

Research paper

Mise en place d'une procédure statistique pour la sélection des modèles en halieutique

Amine AMAR^{1,*}, Zine El abidine GUENNOUN¹

¹Faculté des sciences de Rabat, Université Mohamed V-Agdal, Département de mathématiques et d'informatique, 4 Avenue Ibn Battouta BP 1014 RP, Rabat, Maroc

*Correspondance: Tél.: (+212) 0537-77-54-71; Télécopie: (+212) 0537-77-54-71; Courriel: amar.abd@gmail.com
(A. Amar)

Reçu le 02 novembre 2009; accepté le 11 janvier 2010; Publié en ligne le 01/03/2010
MS 021009-01

Résumé

L'un des problèmes inhérents à l'évaluation des stocks halieutiques réside dans le fait que chaque modèle d'évaluation proposé peut reposer sur une théorie particulière. Ainsi, les halieutes peuvent se retrouver face à un dilemme avec plusieurs modèles incomparables. Notre travail vise la résolution de ce problème de comparabilité des modèles. Ce papier se base essentiellement sur un article de Schnute (1985) qui présente une théorie générale basée sur un modèle de croissance et incluant la plupart des modèles existants comme cas particuliers. Le modèle global généralisé de Schnute présente une très grande souplesse pour décrire des relations entre CPUE (capture par unité d'effort) et l'effort de pêche. Une amélioration de cette théorie générale est présentée, elle consiste à mettre en place une procédure algorithmique pour la sélection de la forme la plus appropriée du modèle. La sélection est basée sur la procédure de Box et Jenkins, notamment par trois étapes: (i) identification, (ii) estimation et (iii) vérification (Box *et al.*, 2008), ainsi que par l'application de la théorie de la régression statistique, en particulier: (i) les tests permettant de juger la significativité des paramètres biologiques estimés (test t de student), (ii) un critère de sélection approprié qui intègre dans sa formule parcimonie et degré d'explication (AIC), (iii) analyse de la variance et enfin (iv) l'analyse des résidus permettant de tester les hypothèses du modèle. L'approche améliorée a été récapitulée dans un diagramme algorithmique et a été testée sur un stock national, le stock Marocain méridional d'*Octopus vulgaris* durant la période 1993-2003, en évaluant plusieurs scénarii possibles de modèles. La procédure proposée a abouti, dans notre cas d'étude, à la sélection d'un modèle unique à composantes constantes (mortalité, croissance, recrutement). Le modèle retenu fournit un R^2 et AIQ_c^2 significatifs (17 % et 12 % respectivement) dont les paramètres estimés sont statistiquement et biologiquement valides.

Mots-clés: Evaluation de stock, Ajustement, Modèle statistique, Croissance, Mortalité, Recrutement, Procédure de Box et Jenkins.

Abstract

One of the inherent problems of fish stock assessment is that each proposed model can be based on a particular theory. Thus, the fisheries manager can meet facing a dilemma with several incomparable models. Our work aims to resolve this comparability problem. This paper is essentially based on an article of Schnute (1985) who have presented a general theory based on a model of growth, which includes most of the existing models as particular cases. The Schnute's generalized model present a high suppleness to describe some relations between CPUE (catch per unit of effort) and the fishing effort. An improvement of this general theory is presented; it consists in setting up an algorithmic procedure for the selection of the most suitable shape of the model. The selection is based on the procedure of Box and Jenkins, notably by the three steps: (i) identification, (ii) evaluation and (iii) verification (analysis of the chronological sets:

forecasting and control), as well as by the application of the theory of the statistical regression, in particular: (i) the tests permitting to evaluate the signification of the biological parameters (t test of student), (ii) a suitable selection criteria which integrates in its formula parsimony and degree of explanation (called AIC), (iii) the analysis of variance and finally (iv) the analysis of the residues allowing to test the model hypotheses. The improved approach has been summed up in an algorithmic diagram and has been tested on a national stock, the Moroccan southern stock of *Octopus vulgaris* during the decade 1993-2003, by evaluating several possible model scenarios. The proposed procedure succeeded, in our case study, to the selection of only one model with constant components (mortality, growth, recruitment). The retained model provides a meaningful R² and AICR² (17 % and 12 % respectively) which the valued parameters are statistically and biologically valid.

Keys words: Stock assessment, Adjustment, Statistical model, Growth, Mortality, Recruitment, Box and Jenkins.

1. Introduction

Les ressources halieutiques représentent une richesse importante, du point de vue économique, écologique et social. A caractère renouvelable mais limité, les ressources halieutiques nécessitent leurs préservations dans le cadre d'un développement durable qui suppose la prise en compte de plusieurs éléments, notamment une bonne connaissance de leur dynamique qui permette l'appréciation de l'état des stocks. Ainsi, l'évaluation des ressources halieutiques s'avère nécessaire et primordiale pour une gestion durable et rationnelle des stocks. En termes précis, l'évaluation d'un stock halieutique signifie la détermination du statut de ce stock *i.e.* niveau d'abondance, distribution, composition par classe d'âge, influences sur l'écosystème, etc., et la capacité de pouvoir proposer des mesures efficaces de gestion. Le processus de l'évaluation comprend plusieurs étapes: (i) La description des méthodes et des objectifs appropriés au stock à évaluer; (ii) L'élaboration d'un plan de collecte des données; (iii) La modélisation et l'analyse; (iv) L'interprétation des résultats et les recommandations.

L'un des problèmes fondamentaux qui relèvent de la gestion des pêcheries, est la détermination du niveau des stocks à partir des séries chronologiques de l'effort de pêche et des captures. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été proposés. Ces modèles peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les modèles globaux et les modèles structurés par classe d'âge. Le modèle global considère le stock comme une biomasse homogène et ne prend pas en compte des paramètres comme la structure d'âge du stock. Les modèles analytiques quant à eux, se basent sur une description plus détaillée du stock et requièrent la connaissance de la composition en âge des captures (Haddon, 2001). Sachant que chacun des modèles de ces deux catégories se base sur une théorie spécifique, leurs résultats sont incomparables. Notre travail s'attache à répondre à cette question soulevée dans le cadre halieutique: quel modèle est le plus approprié pour un stock donné ? Schnute (1985) propose une théorie basée sur des équations naturelles pour une population structurée par classe d'âge. Au lieu d'un seul modèle fixe, il propose une classe de modèles qui peut être adaptée à une pêcherie donnée, et dont les modèles de Schaefer (1957), Pella et Tomlinson (1969), Schnute (1977), Deriso (1980), et Roff (1983) représentent des cas particuliers. Schnute (1985) postule que la méthode de détermination du cas particulier est essentiellement identique au problème de détermination d'un modèle que mentionnent Box et Jenkins (1970) relativement à l'analyse des séries chronologiques. Le modèle de Schnute implique des fonctions de l'âge du stock. Les relations entre ces fonctions permettent d'aboutir aux équations différentielles qui décrivent la dynamique du stock étudié (processus de croissance, de mortalité et de recrutement). La formulation finale du modèle de Schnute (1985) est l'équation de la capture.

Des outils statistiques seront présentés en vue d'améliorer la méthode de Schnute, afin de sélectionner la forme appropriée à un stock spécifique parmi les différentes variétés de l'équation de la capture. Cette amélioration qui n'a pas été considérée dans l'article de Schnute (1985), est testée et appliquée autour d'une étude de cas, l'évaluation du stock national d'*Octopus vulgaris* au Maroc. L'objectif de la procédure d'amélioration est de proposer les outils théoriques permettant d'achever la procédure de Schunte (*i.e.* accomplir les étapes: (i) identification d'un modèle qui appartient à la classe postulée au départ, (ii) estimation des paramètres du modèle choisi et (iii) test de validité du modèle retenu, afin (i) d'ajuster le modèle le plus approprié à un stock donné, (ii) de diagnostiquer un modèle proposé, et (iii) de comparer les résultats de plusieurs modèles 'candidats'.

2. Matériel et méthode

2.1. Présentation du modèle de Schnute

En reposant sur l'hypothèse d'un stock structuré par âge, le modèle de Schnute (1985) (pour plus de détails, voir 'A General Theory for Analysis of Catch and Effort Data'), implique des valeurs qui dépendent de l'âge du stock et de la période d'observation (variation annuelle). Ainsi les valeurs associées à la croissance sont:

N_{at} : Nombre de poissons, du stock considéré, âgés de 'a' au début de l'année 't'.

C_{at} : Nombre de poissons capturés à l'âge 'a' durant l'année 't'.

w_{at} : Poids d'un poisson âgé de 'a' à l'année 't'.

Les biomasses se définissent ainsi:

$$(1.1) N_{at}^* = w_{at} N_{at}, C_{at}^* = w_{at} C_{at}$$

Le recrutement et l'effort de pêche sont supposés indépendants de l'âge du stock:

R_t : Le nombre de poissons recruté à l'âge k au début de l'année t. Les paramètres associés au recrutement sont α_t, β et γ

E_t : L'effort de pêche durant l'année t.

La biomasse de poissons recrutés est:

$$(1.2) R_t^* = w_{kt} R_t$$

Ainsi les totaux des effectifs et de la capture se définissent par:

$$(1.3) N_t = \sum_{a=k}^{\infty} N_{at} \text{ et } C_t = \sum_{a=k}^{\infty} C_{at}$$

Les biomasses totales sont représentées par les quantités suivantes:

$$(1.4) N_t^* = \sum_{a=k}^{\infty} N_{at}^* \text{ et } C_t^* = \sum_{a=k}^{\infty} C_{at}^*$$

D'autres paramètres dérivés sont utilisés par Schnute (1985), notamment:

V_t : le poids à l'âge de recrutement (*i.e.* à l'âge k) associé à la cohorte née l'année t et recrutée à l'année t+k, cette même cohorte est supposée avoir un poids extrapolé au pré-recrutement (*i.e.* à l'âge k-1), noté v_t , et un coefficient de croissance de Ford ρ .

$$\text{Ainsi : } V_t = w_{k,t+k} \text{ et } v_t = w_{k-1,t+k-1}$$

Quant à la mortalité, Schnute (1985) utilise le paramètre M_t associé à la mortalité naturelle, et q_t associé à la mortalité due à la pêche. Ceci induit la définition des paramètres suivants:

σ_t : Fraction des survivants naturels.

ϕ_t : Fraction des poissons qui ont échappés à la pêche,

τ_t : Fraction totale des survivants.

La combinaison des valeurs définies précédemment aboutit aux équations suivantes décrivant:

La dynamique du stock halieutique:

$$(1.6) N_{a+1,t+1} = \tau_t N_{at}$$

$$(1.7) C_{at} = [1 - \phi_t] N_{at}$$

$$(1.8) N_{kt} = R_t \{N_{t-k} - C_{t-k}\}$$

La dynamique de la croissance du stock:

$$(1.9) w_{a+1,t+1} - w_{at} = \rho(w_{at} - w_{a-1,t-1})$$

Les relations entre les fractions: τ_t, σ_t, ϕ_t .

$$(1.10) \quad \tau_t = \sigma_t \phi_t$$

Les équations (1.6) à (1.10) impliquent:

$$(2.1) N_{a+1,t+1} - \tau_t N_{at} = 0$$

$$(2.2) N_{a+1,t+1}^* - \tau_t N_{at}^* = \rho \tau_t (N_{at}^* - \tau_{t-1} N_{a-1,t-1}^*)$$

$$(2.3) N_{t+1} - \tau_t N_t - R_{t+1} = 0$$

$$(2.4) N_{t+1}^* - \tau_t N_t^* - R_{t+1}^* = \rho \tau_t (N_t^* - \tau_{t-1} N_{t-1}^* - v_{t-k} R_t^* / V_{t-k})$$

$$(2.5) N_t = C_t / (1 - \phi_t)$$

$$(2.6) N_t^* = C_t^* / (1 - \phi_t)$$

$$(2.7) N_{t+1}^* = (1 + \rho) \tau_t N_t^* - \rho \tau_t \tau_{t-1} N_{t-1}^* + V_{t+1-k} R_{t+1} \{ \phi_{t+1-k} N_{t+1-k}^* \} - \rho \tau_t v_{t-k} R_t \{ \phi_{t-k} N_{t-k}^* \}$$

$$(2.8) C_{t+1}^* / (1 - \phi_{t+1}) = (1 + \rho) \tau_t C_t^* / (1 - \phi_t) - \rho \tau_t \tau_{t-1} C_{t-1}^* / (1 - \phi_{t-1}) + V_{t+1-k} R_{t+1} \{ \phi_{t+1-k} C_{t+1-k}^* / (1 - \phi_{t+1-k}) \} - \rho \tau_t v_{t-k} R_t \{ \phi_{t-k} C_{t-k}^* / (1 - \phi_{t-k}) \}$$

Le modèle proposé par Schnute (1985) est explicité par l'équation de la capture (2.8). Cette équation admet huit variétés (sous-modèles) selon les sous modèles possibles décrivant les processus biologiques:

Pour la croissance:

$$(1.11.a) \quad \sigma_t = \exp(-M_t), \quad (1.11.b) \quad \sigma_t = \frac{M_t + q_t E_t}{M_t \exp(M_t + q_t E_t) + q_t E_t},$$

$$(1.11.c) \quad \sigma_t = \{1 + \exp(q_t E_t) [\exp(M_t) - 1]\}^{-1}, \quad \text{ou (1.11d) } \sigma_t = \exp(-M_t)$$

Pour la mortalité:

$$(1.12.a) \quad \phi_t = \exp(-q_t E_t); \quad (1.12.b) \quad \phi_t = \frac{M_t + q_t E_t \exp(-M_t - q_t E_t)}{M_t + q_t E_t},$$

$$(1.12.c) \quad \phi_t = 1 - \exp(-M_t) [1 - \exp(-q_t E_t)]; \quad \text{ou (1.12 d) } \phi_t = 1 - q_t E_t$$

Pour le recrutement:

(1.13 a) $R_t \{S\} = \alpha_t S(1 - \beta\gamma S)^{1/\gamma}$ où, (1.13 b) $R_t = R$, où S est la biomasse totale du stock étudié.

Les différentes formes de l'équation de la capture sont explicitées dans la table 1, où l'identificateur du modèle réfère aux formes des processus biologiques du modèle dans l'ordre suivant: mortalité, croissance, recrutement (pour plus de détail voir 'General Theory for Analysis of Catch and Effort Data').

2.2. Amélioration du modèle de Schnute

Pour améliorer l'approche de Schnute, nous proposons d'ajouter un terme d'aléa dans les diverses équations de la capture, et par la suite nous utilisons les outils de la régression linéaire pour évaluer les paramètres de chaque équation (en utilisant un critère de sélection, l'analyse des résidus, l'analyse de la variance et les tests de validation). Notre approche améliorée a été résumée dans un diagramme algorithmique (voir diagramme récapitulatif de l'amélioration de la méthode de Schnute (1985)).

Notre approche est basée sur la théorie statistique de la régression qui permet de modéliser l'interdépendance entre variables spécifiant un phénomène donné, par une fonction simple (fonction de la régression) et selon des critères interprétables. La fonction de la régression peut avoir une forme analytique quelconque, l'analyste (en particulier l'halieute confronté au problème d'évaluation des stocks halieutiques) devra donc faire le choix de la forme fonctionnelle (le modèle de régression) en se basant sur sa connaissance des données de base (Gourieroux & Monfort, 1995).

Il conviendra donc de (i) construire plusieurs modèles qui diffèrent en général par le choix de la forme fonctionnelle du modèle, puis de (ii) soumettre ces modèles à des épreuves de validation, et enfin (iii) retenir, parmi les modèles candidats, celui ayant les meilleures performances estimées, en faisant appel aux critères de sélection, aux approches statistiques de validation et à la connaissance sur les données de base.

2.3. Les critères statistiques de sélection des modèles

La sélection des modèles est un problème bien connu en statistique. Plusieurs méthodes ont été proposées pour la résolution de cette problématique. L'une des réponses apportées par les statisticiens est la minimisation d'un critère pénalisé, notamment AIC (Akaike, 1973) ou ses versions corrigées (AICC, c-AIC, AICR, QAIC ou c-QAIC) (Spanos, 2008).

Parmi ces critères, seuls quelques uns ont été largement diffusés et appliqués, et d'un point de vue théorique, beaucoup de travaux ont été réalisés concernant leurs propriétés statistiques et leur adaptation à des modèles spécifiques.

Des considérations pratiques et théoriques montrent qu'il n'existe pas de critère universellement meilleur, mais seul l'objectif de l'expérimentateur (par exemple la parcimonie ou les performances prédictives de son modèle) et sa connaissance des données à analyser peuvent donner un sens à la notion de supériorité d'un critère sur l'autre. En plus des critères de sélection, d'autres approches statistiques complémentaires ont été proposées, ayant pour objectif de tester la validité des modèles candidats, permettant ainsi de déceler les défaillances des modèles retenus. Parmi ces méthodes nous retenons les trois étapes suivantes: (i) L'analyse des résidus qui se base principalement sur des méthodes d'analyse graphique, afin de vérifier que la représentation des résidus ne présente aucune structure particulière. (ii) L'analyse de la variance qui consiste à expliquer la variance totale en fonction de la variance due aux facteurs (la variance expliquée par le modèle), de la variance due à l'interaction entre les facteurs et de la variance résiduelle aléatoire (la variance non expliquée par le modèle), et puis de comparer ces variances. (iii) Les tests d'hypothèses, essentiellement ceux qui se basent sur la statistique de Wald, permettant ainsi de tester la significativité des paramètres.

Table 1. Les différentes formes de l'équation de la capture associées à chaque modèle.

	Identificateur du modèle	Equation de la capture correspondante
<p>Avec N_t: Le nombre de poissons, parmi le stock étudié, au début de l'année t. C_t: Le nombre de poissons capturés durant l'année t (les biomasses (N_t^*, C_t^*) se définissent par: $N_t^* = w_t N_t$, $C_t^* = w_t C_t$). E_t: l'effort de pêche. w_t: Le poids d'un poisson à l'année t. V_t: Le poids à l'âge de recrutement (<i>i.e.</i> à l'âge k) associé à la cohorte née à l'année t et recrutée à l'année $t+k$, cette même cohorte est supposée avoir un poids extrapolé au pré-recrutement (<i>i.e.</i> à l'âge $k-1$), notée v_t, et un coefficient de croissance de Ford ρ. σ_t: La fraction des survivants naturels. ϕ_t: La fraction des poissons qui ont échappés à la pêche. τ_t: La fraction totale des survivants. α, β, et γ: paramètres de recrutement. M: Paramètre associé à la mortalité naturelle. q: Le coefficient de capturabilité. S: La biomasse totale du stock étudiée.</p>	<p>⟨111⟩</p>	$(1 - e^{-qE_{t+1}})^{-1} C_{t+1}^* = (1 + \rho)e^{-M} (e^{qE_t} - 1)^{-1} C_t^* - \rho e^{-2M - qE_t} (e^{qE_{t-1}} - 1)^{-1} C_{t-1}^* + \alpha V (e^{qE_{t+1-k}} - 1)^{-1} C_{t+1-k}^* [1 - \beta \gamma (e^{qE_{t+1-k}} - 1)^{-1} C_{t+1-k}^*]^{1/\gamma} - \rho \alpha v e^{-M - qE_t} (e^{qE_{t-k}} - 1)^{-1} C_{t-k}^* [1 - \beta \gamma (e^{qE_{t-k}} - 1)^{-1} C_{t-k}^*]^{1/\gamma}$
	<p>⟨114⟩</p>	$\frac{C_{t+1}^*}{1 - e^{-qE_{t+1}}} = \frac{(1 + \rho)e^{-M} C_t^*}{e^{qE_t} - 1} - \frac{\rho e^{-2M - qE_t} C_{t-1}^*}{e^{qE_{t-1}} - 1} + RV - Rv \rho e^{-M - qE_t}$
	<p>⟨131⟩</p>	$(1 - e^{-qE_{t+1}})^{-1} C_{t+1}^* = e^{-M} (e^{qE_t} - 1)^{-1} C_t^* + \alpha V (e^{qE_{t+1-k}} - 1)^{-1} C_{t+1-k}^* [1 - \beta \gamma (e^{qE_{t+1-k}} - 1)^{-1} C_{t+1-k}^*]^{1/\gamma}$
	<p>⟨134⟩</p>	$\frac{C_{t+1}^*}{1 - e^{-qE_{t+1}}} = \frac{e^{-M} C_t^*}{e^{qE_t} - 1} + RV$
	<p>⟨211⟩</p>	$C_{t+1}^* = (1 + \rho)\tau C_t^* - \rho \tau^2 C_{t-1}^* + \alpha V \phi C_{t+1-k}^* [1 - \beta \gamma \phi (1 - \phi)^{-1} C_{t+1-k}^*]^{1/\gamma} - \rho \alpha v \tau \phi C_{t-k}^* [1 - \beta \gamma \phi (1 - \phi)^{-1} C_{t-k}^*]^{1/\gamma}$
	<p>⟨214⟩</p>	$C_{t+1}^* = (1 + \rho)\tau C_t^* - \rho \tau^2 C_{t-1}^* + (1 - \phi)RV - (1 - \phi)\rho \tau Rv$
	<p>⟨231⟩</p>	$C_{t+1}^* = \tau C_t^* + \alpha V \phi C_{t+1-k}^* [1 - \beta \gamma \phi (1 - \phi)^{-1} C_{t+1-k}^*]^{1/\gamma}$
<p>⟨234⟩</p>	$C_{t+1}^* = \tau C_t^* + (1 - \phi)RV$	

2.4. Les critères de validité des paramètres biologiques

L'utilisation des méthodes statistiques (critères statistiques, analyse de la variance, analyse des résidus, tests d'hypothèse) pour le choix d'un modèle approprié à un stock donné, peuvent conduire à sélectionner un modèle statistiquement valide, mais qui ne représente pas la réalité biologique du stock (exemple: le cas d'un modèle statistique dont le paramètre de mortalité est nul).

Ainsi, nous avons mentionné dans l'algorithme de sélection de notre approche améliorée, l'obligation de comparer les valeurs des modèles statistiquement valides avec les valeurs connues a priori, qui résultent de connaissances élémentaires sur le stock étudié. La figure 2 montre qu'après la constitution de l'ensemble des modèles valides, les valeurs des paramètres estimés vont être confrontées à un test de validité biologique basé sur la connaissance de l'espèce étudiée. Deux cas peuvent en résulter:

(i) Les paramètres estimés de tous les modèles valides ne reflètent pas la réalité biologique du stock étudié. Dans ce cas, l'halieute est obligé de procéder à une transformation de la forme du modèle de départ (l'équation de la capture), soit en se basant sur la forme de l'aléa (modèle additif ou multiplicatif), soit sur les composantes (*i.e.* recrutement, croissance et mortalité) du modèle.

(ii) L'existence d'un modèle statistiquement et biologiquement valide. Dans ce cas ce modèle pourra être utilisé pour prévoir l'état du stock et appliquer des mesures de gestion ad hoc efficaces.

2.5. Biologie d'*Octopus vulgaris*

Octopus vulgaris est une espèce benthique à faible déplacement, caractérisée par (i) une courte durée de vie; (ii) une croissance rapide; (iii) et une forte saisonnalité dans la reproduction et le recrutement des juvéniles; mais aussi par (iv) une mortalité massive des femelles après la ponte ainsi que par sa (v) répartition le long des côtes jusqu'à une profondeur de 100 à 200 mètres avec une préférence pour les récifs coralliens et les fonds rocheux (Caverivière *et al.*, 2002). Il peut être rencontré également sur les fonds sableux ou vaseux voire sur les herbiers.

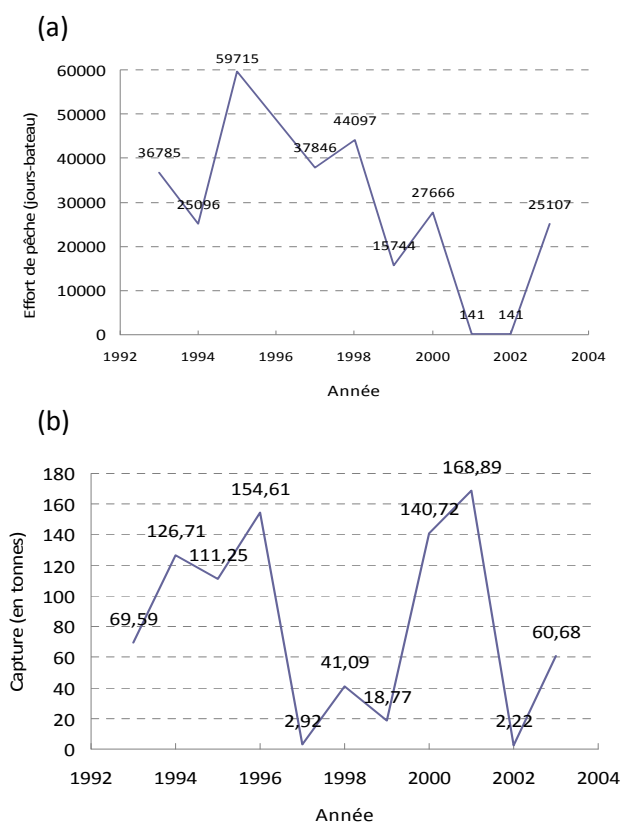


Figure 1. (a) L'effort de pêche (en jour-bateau) appliqué au stock méridional d'*Octopus vulgaris* et (b) la capture correspondante (en tonnes) au cours de la période: 1993-2003.

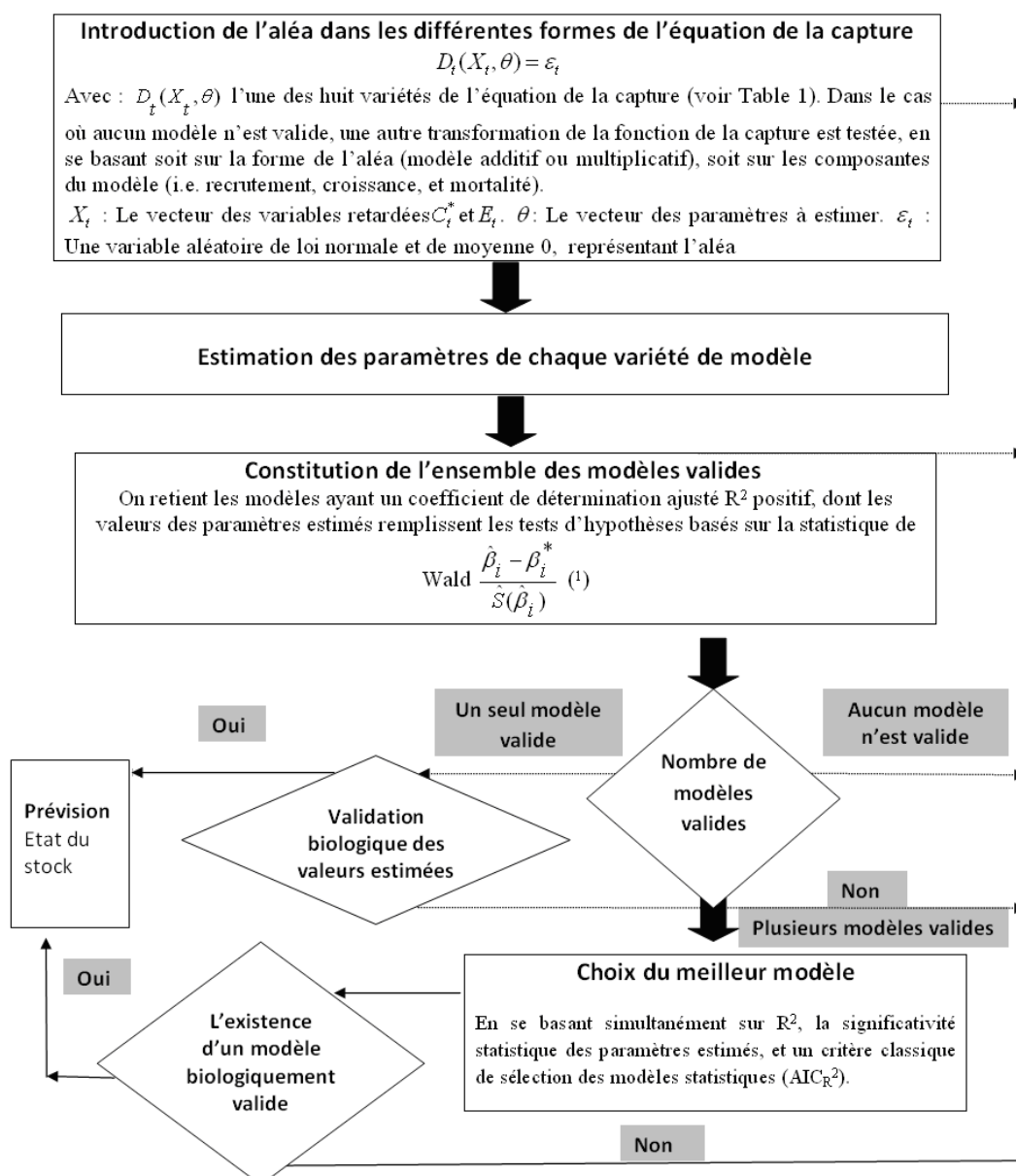


Figure 2. Diagramme récapitulatif résumant les différentes étapes de l'amélioration de la méthode de Schnute, à savoir l'introduction de l'aléa, l'estimation des paramètres, la constitution des modèles valides, les critères de choix du meilleur modèle et la prévision. ⁽¹⁾ Significatif vis à vis de l'analyse de la variance, et dont les résidus sont indépendants et identiquement distribués, suivant tous une loi de type $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$.

2.6. Reproduction d'*Octopus vulgaris*

Octopus vulgaris a deux saisons de ponte; l'une principale au printemps et l'autre secondaire en automne. Une femelle ne se reproduit qu'une fois (rarement deux fois) et pond entre 100.000 et 500.000 œufs (de 2,4 mm chacun) et meurt généralement après l'éclosion des œufs. Les alevins vivent de 5 à 12 semaines en pleine eau avant de se poser sur les fonds et adopter le mode de vie des adultes. Les femelles atteignent la maturité sexuelle entre 12 et 13 cm (longueur du manteau) alors que les mâles sont adultes à partir de 7 cm.

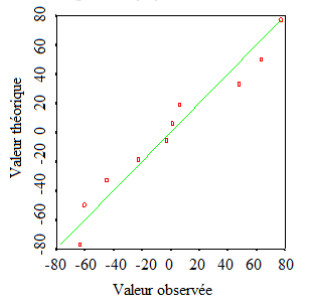
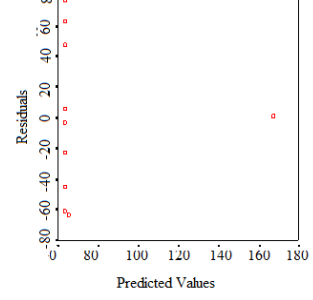
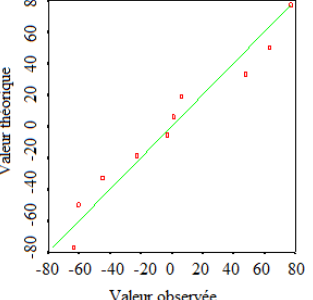
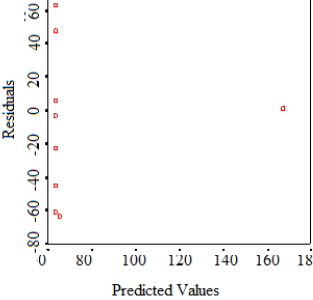
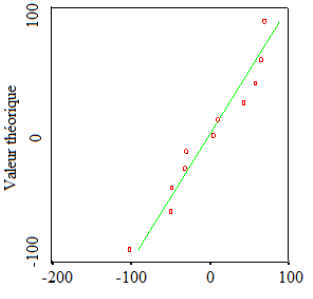
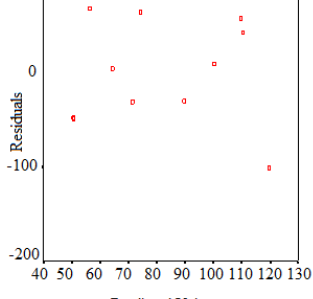
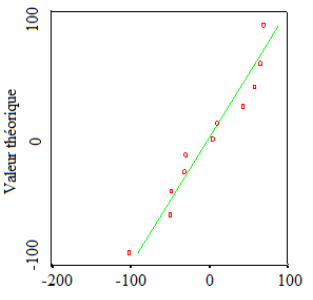
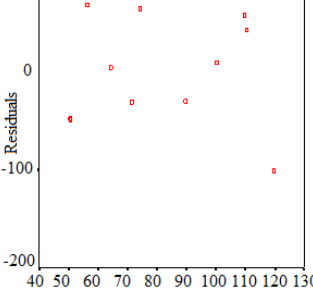
Modèle	Q-Q plot	Résidus (Residus) et valeurs ajustées (predicted values)
⟨114⟩	<p>Diagramme Q-Q Gaussien de Residuals</p> 	
⟨134⟩	<p>Diagramme Q-Q Gaussien de Residuals</p> 	
⟨214⟩	<p>Diagramme Q-Q Gaussien de Residuals</p> 	
⟨234⟩	<p>Diagramme Q-Q Gaussien de Residuals</p> 	

Figure 3. Graphes de l'analyse des résidus de chaque modèle déclaré valide. L'analyse se base sur le QQ plot et le graphe des résidus en fonction des valeurs ajustées.

Table 2. Validation de l'application de la méthode améliorée basée sur le coefficient de détermination, la significativité biologique des paramètres, le test t de Student et l'analyse de la variance. L'initialisation des valeurs des paramètres provient de l'Office National des Pêche du Maroc.

Modèle	Valeurs initiales des paramètres	Coefficient R ² ajusté	Estimations des paramètres	Test de Student (p<0.05) et analyse de la variance	Validation du modèle
<111>	M=0,66; q= 0 ,11; ρ = 0,63; α= 1; β= 1; γ=1	< 0	-	-	Invalide
<114>	M=0,66; q= 0 ,011; R=50000; V=0,0001; v=0; ρ=0,63	0,00344	M=0; q= 0,043; R=50000,015 V=0,017; v=0; ρ=0,63	Les valeurs des paramètres appartiennent à l'intervalle de confiance	Valide
<131>	M=0,66; q= 0,11; α=1; β=1; V=1	< 0	-	-	Invalide
<134>	M=0,66; q= 0,11; R=50000; V=0,0001.	0,30171	M=0; q= 0,006; R=4999,87; V=0,001	Les valeurs des paramètres appartiennent à l'intervalle de confiance	Valide
<214>	τ= 1; ρ=0,63; Φ=0; V= 0,0001; R=50000; v=0	0,17109	τ= 0,36; ρ=0; Φ=0,4; V= 0,01; R=49999; v=0,02	Les valeurs des paramètres appartiennent à l'intervalle de confiance	Valide
<231>	τ= 1; α=1; Φ=0; V= 0; β=1; γ=0,5	< 0	-	-	Invalide
<234>	τ= 1; Φ=0; R= 50000; V= 0,001	0,17109	τ= 0,36; Φ=0,0006; R= 50000; V= 0,00099	Les valeurs des paramètres appartiennent à l'intervalle de confiance	Valide

Table 3. Résultats de l'application de la méthode améliorée: coefficient de détermination (mesurant le degré d'explication), signification biologique des paramètres et AIC_R^2 .

Modèle	Degré d'explication	Signification biologique des paramètres	AIC_R^2
114	0,03	Mortalité invalide (mortalité nulle)	11,00
134	0,30	Mortalité invalide (mortalité nulle)	7,97
214	0,17	Croissance invalide (croissance nulle)	9,41
234	0,17	Biologiquement acceptables	11,00

Table 4. Variables retardées (capture et effort de pêche) et paramètres intervenants dans les différentes formes de l'équation de la capture.

Identificateur du modèle	Pas des variables retardées	Paramètres	Liste des paramètres	Nombre de paramètres
	Capture	Effort de pêche		
$\langle 111 \rangle$	1,2, $k, k+1$	0, 1, 2, $k, k+1$	$M, q, \rho, \alpha v, \beta, \gamma$	6
$\langle 114 \rangle$	1,2	0, 1, 2	M, q, ρ, RV, Rv	-
$\langle 131 \rangle$	1, k	0, 1, k	$M, q, \alpha V, \beta, \gamma$	5
$\langle 134 \rangle$	1	1	M, q, RV	3
$\langle 211 \rangle$	1,2, $k, k+1$	-	$\tau, \rho, \phi \alpha V, \phi \alpha v, \phi \beta / (1 - \phi), \gamma$	6
$\langle 214 \rangle$	1,2	-	$\tau, \rho, (1 - \phi) R (V - \rho \tau v)$	3
$\langle 231 \rangle$	1, k	-	$\tau, \phi \alpha V, \phi \beta / (1 - \phi), \gamma$	4
$\langle 234 \rangle$	1	-	$\tau, (1 - \phi) RV$	2

3. Résultats

Les résultats statistiques de chaque modèle sont résumés dans les tables 2, 3 et la figure 3. D'après les résultats produits sous SPSS (pour plus de détails sur SPSS, voir Wacker, (2000)), on peut classer les modèles testés en deux catégories: modèles valides et modèles invalides. Cette distinction est basée premièrement sur le coefficient de détermination, le résultat du test de Student sur les paramètres, ainsi que les pré-requis sur les paramètres biologiques utilisés.

D'après la table 4 on constate quatre points notables: (i) le modèle 114 fournit un AIC_R^2 trop élevé (le modèle n'explique que 0,034 % des données), de plus le paramètre de mortalité est estimé à 0, ce qui est biologiquement impossible, (ii) Le modèle 134 fournit un meilleur AIC_R^2 (le modèle explique 30 % des données), mais le paramètre de mortalité reste invalide, (iii) Le modèle 214 fournit un R^2 de 17 %, mais cette fois-ci le coefficient de la croissance est invalide $\rho = 0$; (iv) Le modèle 234 fournit un R^2 significatif 17 % dont les paramètres estimés sont biologiquement valides, ainsi que le test t de Student sur la signification des paramètres.

La figure 3 associe à chaque modèle la représentation des résidus en fonction des valeurs prévues, ainsi que la distribution des résidus. Seuls deux modèles, le 214 et le 234 (Table 4), vérifient l'hypothèse de la normalité et l'indépendance des résidus. Notons qu'un "diagramme Quantile-Quantile", ou "Q-Q Plot" est un graphique permettant de comparer visuellement un échantillon et une distribution théorique de référence (le plus souvent, normale), dans le but de décider s'il est vraisemblable que cette distribution théorique ait généré l'échantillon, et d'analyser les raisons qui peuvent éventuellement rejeter cette hypothèse. Le Q-Q plot peut donc être considéré comme un "test de normalité visuel".

Ainsi, si on combine les cinq mesures de performance: (i) Degré d'explication élevé; (ii) Acceptation, d'un point de vue biologique, des paramètres estimés; (iii) Validité du test de Student; (iv) Critère AIC_R^2 minimal; (v) Validation des hypothèses de la normalité et l'indépendance des résidus, on retient le modèle 234. Ainsi pour le stock étudié au travers de notre cas d'étude, les processus biologiques sont constants par rapport au temps:

- modélisation de la mortalité (M2): $\sigma t = \exp(-M)$; $\phi = \text{constant}$;
- modélisation de la croissance: croissance à poids constant avec $u = V$;
- modélisation du recrutement: recrutement à poids constant, avec $R_t = R$.

4. Conclusion

Ce travail nous a permis d'améliorer la méthode de Schnute, essentiellement par l'introduction de l'aléa dans la classe de modèles proposée par Schnute, et sur les résultats de la théorie statistique de la régression. Cette démarche a été appliquée autour d'un cas d'étude, sur le stock d'*Octopus vulgaris* situé dans la partie méridionale du Maroc, permettant ainsi la comparaison puis la sélection entre plusieurs modèles candidats, et l'ajustement du modèle adéquat. Le modèle ajusté ainsi validé permettra d'améliorer les prévisions faites par simulations sur l'état du stock considéré.

Remerciements

Un remerciement spécial est dédié à l'Office National de la Pêche de Casablanca (Maroc), qui a fourni les statistiques de pêche qui nous ont permis d'achever cet article. Nous remercions aussi les arbitres anonymes pour leurs commentaires constructifs.

Références

- BOX, G.E.P., JENKINS, G.M., & REINSEL, G.C., 2008. Time Series Analysis: Forecasting and Control. (Ed.) Wiley, John & Sons, New Jersey, 730p.
- DERISO, R.B., 1980. Harvesting strategies and parameter estimation for an age-structured model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 268-282.
- GOURIEROUX, C., & MONFORT, A., 1995. Statistics and Econometric Models. Cambridge University Press, Cambridge Economica, USA, 528p.
- HADDON, M., 2001. Modeling and Quantitative Methods in Fisheries. Chapman and Hall, CRC, USA, 424p.

- LANCELOT, R., & LESNO, M., 2005. Sélection de modèles avec l'AIC et critères d'information dérivés. Version 3. *Annals of statistics*, 6, 461-464.
- PELLA, J.J., & TOMLINSON, P.K., 1969. A generalized stock production model. *Bull. Inter-Am. Trop. Tuna Comm.* 13, 419-496.
- ROFF, D.A., 1983. An allocation model of growth and reproduction in fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40, 1395-1404).
- SCHNUTE, J., 1977. Improved estimates from the Schaefer production models: theoretical consideration. *Journal of Fisheries Research Board Canada*, 34, 583-603.
- SCHNUTE, J., 1985. A General Theory for Analysis of Catch and Effort Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42, 414-429.
- SCHNUTE, J., 1987. A General Fishery Model for a Size-Structured Fish Population. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44, 924-940.
- SHAEFER, M.B., 1957. Some considerations of population dynamics and economics relation to the management of marine fisheries. *Journal of Fisheries Research Board Canada*, 14, 669-681.
- SPANOS, A., 2008. Akaike-Type Criteria and the Reliability of Inference, Model Selection vs. Statistical Model Specification, Department of Economics, Virginia tech., USA, 34p.
- WACKER, D., 2000. SPSS Department Training, SPSS.10.0 Syntax Reference Guide for SPOSS Base, SPSS Regression Models, SPSS Advanced Models, Chicago, 144p.