement constituées des captures par âge en effectifs et des séries temporelles indiquant l'évolution de l'effort de pêche de 1968 à 1985 (Fig. 4). La reconsti-

tution des efforts effectifs de chaque métier s'est appuyée sur une procédure de standardisation basée sur les puissances relatives de chaque métier (Bertignac, 1987). Le coefficient de mortalité naturelle est considéré constant aux âges et dans le temps et supposé égal à 0,2. L'analyse est conduite sous l'hypothèse d'un recrutement constant.

Les résultats de l'analyse de pseudo-cohorte rectifiée qui permet d'intégrer l'évolution des efforts de pêche sont résumés dans les figures 5b et c.

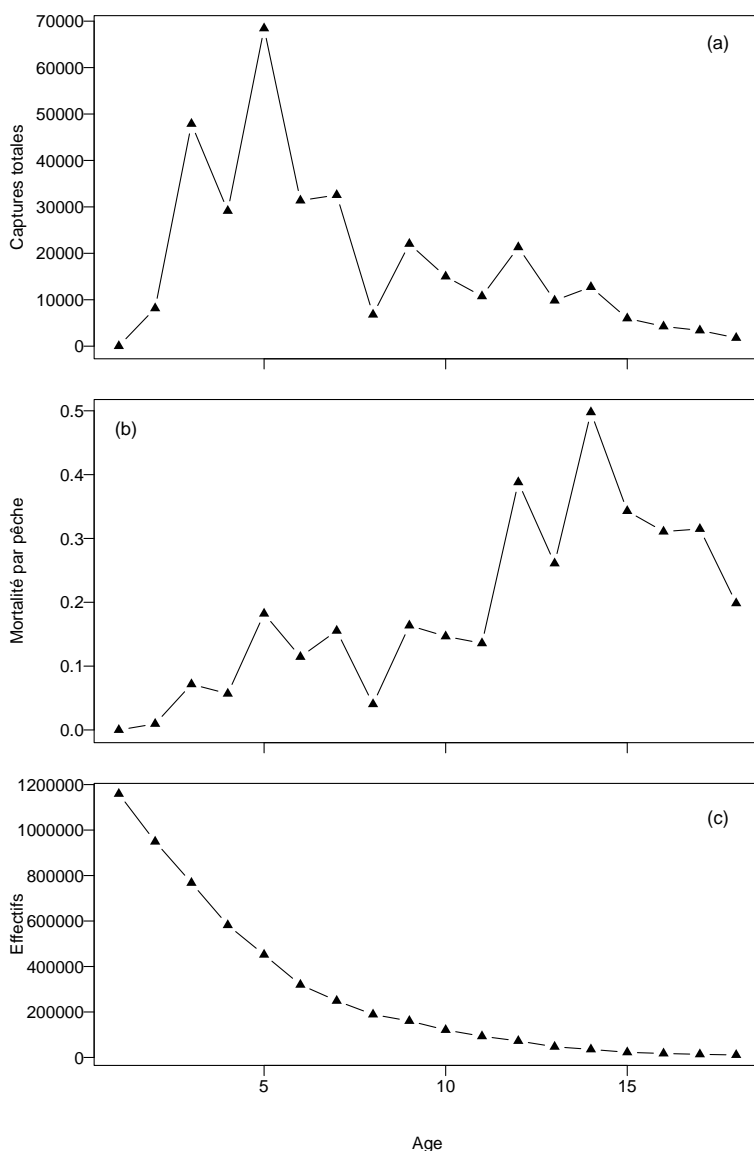


FIG. 5 – (a) Captures totales (débarquements) par groupe d'âge en 1985 (b) Mortalité par pêche par groupe d'âge estimée par la méthode de pseudo-cohorte rectifiée (c) Effectifs par âge reconstitués à partir de l'analyse de pseudo-cohorte.

L'analyse de sensibilité conduite sur les valeurs de mortalité par pêche terminale met en évidence le phénomène de convergence (Jones, 1961 cité par Mesnil, 1980) et montre que l'erreur potentiellement commise sur la mortalité par pêche terminale a peu d'influence sur les

mortalités par pêche estimées pour les 14 premier groupes d'âges (Fig. 6).

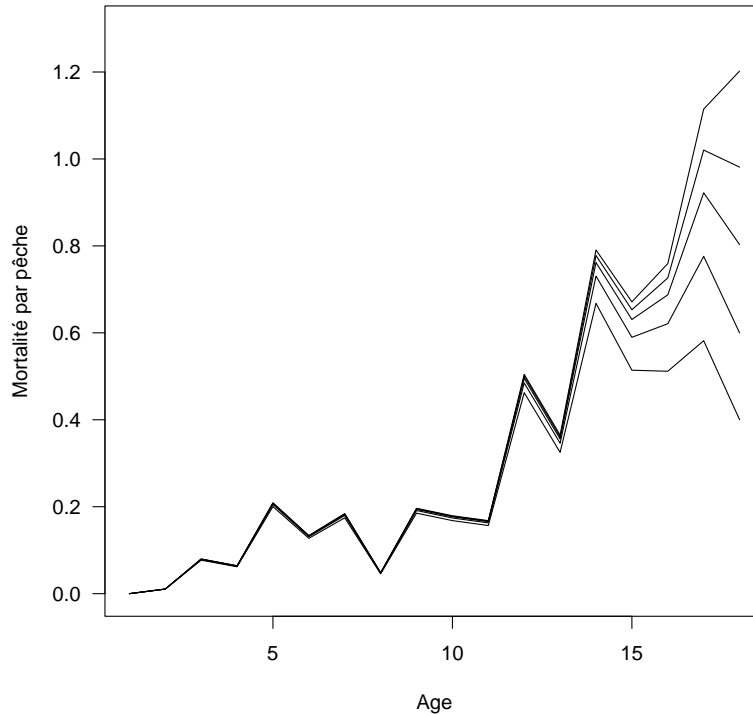


FIG. 6 – Analyse de sensibilité montrant l'impact des valeurs de mortalité par pêche terminale F_T sur le vecteur de mortalité par pêche aux âges estimé par pseudo-cohorte rectifiée.

Un diagnostic de rendement par recrue peut alors être conduit à partir du vecteur de mortalité par pêche estimé pour la dernière année (i.e. 1985) en supposant le taux de mortalité naturelle constant et égal à 0,2. Le diagnostic indique une bonne utilisation du recrutement selon le diagramme d'exploitation en vigueur dans la pêcherie puisque la mortalité par pêche moyenne en 1985 équivaut à la valeur de maximisation F_{max} du rendement par recrue (Fig. 7). Néanmoins, ce diagnostic optimiste était à nuancer en 1985 puisque la situation d'équilibre prévue par ce modèle conduisait en fait à une diminution importante des captures de 20% (sous l'hypothèse de recrutement constant), la situation de production étant non équilibrée du fait du développement récent de la pêcherie (Bertignac, 1987).

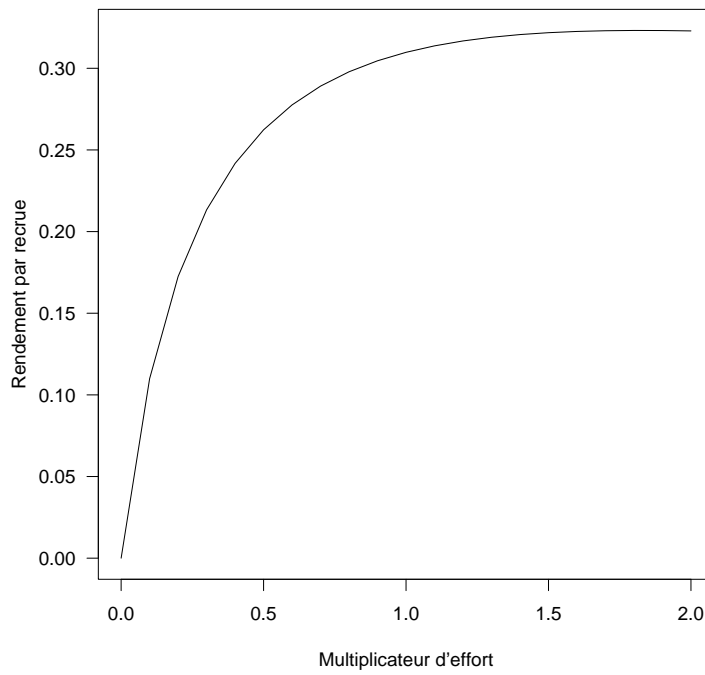


FIG. 7 – Diagnostic de rendement par recrue conduit à partir du vecteur de mortalité par pêche estimé par pseudo-cohorte rectifiée et considérant un multiplicateur d'effort de pêche allant de 0 à 2.

Annexe 2 – Code R de programmation de la pseudo-cohorte rectifiée

```
### Données d'entree
# Contient les vecteurs aux ages de mortalite naturelle (MAT_M) et de capture (MAT_C)
MAT_C<-read.csv("captures-bar.txt",header=T,sep=' ')
MAT_Eff<-read.csv("efforts-bar.txt",header=T,sep=' ')
recrutement<-read.csv("recrutement-bar.txt",header=T,sep=' ')
attach(recrutement)
Mortal<-as.vector(read.csv("mortalite-bar.txt",header=T,sep=' '))
attach(Mortal)

age<-length(MAT_M)

### Fonction calculant la différence entre les captures (observées) et l'expression des
captures
# en fonction de N, M et F (x : inconnu) – La minimisation de cette fonction permet
l'estimation de F

F_a_min <- fonction(x)
{
res<-(MAT_CTOT[indice]-(MAT_N2[indice]*(x/(x+MAT_M[indice]))*(1-exp(-x-
MAT_M[indice])))))^2
res
}

### Calcul des effectifs à chaque âge à partir de la série d'effort et de recrutement
# et de la capturabilité selon l'équation de survie
F_effectif1<-fonction(indice)
{ res<-MAT_N2[1]*(MAT_rec[indice+1]/MAT_rec[1]) #calcul du R qui a conduit à l'effectif
i<-1
for (j in indice :1)
{

if (nb_flot < 2)
{
res<-res*exp(-(MAT_Q[i,]*MAT_Eff[j+1,])-MAT_M[j]) # calcul de l'effectif (1 seul métier)
}
else
{
res<-res*exp(-apply((MAT_Q[i,]*MAT_Eff[j+1,]),1,sum)-MAT_M[j]) # calcul de l'effectif
(multi-métiers)
}
}
}
```

```

i<-i+1
}
res
}

### VPA rectifiée descendante à partir d'une valeur initiale de R
F_pseudo_rectif<-function(init)
{

MAT_F2<<-MAT_C/MAT_CTOT # attention, initialisation de F2 au ratio de chaque métier
indice<<-1
MAT_N2[indice]<<-init
MAT_F2[indice,]<<-MAT_F2[indice,]*optim(MAT_N2[indice],F_a_min)$par # réallocation du
F estimé pour chaque métier
MAT_Q[indice,]<<-MAT_F2[indice,]/MAT_Eff[1,]
MAT_N2[indice+1]<<-F_effectif1(indice)

for(compteur in 2 :(age))
{
indice<<-compteur
MAT_F2[indice,]<<-MAT_F2[indice,]*optim(MAT_CTOT[indice-1],F_a_min)$par
MAT_Q[indice,]<<-MAT_F2[indice,]/MAT_Eff[1,]

if (indice<age) MAT_N2[indice+1]<<-F_effectif1(indice)
}
if (nb_flot < 2)
{
MAT_F2[age,] # si 1 seul engin
}
else
{
apply(MAT_F2[age,],1,sum) # si multi-engins
}
}

### VPA rectifiée à partir d'une valeur initiale de FT
F_pseudo_rectif_global<-function(init)
{

```



```
res<-(FT-F_pseudo_rectif(init))^2
res
}

### Initialisation du recrutement par la méthode de Pope - minimisation nécessite d'initialiser
# le calcul par une valeur "pas trop loin" de la solution

#Calcul_N_Pope<-function(indice)
F_rempli_N <- function(indice)
{
MAT_N[indice]<<-MAT_N[indice+1]*exp(MAT_M[indice])+MAT_CTOT[indice]*exp(MAT_M[indice]/2)
}
#Calcul_F_Pope<-function(indice)
F_rempli_F <- function(indice)
{
MAT_F[indice]<<-log(MAT_N[indice]/MAT_N[indice+1])-MAT_M[indice]
}

# Calcule l'effectif à l'age a en connaissant M(a), F(a) et C(a)
F_effectif<-function(age)
{
res<-MAT_C[age]*(MAT_M[age]+MAT_F[age])/(MAT_F[age]*(1-exp(-MAT_M[age]-
MAT_F[age])))
res
}

F_effectiftot<-function(age)
{
res<-MAT_CTOT[age]*(MAT_M[age]+MAT_F[age])/(MAT_F[age]*(1-exp(-MAT_M[age]-
MAT_F[age])))
res
}

##### Methode de Pope #####

# Analyse en pseudo-cohorte isolée à partir d'une valeur initiale de F
VPA_Pope<-function(init)
{
#Affichage de la valeur initiale cad de la mortalite par pêche terminale
#print(paste("La valeur de F terminal est", $init))
```

```
print(init)

# Calculs suivant l'approximation de Pope
# Valeurs terminales de F et N
MAT_F[age]<<-init
MAT_N[age]<<-F_effectiftot(age)

# Calcul des effectifs et mortalites par pêche suivant Pope (pas de solveur)
for(i in 2 :age-1) {
  F_rempli_N(age-i)
  F_rempli_F(age-i)
}
}

indice<-age

# Initialisation des valeurs des paramètres
MAT_F<-rep(NA,age) # mortalité par pêche méthode de Pope
MAT_N<-rep(NA,age) # effectifs méthode de Pope
MAT_N2<-rep(NA,age) # effectifs méthode rectifiée
nb_flot<-length(MAT_C[1,]) # nombre de flottilles
MAT_CTOT<-apply(MAT_C,1,sum) # somme des captures de chaque flottille
MAT_Q<-MAT_C #initialisation des capturabilites par les captures
indice<-1 # âge de recrutement

# Résolution par la méthode de Pope
VPA_Pope(0.2)
MAT_N

### VPA rectifiée - initialisation en R
MAT_F2<-MAT_C/MAT_CTOT
R_init<-929926 # valeur issue de Bertignac, 1987
F_pseudo_rectif(R_init)

# VPA rectifiée - initialisation en FT
FT<-0.2
R_init<-MAT_N[1]
optim(R_init,F_pseudo_rectif_global)$par
```

```
# Affichage des résultats  
MAT_N2  
MAT_F2  
MAT_Q
```