

MIGRATHON: un système expert pour l'estimation des flux de migration de poissons entre zones. Application au listao (*Katsuwonus pelamis*) dans l'océan Atlantique Tropical Est

Eric Foucher

CRODT, BP 2241 Dakar, Sénégal.

Reçu le 3 juillet 1995 ; accepté le 4 avril 1996.

Foucher E. *Aquat. Living Resour.*, 1996, 9, 225-234.

*MIGRATHON: an expert system to estimate the fish migratory flows between different areas. Application to the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in Eastern tropical Atlantic.*

Abstract

We have created a simple expert system to estimate migratory rates between fishing areas. This expert system is only based on fishery data. Quarterly migratory flows are calculated, using a comparison between two different estimations of number of fish, per area and per age, the first one including migration and the second not. To obtain the first estimation, we use number of fish by age, resulting from a cohort analysis, which are distributed by areas. The second estimation is calculated by the model, period by period, from the preceding estimation of number of fishes in each zone and for each age. The expert system is applied to the Atlantic skipjack tuna. Migration flows are analyzed by group of ages, and all ages together. The model presents many restrictions, nevertheless results seem to be in accordance with present knowledge on skipjack migration in the Atlantic Ocean.

Keywords: Expert system, *Katsuwonus pelamis*, skipjack tuna, tropical tunas, migrations, Eastern Tropical Atlantic.

Résumé

Un système expert simple, reposant exclusivement sur des statistiques de pêche, a été élaboré afin d'estimer des migrations de poissons entre zones. Les flux de migration par trimestre sont calculés à partir de la comparaison de deux estimations distinctes des effectifs par zone et par âge, la première tenant compte du phénomène des migrations, la seconde non. La première estimation est obtenue en répartissant par zone les effectifs par âge issus d'une analyse des cohortes, la seconde est calculée période par période, à partir des effectifs présents dans chaque zone à l'âge précédent. Le modèle est appliqué au listao de l'Atlantique tropical Est. Les flux de migration estimés sont alors analysés, par groupe d'âge puis pour l'ensemble de la population. Bien qu'un certain nombre de limitations inhérentes au modèle existent, les résultats obtenus apparaissent valides par rapport aux schémas connus des migrations du listao.

Mots-clés : Système expert, *Katsuwonus pelamis*, listao, thons tropicaux, migrations, Atlantique Tropical Est.

INTRODUCTION

Dans le domaine des recherches thonières, l'étude des migrations est depuis quelques années un des principaux pôles d'intérêt scientifique; la composante migratoire constitue en effet un élément prépondérant dans les recherches menées sur l'évaluation quantitative des interactions entre différentes pêcheries thonières, thème retenu pour les groupes de travail FAO de Nouméa (1991) et Shimuzu (1995). Pour des espèces comme les thonidés, la répartition des effectifs dans chaque zone de pêche présente du fait des migrations des variations saisonnières considérables. Afin d'étudier la dynamique spatiale des stocks, et d'une manière plus générale des pêcheries, il convient donc de bien appréhender les différents flux de poissons entre les zones de pêche. Si l'existence de ces flux de migration ne fait plus aucun doute aujourd'hui, notamment à la lumière des résultats des marquages – recaptures, l'estimation de ces flux pose encore de nombreux problèmes.

Dans l'océan Pacifique Est, un modèle de quantification des probabilités de mouvement des poissons entre zones a été développé et appliqué à l'albacore (*Thunnus albacares*) (Deriso *et al.*, 1991). D'autres modèles plus récents, fondés sur le phénomène de diffusivité, ont également été développés pour décrire les mouvements de poissons (Sibert et Fournier, 1993; Kleiber et Hampton, 1994). L'ajustement de ces modèles est basé pour partie sur les données de marquage – recapture. Kleiber et Fonteneau (1993) ont par ailleurs utilisé certaines données de marquage – recapture pour étudier les interactions entre pêcheries de listaos (*Katsuwonus pelamis*) dans l'Atlantique Tropical Est. Ces données de marquage – recapture sont néanmoins à l'heure actuelle quantitativement très insuffisantes dans l'océan Atlantique Tropical Est pour les études sur les migrations, tant pour l'albacore que pour le listao, et aucune campagne de marquages à grande échelle n'est envisagée dans l'immédiat, faute de moyens. Il est donc indispensable de faire appel à d'autres méthodes pour estimer les flux de migrations entre zones.

Dans cette optique, nous présentons une méthode originale faisant abstraction de ces données de marquage – recapture et basée sur les concepts de l'intelligence artificielle : il s'agit d'un système expert simple, capable de générer des flux de poissons entre différentes zones de pêche à partir des estimations locales des effectifs. L'objectif de cette étude est donc de montrer qu'une nouvelle méthode distincte des méthodes classiquement employées en dynamique des populations permet d'offrir une alternative dans l'étude des migrations. Le système expert proposé est appliqué au cas du listao de l'Atlantique Tropical Est. Des flux de migration entre zones sont quantifiés, exprimés en pourcentage par rapport à la population totale à chaque période. Ces flux sont ensuite analysés,

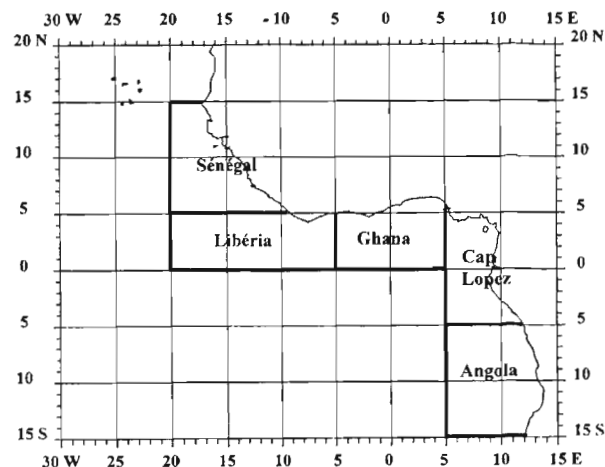


Figure 1. – Zones de pêche retenues pour l'ajustement des flux de migration du listao.

Fishing areas used for the adjustment of the expert system.

et comparés avec les schémas globaux des migrations du listao publiés antérieurement.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

MIGRATHON est un système expert simple, qui peut faire intervenir des migrations de poissons entre plusieurs zones côtières adjacentes. Dans notre cas, on définit 5 zones différentes, déterminées de telle manière que les conditions hydro-climatiques y varient de manière relativement homogène. Par hypothèse, le système est considéré comme fermé, c'est-à-dire d'une part que tous les effectifs à tout âge se répartissent à l'intérieur de ces 5 zones, et d'autre part, qu'il n'existe aucun échange (pas d'entrées ni de sorties) entre ces 5 zones et le reste de l'océan. Cette hypothèse très restrictive imposée pour la mise au point du modèle sera discutée par la suite.

Le modèle est appliqué au cas du listao, espèce plus côtière que l'albacore, dans l'Atlantique Tropical Oriental (Fig. 1). Les statistiques de pêche utilisées pour le calcul des effectifs par zone sont issues des bases de données de la Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique (ICCAT) et du Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye (CRODT). Il s'agit des captures (en nombre d'individus par âge) par carré de 5° de latitude et de longitude de côté et par mois des flottilles de sennears toutes nationalités confondues pour la période 1980 à 1990. Des fichiers de fréquences de taille des captures sont de plus utilisés pour la détermination des captures par groupe d'âge.

Estimation des effectifs par zone

L'un des objectifs sous-jacents de MIGRATHON est de définir, et de quantifier, un schéma migratoire moyen indépendamment des variations de recrutement

et de capturabilité. Pour cela, on calcule dans chaque zone retenue des prises moyennes par âge en nombre d'individus à partir des captures réelles pour une année moyenne de pêche (période 1980-1990). La clé de correspondance taille et âge utilisée est celle de Bard et Antoine (1986). A partir de cette matrice de captures par âge, la population par âge est estimée pour l'ensemble des zones par une analyse des cohortes. Dans le cas présent, l'analyse des cohortes est conduite en mode direct : plusieurs valeurs initiales de recrutement R sont testées. Parmi les valeurs qui conduisent à une solution à l'analyse des cohortes, on retient par hypothèse une valeur de recrutement R qui permet d'obtenir un vecteur de taux instantanés de mortalité par pêche F correspondant à un taux modéré du niveau d'exploitation du stock de listao, puisque ce stock est d'après l'ICCAT (1993) encore faiblement exploité. Le taux instantané de mortalité naturelle M retenu est de 0,8 par an (ICCAT, 1984); il correspond à la valeur utilisée lors des différentes évaluations des stocks menés à l'ICCAT. Ceci nous amène à choisir une valeur de recrutement R de 120 millions d'individus, pour laquelle l'analyse des cohortes conduit à des estimations du taux F données dans le Tableau 1.

La population totale par âge est ainsi estimée par analyse des cohortes à partir de ce recrutement. En tout état de cause, la valeur initiale du recrutement R introduite dans l'analyse des cohortes n'a finalement qu'une importance relativement limitée dans notre cas d'étude, d'une part parce qu'on estimera des valeurs de flux de poissons exprimées en pourcentage de la population totale (il est ainsi vraisemblable que ces pourcentages seront peu sensibles à la valeur du recrutement R introduite initialement dans l'analyse des cohortes), et d'autre part parce que l'objectif premier recherché n'est pas tant d'aboutir

Tableau 1. – Taux instantanés de mortalité par pêche F par âge (trimestre) issus de l'analyse des cohortes.

Instantaneous fishing rates F by age (quarter), resulting from virtual population analysis.

Age (trimestre)	F
1	0,003
2	0,052
3	0,132
4	0,262
5	0,318
6	0,722
7	0,791
8	0,607
9	0,336
10	0,441
11	0,380
12	0,173
13	0,072
14	0,104
15	0,324
16	0,019

à des estimations proprement dites que de tester une méthode originale pour quantifier des flux de migration. Autrement dit, c'est ici plus la démarche qui importe que la valeur absolue des paramètres utilisés dans les ajustements.

Puis, afin d'estimer les flux de migration dans chaque zone et pour chaque âge, le modèle procède à une comparaison entre les valeurs numériques de deux estimations différentes des effectifs par âge et par zone.

♦ La première estimation des effectifs N de la population par âge dans une zone donnée sera appelée par la suite « population théorique ». Elle est obtenue à partir de l'effectif total (toutes zones confondues) issu pour chaque âge de l'analyse des cohortes. Cet effectif total doit ensuite être réparti par zones, en fonction d'un indice d'abondance local, représentatif de la quantité de poissons présents dans une zone à un moment donné. Les effectifs par âge issus de l'analyse des cohortes vont ici être répartis par zone au prorata des captures C . Dans la mesure où, en dynamique des populations, on représente classiquement les indices d'abondance par des prises par unité d'effort, cette hypothèse peut apparaître passablement surprenante. Toutefois, elle se justifie dans le cadre de notre étude. En effet, dans le cas des pêcheries thonières de surface, les captures peuvent constituer localement et ponctuellement de meilleurs indices d'abondance que les PUE (Foucher, 1991): les thonidés étant particulièrement grégaires et les concentrations de bancs pouvant être localement très importantes, l'emploi des PUE comme indice d'abondance, à une échelle spatio-temporelle fine, peut conduire si les efforts de pêche sont élevés à une sous-évaluation notoire de la biomasse locale. Inversement, un seul banc pêché par un seul senneur au cours d'une strate spatio-temporelle fine peut conduire à une PUE élevée, sans pour autant signifier une biomasse locale importante. On notera que cette répartition correspond à une hypothèse de répartition stochastique de l'effort (Foucher, 1995), c'est-à-dire que le coefficient de mortalité par pêche $F_{a,z}$ par âge et par zone est égal au coefficient global de mortalité par pêche F_a par âge. On a donc (d'après Laurec et Le Guen, 1981):

$$C_{a,z} = F_{a,z} \cdot N_{a,z} \quad \text{et} \quad F_{a,z} = F_a = \frac{C_a}{N_a}$$

d'où

$$C_{a,z} = \frac{C_a}{N_a} \cdot N_{a,z}$$

La population théorique par zone sera donc donnée par la relation:

$$N_{a,z} = \frac{C_{a,z}}{C_a} \cdot N_a \quad (1)$$

avec N_a issu de l'analyse des cohortes.

Tableau 2. – Exemple d'une règle utilisée par le système expert : règle appelée « *Calcul Effectifs et Écarts, Formule Générale (entre 2 périodes)* », qui permet de calculer les écarts entre les 2 estimations des effectifs dans chaque zone pour chaque période (équations 1 et 3). Ecriture formelle (langage SNARK) et signification.

Example of a rule used by the expert system: rule called "Calcul Effectifs et Ecarts, Formule Générale (entre 2 périodes)". This rule is used to calculate the numerical difference between the 2 estimations of population number, for each area and each period (1st and 3rd equations). Formal syntax (in SNARK language) and meaning.

SYNTAXE	SIGNIFICATION
REGLE : Calcul Effectif et Écarts, Formule Générale (entre 2 périodes)	Nom de la règle
SI	Condition
MigrationDOWN (BOX)=(DB)	La valeur de la migration vers le bas issue de la zone « BOX » est DB.
MigrationUP (BOX1)=(UB1)	La valeur de la migration vers le haut issue de la zone « BOX1 » est UB1.
MigrationDOWN (BOX2)=(DB2)	La valeur de la migration vers le bas issue de la zone « BOX2 » est DB2.
MigrationUP (BOX2)=(UB2)	La valeur de la migration vers le haut issue de la zone « BOX2 » est UB2.
UP (BOX3)=(BOX)	La zone BOX est située, à la période précédente, au-dessous de la zone BOX3.
DOWN (BOX3)=(BOX1)	La zone BOX1 est située, à la période précédente, en dessous de la zone BOX3.
BEFORE (BOX3)=(BOX2)	BOX2 et BOX3 sont les mêmes zones. BOX2 est chronologiquement à la période précédente.
NOMBRE (BOX2)=(NBRE)	Le nombre calculé de poissons présents dans la zone BOX2 est NBRE.
ESTIM (BOX3)=(ESTIMBOX3)	Le nombre estimé de poissons présents dans la zone BOX3 est ESTIMBOX3.
VALEUR DATE-COURANTE=PERIODE (BOX3)	La date courante est la période de la zone BOX3.
COMPTEUR BACKTRACK=(C)	Compteur système permettant de comptabiliser le nombre de retours en arrière dans le temps.
ALORS	Conséquences
IN (BOX3) <— + (NBRE) + (DB) (UB1)	Calcul du nombre de poissons présents dans BOX2, qui entreront dans BOX3.
OUT (BOX3) <— + (CAPT (BOX2)) + (UB2) + (DB2) (*(-NBRE) (CAPT (BOX2))) 0.18)	Calcul du nombre de poissons présents dans BOX2 et qui n'entreront pas dans BOX3 (captures, mortalité, migrations sortant de BOX2).
NOMBRE (BOX3) <— DIV(-(IN(BOX3)) (OUT3)) (OUT(BOX3))) 1	Calcul du nombre de poissons présents dans BOX3.
ECART (BOX3) <— ABS-(NOMBRE (BOX3)) (ESTIMBOX3)	Calcul de l'écart entre nombre calculé et nombre théorique.
AFFICHENL « Nombre de poissons dans » (BOX2) « = » (NBRE)	Affichage (nouvelle ligne) du nombre de poissons présents dans BOX2.
AFFICHE (BOX3) « .Entrées = » (IN (BOX3))	Affichage du nombre d'entrées dans BOX3.
AFFICHE « ;Sorties = » (OUT (BOX3))	Affichage du nombre de sorties dans BOX3.
AFFICHENL « ;Nombre = » NOMBRE(BOX3) « ;Estim = » (ESTIMBOX3)	Affichage (nouvelle ligne) des nombres de poissons calculés et estimés.
FR	FIN de la règle.

Les valeurs de cette population théorique sont donc initialement connues, dans chaque zone et pour tous les âges.

♦ La seconde estimation des effectifs N par âge et par zone est appelée « population calculée ». Ces effectifs sont estimés pas à pas, par zone et pour chaque période. L'équation de survie classique s'exprime de la manière suivante :

$$N'_{a,z} = N'_{a-1,z} \cdot \exp[-(M_{a-1,z} + F_{a-1,z})] \quad (2)$$

La valeur de $F_{a-1,z}$ n'étant pas connue, on procède à une approximation de l'équation précédente, en posant que les captures par âges et par zone s'effectuent de manière instantanée en fin de période. Soit :

$$N'_{a,z} = (N'_{a-1,z} \cdot \exp(-M_{a-1})) - C_{a-1,z} \quad (3)$$

Cette valeur est calculée par le modèle, au fur et à mesure de la progression chronologique des périodes de temps. Elle suppose l'absence de migration, puisque l'effectif d'une zone au cours d'une période de temps donnée ne dépend que des effectifs déjà présents dans cette même zone durant la période précédente. La première estimation des effectifs (à l'âge trimestre 1) est calculée en posant $N_{0,z} = R_z$. L'effectif initial introduit dans le modèle en période 1 correspond donc au recrutement précédemment défini, réparti par zone, comme plus haut, au prorata des captures d'individus d'âge trimestriel 1. Les deux estimations $N_{1,z}$ et $N'_{1,z}$ sont donc identiques. En revanche, à l'âge trimestriel 2 et aux suivants, l'utilisation des équations (1) et (3) conduit à des estimations N et N' qui diffèrent. Cet écart entre les deux estimations, dans chaque zone et pour chaque âge, correspond ainsi aux flux de poissons entre zones ; il sera estimé pas à pas par le modèle.

Les différentes étapes de la mise au point de MIGRATHON

Rappelons qu'un système expert est constitué d'une base de connaissances, contenant des faits (dans notre cas, il s'agit entre autres des captures et des estimations des effectifs par zone et par âge présentées plus haut) et des règles d'expertise, ainsi que d'un moteur d'inférence mettant en relation ces faits et règles. Les règles sont indépendantes les unes des autres. Par ailleurs, un système expert est caractérisé par une capacité d'apprentissage, c'est-à-dire qu'il peut, en cours d'exécution, intégrer dans sa base de connaissances de nouveaux faits qu'il pourra réutiliser par la suite (Bonnet, 1984; Farreny, 1989). Pour constituer le système expert, le logiciel SNARK a été utilisé. Constitué d'un moteur d'inférence basé sur une logique d'ordre 1, ce logiciel a été développé à l'université de Paris VI (Laurière, 1984a et b).

MIGRATHON dans son état actuel a été élaboré en trois étapes successives. Les différences numériques observées dans chaque zone entre les deux estimations des effectifs de la population, l'une obtenue à partir des résultats de l'analyse des cohortes (équation 1) et l'autre calculée pas à pas d'une période à l'autre (équation 3), permettent d'estimer les migrations entre zones. Dans un premier temps, afin de combler ces différences, seuls ont été envisagés des flux de poissons entre deux zones limitrophes et deux périodes successives (Fig. 2). En d'autres termes, le modèle cherche alors à combler les écarts des estimations N et N' observés dans une zone donnée $Z1$ à la période T . Il déclenche alors une migration depuis une des deux zones limitrophes, notée $Z2$, vers $Z1$ entre les périodes $T-1$ et T , de manière à ce que l'écart des effectifs soit annulé. Sous cette condition, le système aboutit rapidement à une impasse et s'arrête. En effet, il est confronté à des différences importantes entre les deux valeurs des effectifs, qu'il ne peut pas combler : il n'y a pas suffisamment de poissons disponibles, à la période précédente, pour déclencher une migration à partir de l'une des deux zones limitrophes. Ceci est en fait lié au choix de la période de temps (le trimestre), trop importante pour prendre correctement en compte les mouvements de poissons entre zones.

Dans un deuxième temps, et afin de résoudre ce problème, la possibilité d'effectuer des migrations entre deux zones limitrophes, mais au cours de la même période de temps (appelées par la suite « migrations latérales »), a été rajoutée au sein du système (Fig. 2). Ainsi, si le nombre de poissons disponibles dans $Z2$ n'est pas suffisant, ces migrations latérales à partir d'une troisième zone $Z3$ permettent d'augmenter l'effectif, en période $T-1$, de cette zone $Z2$. La migration de $Z2$ vers $Z1$ entre les périodes $T-1$ et T est alors possible. Dans ce cas également, le système peut aboutir à un blocage, pour les mêmes raisons que précédemment. Ceci notamment lorsque dans une même zone, les effectifs locaux estimés à partir de l'analyse des cohortes sont très différents entre deux périodes successives.

Dans un troisième temps, on envisage des migrations latérales qui peuvent avoir lieu au cours de la période $T-1$, mais entre les zones plus éloignées $Z3$ et $Z4$. Le système expert, ou plutôt son moteur d'inférence, gère ainsi toutes les règles qui sont à sa disposition ; les effectifs par zone et pour toutes les périodes, ainsi que les migrations entre zones, peuvent

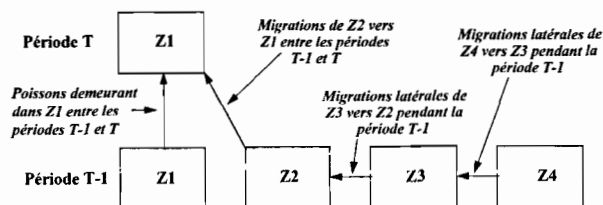


Figure 2. – Les étapes de la mise au point de MIGRATHON.
The successive steps for the adjusting of MIGRATHON.

être, de ce fait, déterminés. Si ce n'est pas possible à la période $T-1$, le système peut revenir en arrière jusqu'à ce qu'il trouve une solution. Quand cette solution est trouvée pour chaque zone, le système écrit les nombres de poissons présents dans chaque zone en fin de période, et les différentes migrations qui se sont produites. Puis le modèle passe à la période suivante, jusqu'à ce qu'il atteigne la dernière période (fixée au seizième trimestre).

En définitive, le modèle détermine des migrations qui ont lieu en cours de période, ce qui permet de distinguer le début de chaque période (avant migration) de la fin (après migration), et des migrations qui ont lieu entre 2 périodes de temps consécutives, marquées par ailleurs par les effets des mortalités naturelle et par pêche.

La version présentée contient en définitive 19 règles d'expertise (voir Annexe pour leur description succincte) et plus de 1 000 faits initiaux (Foucher, 1995). Pour exemple, la syntaxe de la règle principale du système, qui permet de calculer les écarts entre les 2 estimations des effectifs dans chaque zone pour chaque période (équations 1 et 3), est détaillée ci-après (tabl. 2), l'organisation des zones entre elles, telle qu'elle est utilisée par cette règle, étant par ailleurs explicitée (Fig. 3).

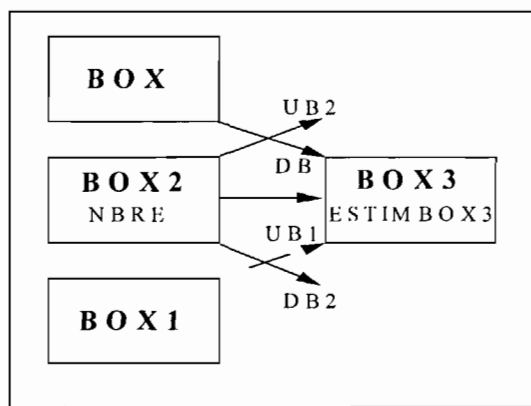


Figure 3. – Libellés des variables intervenant dans la règle « Calcul Effectifs et Écarts Formule Générale (entre 2 périodes) ». Les termes « BOX », « BOX1 » et « BOX2 » sont les variables désignant les différentes zones, les termes « UB2 », « DB », « UB1 » et « DB2 » les variables désignant les flux de migration (UB2 : Up from Box 2...).
Labels of the variables used in the rule "Calcul Effectifs et Écarts Formule Générale (entre 2 périodes)". "BOX", "BOX1" and "BOX2" are variables used for the different areas, "UB2", "DB", "UB1" and "DB2" are variables for migration flows (UB2 : Up from Box 2...).

RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Résultats par âge trimestriel

A partir des faits initiaux introduits dans le système, MIGRATHON procède aux ajustements entre populations théoriques et populations calculées pour

chaque zone. Il en déduit les migrations entre zones, jusqu'à ce qu'il atteigne la fin de la dernière période. À l'issue des ajustements, on obtient ainsi, à chaque période et pour chaque zone, une estimation de la population présente dans la zone au début et à la fin de la période, et des valeurs de migrations entre zones, en milliers d'individus, soit en cours de période, soit à la fin de chaque période. Les valeurs obtenues sont bien évidemment largement tributaires de la valeur de recrutement utilisée comme hypothèse de base. Dans une zone et pour une période donnée, les valeurs de migration obtenues représentent les quantités de poissons ayant quitté cette zone.

Les résultats par âge trimestriel sont regroupés en groupe d'âge. Nous reprenons ici le découpage proposé par Cayré *et al.* (1988) : juvéniles pour les âges trimestriels 1 à 4, pré-adultes pour les âges trimestriels 5 à 8 et adultes pour les âges trimestriels 9 à 16 (on différencie toutefois les adultes de 3 et de 4 ans).

Au début du premier trimestre, 97 % des effectifs de listaos juvéniles, après recrutement, se trouvent dans les deux zones Libéria et Ghana (répartition du recrutement au prorata des captures de l'âge 1). Dès le premier trimestre, une migration importante a lieu le long des côtes africaines, du Libéria vers le fond du golfe de Guinée. Ces migrations concernent près de 42 % des effectifs du groupe d'âge 1. À la fin du premier trimestre, ces poissons sont concentrés dans la zone Ghana, qui contient plus des deux tiers des effectifs. La majorité de ces poissons sort de cette zone à l'issue du premier trimestre, vers les zones les plus sud, cap Lopez et Angola. Puis au cours du deuxième trimestre, le sens général de la migration s'inverse. Les listaos se dirigent à nouveau vers la zone du Libéria, la totalité de ces poissons continuant ensuite vers les eaux sénégalaises à l'issue du deuxième trimestre. On retrouve la même orientation générale des migrations au cours du troisième trimestre. La majorité des poissons alors présents dans la zone Sénégal est issue de migrations en provenance du Libéria. À la fin du troisième trimestre, les listaos juvéniles sont principalement dans les zones Sénégal et Ghana. Deux migrations importantes se déclenchent alors, l'une du nord au sud du Sénégal vers le Libéria, l'autre de l'est vers l'ouest, également vers le Libéria. Il y aura donc concentrations de juvéniles lors du quatrième trimestre dans les zones centrales du Libéria et du Ghana (respectivement 36 et 43 % des effectifs à cet âge).

Le schéma des migrations des pré-adultes sur les 4 périodes de l'année 2 correspond globalement à celui observé chez les juvéniles. Trimestre par trimestre, l'orientation générale des migrations reste identique. Toutefois, l'intensité de ces migrations est très différente pour ce groupe d'âge, et plus particulièrement au premier trimestre. Ainsi, entre le premier et le deuxième trimestre, le système expert conclue à une forte remontée de pré-adultes vers la zone Sénégal (soit 42 % de l'effectif total de la

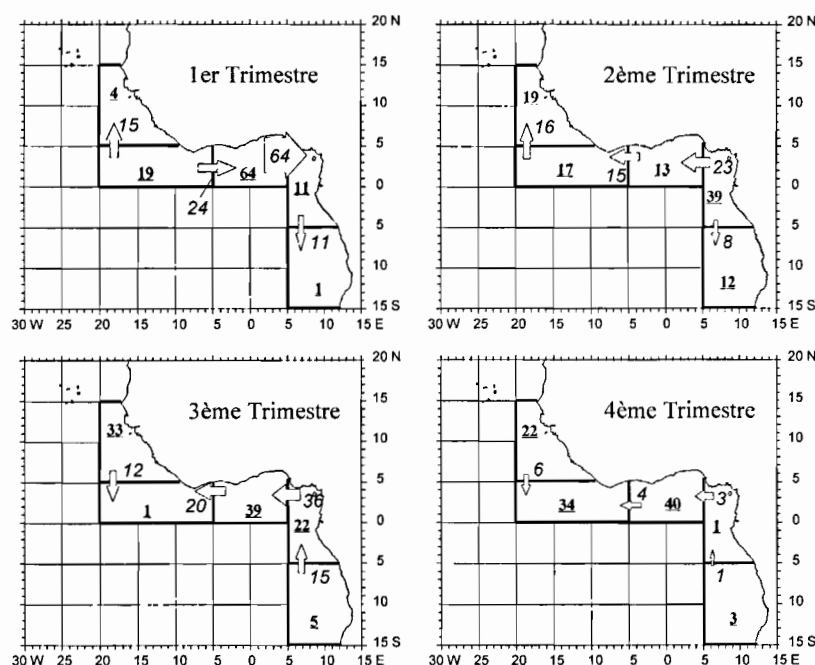


Figure 4. – Pourcentage de la population de listao présente dans chaque zone de pêche (% souligné), par trimestre, et flux de migrations entre zones. Quarterly number (underlined %) of skipjack in each fishing area, and migration flows between areas (in percent).

seconde période de l'année 2), le flux de listaos du Ghana vers le cap Lopez étant quant à lui moindre que lors de la première année. A la fin du deuxième trimestre, la population de listaos est ainsi divisée en deux grands groupes, l'un dans la zone Sénégal, et l'autre au cap Lopez. Ces deux groupes restent dans les mêmes zones tout le long du troisième trimestre. A l'issue des 3^e et 4^e trimestres (périodes 7 et 8), le sens et l'intensité des migrations observées sont similaires à ceux des juvéniles, les poissons se concentrant le dernier trimestre dans les zones Ghana et surtout Libéria.

On retrouve chez les adultes globalement le même schéma, avec de fortes concentrations dans les zones centrales (Libéria et Ghana) au cours des premier et quatrième trimestres, et des migrations intenses vers le Sénégal au nord et le cap Lopez et l'Angola au sud, lors des deuxième et troisième trimestres. A l'issue du premier trimestre de la troisième année (période 9), une intense migration a lieu entre le Libéria et le Sénégal, de la même manière que chez les pré-adultes. Par contre, peu de poissons de cet âge se dirigent vers le cap Lopez. Les adultes de 3 ans sont ainsi particulièrement nombreux dans la zone Libéria le premier trimestre, puis au large du Sénégal les deuxième et troisième trimestres. On ne retrouve pas ce schéma pour les adultes de 4 ans qui se concentrent, à l'instar des juvéniles, préférentiellement dans les zones Ghana et cap Lopez, respectivement les 1^{er} et 2^e trimestres (périodes 13 et 14). Les échanges sont alors

intenses entre ces deux zones. Enfin, les adultes de 3 ans et ceux de 4 ans se concentrent dans les mêmes zones au cours des troisième et quatrième trimestres. Les flux de migrations, qui sont orientées nord-sud à l'ouest, et est-ouest à l'est du golfe de Guinée, sont de la même manière globalement similaires pour les adultes de 3 ans et pour les adultes de 4 ans.

Un schéma moyen de migration pour le listao de l'Atlantique Est

L'analyse des populations locales et des valeurs de migration estimées par notre modèle met en évidence l'importance des flux de poissons, à tout âge, entre les différentes zones. La direction et l'intensité des flux observés permettent de définir un schéma général des migrations du listao dans l'océan Atlantique Tropical (fig. 4). Au premier trimestre, la grande majorité des individus se trouve dans les deux zones centrales Ghana et Libéria (qui représentent à elles deux plus de 80 % des effectifs), où a lieu l'essentiel du recrutement. Une importante migration ouest-est le long des côtes africaines a lieu au cours et à l'issue de ce premier trimestre, essentiellement composée de juvéniles qui se concentrent dans les zones de nourricerie du fond du golfe de Guinée. A la fin de ce premier trimestre, un important flux de poissons, pré-adultes et adultes de 3 ans, se développe vers le nord. Les effectifs de la zone Sénégal augmentent le deuxième trimestre par immigration (ils atteignent

près de 20 % des effectifs totaux à la fin du deuxième trimestre). Puis au troisième trimestre, toujours grâce à l'arrivée des poissons de la zone Libéria, les eaux du Sénégal deviennent, avec celles de la zone du Ghana, les plus abondantes en listaos (respectivement 33 et 39 % des effectifs), devant celles du cap Lopez (22 %). A la fin du troisième trimestre, le sens des migrations s'inverse. On retrouve une situation proche de celle du premier trimestre, mais les poissons se concentrent davantage dans la zone Libéria (34 % des effectifs), en particulier les juvéniles et les pré-adultes. Il s'agit des importantes concentrations plurispécifiques de listaos et d'albacores juvéniles qui sont largement exploitées durant le quatrième trimestre.

DISCUSSION

Des résultats globalement valides

Les valeurs estimées, aussi bien des populations locales que des migrations par âge, sont largement tributaires de la valeur de recrutement introduite initialement dans le système : il convient de considérer avec précaution ces estimations. Toutefois, comme nous l'avons déjà souligné précédemment, notre objectif premier était de tester une méthode plutôt que d'obtenir des estimations absolues des flux de migration. L'utilisation de résultats relatifs permet cependant d'avoir une assez bonne vision globale, d'une part de la répartition géographique des effectifs à chaque âge, et d'autre part des phénomènes de migrations qui interviennent. De plus, la similitude des estimations obtenues par MIGRATHON avec le schéma général qualitatif des migrations du listao dans l'Atlantique défini à partir des données des marquages recaptures (Bard, 1984; Cayré *et al.*, 1986; Bard *et al.*, 1988), avec les résultats d'autres approches plus classiques en dynamique des populations (Foucher, 1995), et avec la répartition par zone des captures trimestrielles moyennes pluriannuelles (années 1980-1990) (Foucher, 1995), permet de valider cette approche. MIGRATHON met également en évidence l'intense mouvement migratoire annuel devant les côtes sénégalaises, du sud vers le nord dès la fin du 1^{er} et au cours du 2^e trimestre, et dans la direction opposée à partir de la fin du 3^e trimestre. On a affaire ici à un phénomène que l'on pourrait désigner de « pompe à thons » devant les côtes sénégalaises. Les thonidés suivent ainsi la remontée rapide des isothermes entre les îles du Cap Vert et le Sénégal durant l'été boréal (Rebert, 1979; Foucher, 1995), qui constitue apparemment l'un des moteurs de cette migration. D'une manière plus générale, les variations saisonnières de la composante environnementale sont particulièrement intenses dans l'Atlantique Tropical et semblent être de ce fait à la base des migrations des thonidés dans cet océan (Cayré, 1990).

Des problèmes d'expertise

Un certain nombre d'hypothèses posées initialement lors de la mise au point de MIGRATHON sont très contraignantes lors des simulations. Ainsi, le choix simple d'un recrutement ayant lieu en début d'année a été imposé bien que l'on sache que la reproduction du listao s'effectue de manière opportuniste, en fonction des conditions environnementales, et que le recrutement, dans le milieu naturel, est de ce fait plus ou moins régulier au cours de l'année (Cayré et Farrugio, 1986). On peut difficilement se placer sous cette hypothèse dans notre modèle : interviendrait alors le problème du choix de la zone où aurait lieu le recrutement, ainsi que son intensité (quel serait dans ce cas le nombre de recrues?). On voit bien que se pose ici non pas un problème d'ordre technique (le système expert est capable de gérer ces informations), mais bien un problème d'expertise (de quelle manière initialiser la base de faits?).

Ce problème d'expertise initiale du système se retrouve dans les résultats présentés : le modèle, qui repose sur une cohorte et des captures par âge moyennes, propose des réponses uniques pour les flux de migrations, ce qui implique un caractère global pour le schéma des migrations. Le modèle ne peut par contre pas expliquer des variations importantes des captures (par l'intensité des migrations) dans une zone et pour une année donnée. L'idée d'initialiser MIGRATHON avec des cohortes réelles, et sur plusieurs années, apparaît ainsi naturellement. Les données des prises par âge et par année sont disponibles, bien que se pose de nouveau le choix de la clé de correspondance taille/âge chez le listao (problèmes de détermination des cohortes liées à la croissance hétérogène des individus selon la zone et l'âge, ainsi qu'aux recrutements continus au cours de l'année). L'estimation des recrutements par analyse de cohortes s'avérerait également délicat, ceci pour les mêmes raisons.

Enfin, la méthode de répartition des effectifs estimés par zone, effectuée ici sous l'hypothèse d'une distribution des effectifs N au prorata des captures par âge, impose deux limitations importantes au modèle, tel qu'il est dans sa version actuelle tout au moins.

1) Captures sous-entend pêche – Le modèle peut donc complètement sous-estimer, voire ignorer certaines migrations entre deux zones si la pêche dans une de ces deux zones est faible ou inexistante. Cela pourrait être le cas entre les zones cap Lopez et Angola par exemple, les captures effectuées dans la zone Angola étant devenues très faibles lors des dernières années, pour des raisons géopolitiques indépendantes de la pêche notamment.

2) Les prises d'adultes de plus de 60 cm (individus de 3,5 ans et plus) sont relativement peu nombreuses dans l'Atlantique Tropical Est. Il existe vraisemblablement une certaine émigration hors des zones étudiées (vers le Brésil en particulier) (Symons *et al.*, 1986), bien qu'aucune migration transatlantique

n'ait toutefois été prouvée à ce jour pour le listao. Ces migrations seraient néanmoins envisageables, dans la mesure où les pêcheries situées au large du Brésil pêchent essentiellement des gros individus (Sakagawa, 1986). Ce problème n'affecte toutefois que modérément les résultats, dans la mesure où les simulations s'arrêtent au seizième trimestre (4 ans), et ne concernent que peu les individus âgés. La simulation tournant actuellement dans un système clos, il est envisageable que des possibilités d'entrées et de sorties des listaos dans et hors des zones puissent à terme être intégrées dans le système expert.

CONCLUSION: Une ébauche trop simpliste ?

Le modèle MIGRATHON, dans sa version actuelle, n'est qu'une ébauche de ce qui pourrait devenir un vrai système expert complexe modélisant la dynamique de la ressource et l'exploitation des thons tropicaux. Cette version est en effet basée sur des hypothèses particulièrement contraignantes, et ne fait intervenir qu'une cohorte moyenne de listao. Il est naturellement envisageable d'étendre les simulations à des cohortes réelles, aussi bien de listaos que d'albacores. L'essentiel de la réflexion nécessaire réside en fait dans l'expertise initiale du système. Les règles employées étant indépendantes les unes des autres, il ne serait pas non plus utopique de développer l'expertise dans d'autres directions pour mieux comprendre la dynamique du système, notamment en intégrant des données concernant le comportement des flottilles et des pêcheurs, ou des données environnementales.

Par ailleurs, MIGRATHON ne fonctionne pas dans sa forme actuelle comme un véritable système expert *sensu stricto*, dans la mesure où toutes les données nécessaires au déroulement de la modélisation sont inclus initialement dans la base de faits. Pour cela, le modèle devrait évoluer vers une plus grande interactivité, en établissant un dialogue entre le système expert et l'utilisateur. A chaque étape chronologique, le système expert pourrait ainsi poser toutes les questions idoines à l'utilisateur: prises réelles par âge et par zone, mortalités naturelles, environnement.

Il s'agit là d'axes de recherche possibles. La première approche présentée ici montre que ces méthodes mériteraient à l'avenir d'être développées.

ANNEXE

La base de connaissance de MIGRATHON

Base de faits

Elle comprend plus de 1100 faits, constitués de triplets « Objet Attribut Valeur ». Elle correspond à l'expertise initiale du système.

Faits géographiques et chronologiques

Ils situent les zones les unes par rapport aux autres, dans l'espace et dans le temps.

LIBERIA	UP	SENEGAL
LIBERIA1	BEFORE	LIBERIA0

La zone LIBERIA0 précède chronologiquement la zone LIBERIA1. La zone SENEGAL est située « plus haut » (géographiquement plus au nord et à l'ouest) que la zone LIBERIA.

Faits de quantification numérique des effectifs et des captures

GHANA1	ESTIM	78647
ANGOLA1	CAPT	0

L'effectif estimé de la population présente dans la zone GHANA à la période 1 est de 78647 millions d'individus. Les captures en période 1 réalisées dans la zone ANGOLA sont égales à 0.

Faits d'initialisation des migrations

CAP-LOPEZ2	MigrationUP	0
------------	-------------	---

La migration provenant de la zone CAP-LOPEZ à l'issue de la période 2 vers la zone située plus haut est initialisée à 0.

Règles

MIGRATHON est constitué de 19 règles, dont les dénominations suivent, indépendantes les unes des autres. Ces règles se répartissent ainsi:

- 2 règles générales qui permettent le calcul pas à pas des estimations des effectifs dans chaque zone:

Règle 1: « Calcul Effectifs et Ecart, Formule Générale (entre 2 périodes) »

Règle 2: « Calcul Effectifs et Ecart, Même Période »

- 4 règles qui permettent de générer des migrations entre différentes zones, d'une période à la suivante:

Règle 3: « Augmenter MigrationUP »

Règle 4: « Augmenter MigrationDOWN »

Règle 5: « Augmenter Partiellement MigrationUP »

Règle 6: « Augmenter Partiellement MigrationDOWN »

- 4 règles qui permettent de générer des migrations entre différentes zones, au cours d'une même période:

Règle 7: « Augmenter MigrationLATUP »

Règle 8: « Augmenter MigrationLATDOWN »

Règle 9: « Augmenter Partiellement MigrationLATUP »

Règle 10: « Augmenter Partiellement Migration LATDOWN »

- 4 règles qui permettent de générer des migrations entre différentes zones non adjacentes, au cours d'une même période :

Règle 11: « Augmenter MigrationLATUP de 2 carrés supérieurs vers carré supérieur limitrophe »

Règle 12: « Augmenter MigrationLATDOWN de 2 carrés supérieurs vers carré supérieur limitrophe »

Règle 13: « Augmenter Partiellement Migration LATUP de 2 carrés supérieurs même période »

Règle 14: « Augmenter Partiellement Migration LATDOWN de 2 carrés supérieurs même période »

- 4 règles d'écriture des résultats :

Règle 15: « Affichage »

Règle 16: « Affichage écart »

Règle 17: « Résumé »

Règle 18: « Résumé écart »

- 1 règle de gestion du temps :

Règle 19: « Le temps passe ».

RÉFÉRENCES

- Bard F. X. 1984. Résultats des campagnes de marquages effectuées de 1980 à 1982. *Pêche Marit.* **1275**, 319-324.
- Bard F. X., L. Antoine 1986. Croissance du listao (*Katsuwonus pelamis*) dans l'Atlantique est. In: Proc. ICCAT Conference on the international skipjack program. P. E. K. Symons, P. M. Miyake, G. T. Sakagawa eds. ICCAT, Madrid, 301-308.
- Bard F. X., P. Cayré, T. Diouf 1988. Les migrations. In: Ressources, pêche et biologie des thonidés tropicaux de l'Atlantique Centre-Est. Fonteneau A., J. Marcille eds. *FAO Doc. Tech. Pêches* **292**, 111-156.
- Bonnet A. 1984. L'intelligence artificielle: promesses et réalités. InterEditions, Paris, 271 p.
- Cayré P. 1990. Les migrations: un comportement déclenché et guidé par l'environnement. *Rec. Doc. Sci. ICCAT*, **32**, 158-168.
- Cayré P., J. B. Amon Kothias, J. M. Stretta, T. Diouf 1988. La biologie des thons In: Ressources, pêche et biologie des thonidés tropicaux de l'Atlantique Centre-Est. A. Fonteneau, J. Marcille eds. *FAO Doc. Tech. Pêches* **292**, 157-268.
- Cayré P., H. Farrugio 1986. Biologie de la reproduction du listao (*Katsuwonus pelamis*) de l'océan Atlantique. In: Proc. ICCAT Conference on the international skipjack program. P.E.K Symons, P.M. Miyake, G.T. Sakagawa eds. ICCAT, Madrid, 252-272.
- Deriso R. B., R. G. Punsly, W. H. Bayliff 1991. A Markov movement model of yellowfin tuna in the Eastern Pacific Ocean and some analyses for international management. *Fish. Res.* **11**, 375-395.
- Farreny H. 1989. Les systèmes experts: principes et exemples. Cepadues eds. Toulouse, 254 p.
- Foucher E. 1991. La prise par unité d'effort comme indice d'abondance locale dans les pêcheries de thonidés tropicaux. *Rec. Doc. Sci. ICCAT* **35**, 61-68.
- Foucher E. 1995. Dynamique saisonnière et spatiale de la ressource dans les pêcheries thonières de l'Atlantique Tropical Est. Thèse dr. ENSA Rennes, Trav. Doc. 131, ORSTOM ed. Paris, 271 p.
- Gulland J. A. 1969. Manuel des méthodes d'évaluation des stocks d'animaux aquatiques. 1^{ère} Partie: analyse des populations. *FAO Sci. Halieut.* **4**, 160 p.
- ICCAT 1984. Rapport de la période biennale 1982-83, 2^{ème} Partie, ICCAT, Madrid, 308 p.
- Kleiber P., A. Fonteneau 1993. Assessment of skipjack fishery interaction in the eastern tropical Atlantic using tagging data. In: Interactions of Pacific tuna fisheries. R.S. Shomura, J. Majkowski, S. Langi eds. *Proc. FAO Fish. Tech. Paper* **336**, 94-107.
- Kleiber P., J. Hampton 1994. Modelling effects of FADs and islands on movement of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*): estimating parameters from tagging data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **51**, 2642-2653.
- Laurec A. et J. C. Le Guen 1981. Dynamique des populations marines exploitées. Tome I: concepts et modèles. *Rap. Sci. Tech. CNEXO* **45**, 117 p.
- Laurière J. L. 1984a. Introduction à l'intelligence artificielle. InterEditions, Paris.
- Laurière J. L. 1984b. Un moteur d'inférences pour systèmes experts en logique du premier ordre: SNARK. *Bull. Inst. Nat. Rech. Inform. Autom. INRIA, France* **97**, 24-34.
- Rebert J. P. 1979. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. *Doc. Sci. CRODT* **89**, 99 p.
- Sakagawa G. T. 1986. Skipjack fisheries in the western Atlantic. In: Proc. ICCAT Conference on the international skipjack program. P.E.K. Symons, P.M. Miyake, G.T. Sakagawa eds. ICCAT, Madrid, 99-103.
- Sibert J. R., D. A. Fournier 1993. Evaluation of advection-diffusion equations for estimation of movement patterns from tag recapture data In: Proc. Interactions of Pacific tuna fisheries. R. S. Shomura, J. Majkowski, S. Langi eds. *FAO Fish. Tech. Paper* **336**, 108-121.
- Symons P. E. K., P. M. Miyake, G. T. Sakagawa eds. 1986. Proc. ICCAT Conf. International skipjack program. ICCAT, Madrid, 388 p.