

N° d'ordre : 2003-16

N° de série : H-50

THESE

présentée devant

L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES

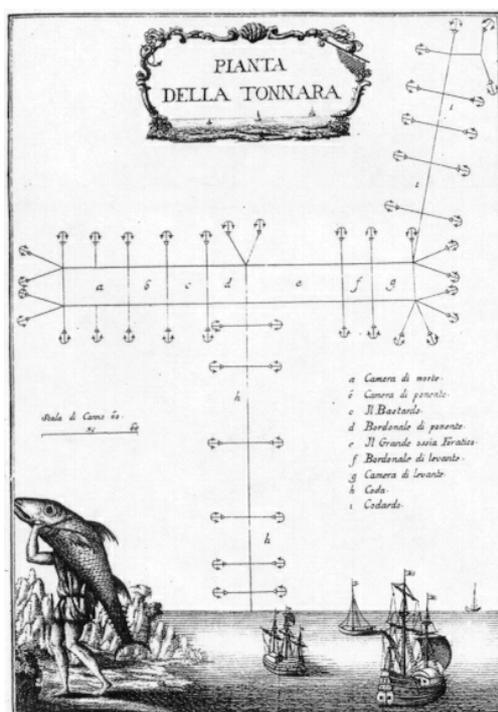
pour obtenir le titre de Docteur de l'ENSAR, spécialité Halieutique

par

Christelle RAVIER-MAILLY

Fluctuations à long terme du thon rouge

- validité, origines et conséquences -



Préparée au laboratoire Ressources Halieutiques de l'IFREMER,
Centre de Recherches Halieutiques Méditerranéen et Tropical de Sète.

Soutenue le 14 octobre 2003 devant le jury composé de

MM. Didier Gascuel	Président du jury	ENSAR
Jean-Marc Fromentin	Directeur de thèse	IFREMER
Loïc Antoine	Rapporteur	IFREMER
Frédéric Ibanez	Rapporteur	Université Paris 6
Henri Farrugio	Examineur	IFREMER
Alain Fonteneau	Examineur	IRD
Paul Nival	Examineur	Université Paris 6

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Jean-Marc Fromentin, initiateur et directeur de cette thèse, qui m'a offert l'opportunité de travailler sur un sujet original, mêlant histoire, halieutique et écologie numérique, particulièrement porteur. Sa rigueur scientifique et son dynamisme ont été des encouragements permanents. Je le remercie tout particulièrement pour sa confiance accordée au cours de ces derniers mois, qui m'a permis de finaliser ce document dans les meilleures conditions, en parallèle avec ma nouvelle orientation professionnelle.

Je tiens également à remercier Henri Farrugio, pionnier sétois du travail sur les madragues et responsable du laboratoire Ressources Halieutiques de Sète. Les données de pêche à la madrague présentées dans ce document lui doivent beaucoup et je lui exprime ici toute ma gratitude pour son soutien scientifique et matériel accordé au cours de ces trois années.

Les nombreux conseils de Frédéric Ibanez, lors des rencontres de l'ART4 du PNEC, ont été très précieux. Je le remercie sincèrement d'avoir bien voulu rapporter cette thèse à la lumière de sa grande expérience de l'analyse de séries. Je remercie également très vivement Loïc Antoine et Paul Nival, pour avoir respectivement accepté de rapporter et de participer au jury de cette thèse, malgré les très nombreuses sollicitations dont ils font l'objet. Alain Fonteneau m'a permis de poursuivre mon histoire avec les thonidés et m'a toujours accordé sa confiance et ses conseils. Pour sa passion communicative, les nombreux contacts dont il a fait bénéficié ce travail et son amitié, je le remercie tout particulièrement. Didier Gascuel m'a initiée à l'halieutique. Ses conseils en matière d'orientation à l'ENSAR puis son suivi de l'avancement de mes travaux de recherches ont été précieux. Je lui adresse ici mes chaleureux remerciements. Je leur suis également très reconnaissante d'avoir accepté de juger ce travail.

Ce manuscrit utilise des données historiques de pêche, à l'origine très dispersées, dont le recensement est le fruit de nombreuses collaborations. Je souhaite ici remercier tout particulièrement la duchesse de Medina Sidonia, P. Cornus, F. Doumenge, G. Guarrasi, J. Hamre, A. Hattour, P. Kebe, S. Myklevoll, J.M. Ortiz de Urbina, C. Piccinetti et J.M. de la Serna, qui ont participé au recensement, nous ont donné accès à des archives et/ou fourni des statistiques.

Pour tester l'hypothèse d'un forçage environnemental sur les fluctuations observées dans les données de captures, il était nécessaire de disposer de séries environnementales aussi longues que possibles. M.-J. Alcoforado, C. Appenzeller, M. Barriendos, L. Buffoni, M. Brunetti et M. Maugeri, R. D'Arrigo, J. Luterbacher, M. Morell et I. Pelczer, T. Nanni, F.S. Rodrigo, D. Wheeler et E. Xoplaki m'ont donné accès à leurs données, certaines non encore publiées. Je leur renouvelle ici mes plus vifs remerciements. Je suis

tout particulièrement reconnaissante à Denis Binet et Juerg Luterbacher de m'avoir fait partager leur expérience et éclairée de leurs critiques averties dans ce domaine. J'espère qu'ils trouveront ce manuscrit digne de l'intérêt qu'ils ont porté à ses recherches.

La partie halieutique de ce travail a bénéficié de collaborations avec Olivier Maury et Emmanuel Chassot, puis avec Ottar Bjornstad ; pour leur enthousiasme et la grande compétence dont ils ont bien voulu faire profiter ce travail, je les remercie vivement.

Cette thèse doit également beaucoup à ceux qui, au quotidien ou plus occasionnellement, m'ont accordé leur aide et leurs conseils dans leurs « domaines de prédilection » respectifs ; de nombreux mercis en particulier à Frédéric Ménard pour S-Plus, Annie Fiandrino et Benjamin Planque pour Matlab, Gildas Lecorre et Ysabelle Cheret pour l'informatique, Annick Radenac pour la recherche bibliographique.

Après l'encadrement scientifique, le soutien matériel est un élément important dans le bon déroulement d'une thèse. Je tiens à remercier tout particulièrement l'IFREMER, qui a financé cette thèse. Un grand merci également à Jacques Mallard et à Marie-France Gaillard pour leur activité dévouée et particulièrement efficace à l'école doctorale de l'ENSAR. Merci enfin à Michel Girin, directeur du Cedre, pour son soutien et l'intérêt qu'il a témoigné à l'aboutissement de ce travail.

Les derniers mais non les moindres... des remerciements plus amicaux à tous les membres du Pôle Mer et Lagunes de Sète, et en particulier à Claude Carriès (profite bien de la suite... !), Geneviève Constantin, Gilles Corréa, Agnès Louis et Danièle Martin pour leur dévouement et leur bonne humeur quotidienne, et à Angélique, Ophélie, Marie-Ange, Annie, Isabelle et Patrice, pour tous les moments d'amitié partagés. Enfin, un grand merci tout particulier à Ysabelle et Capucine.

Résumé

Décrire et comprendre les fluctuations spatio-temporelles des espèces animales constituent les enjeux majeurs de l'écologie. La question est également cruciale pour réussir la gestion durable des ressources exploitées, en particulier celle du thon rouge, grand pélagique migrateur à la dynamique complexe. L'objectif de ce travail est de collecter les captures historiques de thon rouge par les madragues méditerranéennes et proche atlantiques pour (i) caractériser les fluctuations à long terme de la population migrante en Méditerranée, (ii) étudier leur déterminisme et (iii) évaluer leurs implications en terme de gestion des pêcheries.

Après avoir décrit les principales caractéristiques biologiques et écologiques du thon rouge, la première partie présente la pêche à la madrague, puis le processus de collecte et de validation des données historiques de captures. Ce dernier conduit à la mise en place d'une base de données de **54 séries de plus de 20 ans, dont les plus longues s'étendent sur près de 4 siècles**. Les productions historiques sont estimées à environ 15 000 tonnes/an ([7 000;25 000]).

Les séries historiques de captures sont analysées dans la seconde partie. Leur variabilité temporelle peut être décomposée en trois composantes : de **larges cycles pseudo-séculaires**, des **variations périodiques d'une vingtaine d'années** et des fluctuations inter-annuelles. Les fluctuations à moyen et long terme, expliquant plus de la moitié de la variance des séries, sont synchrones à l'échelle du bassin méditerranéen occidental et du proche Atlantique. La variabilité inter-annuelle, en revanche, n'est synchrone qu'à une échelle locale. On montre finalement que **les fluctuations à long terme des captures peuvent être considérées comme de bons indices des tendances des abondances de la population de thons rouges migrants en Méditerranée**. Une série synthétique est construite pour les décrire.

Les processus biologiques et écologiques susceptibles d'être à l'origine de ces fluctuations sont discutés dans la troisième partie. L'hypothèse d'un forçage environnemental à grande échelle est testée en utilisant des indices à long terme de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), de la longueur du jour (LOD, un indicateur de l'indice de circulation atmosphérique ACI) et de la température. Les analyses spectrales sur les séries de captures, du LOD et des températures révèlent des spectres similaires, avec un pic sur les basses fréquences, alors que celles sur le NAO conduisent à une large bande spectrale. Les régressions et les tests de corrélations ne montrent aucune relation significative entre les captures par les madragues et le NAO et le LOD. En revanche, **les fluctuations à long terme des captures apparaissent significativement et négativement corrélées avec les fluctuations à long terme des températures**. Les processus sous-jacents susceptibles d'expliquer une telle relation, en particulier des **changements migratoires**, sont discutés.

Finalement, les implications des fluctuations pour la gestion de la pêche sont discutées dans une quatrième partie. Un cadre de simulation, couplant un modèle de dynamique de population à une VPA, est élaboré pour tester la pertinence des diagnostics d'évaluation de stock selon différents scénarios d'origine des fluctuations et d'état de la population. Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement, la VPA apparaît capable de reconstruire les fluctuations mais les prédictions sont biaisées lorsqu'il n'est pas tenu compte des fluctuations naturelles du stock. **Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des changements migratoires, la VPA est alors incapable de reproduire la dynamique de la population**. Dans une approche de précaution, les quotas qui en découlent peuvent se révéler au mieux inappropriés, au pire dangereux s'ils sont définis par rapport à un point de référence. Ce concept de point cible, fixe et unique dans le temps, apparaît inapproprié pour le thon rouge ; estimer des "trajectoires de référence" serait sans doute plus pertinent.

Mots-clefs : *Thunnus thynnus* ; madrague ; Méditerranée ; Atlantique Est ; séries temporelles ; tendances à long terme ; fluctuations périodiques ; dynamique de population ; relation thon/environnement ; température ; NAO ; migration ; modèle global ; VPA ; points biologiques de référence ;

Abstract

Describe and gain understanding on fluctuations in animal population over time and space is a central goal of population ecology. This is also crucial to ensure the sustainable management of exploited resources, particularly those with complex population dynamics such as the bluefin tuna. The goal of this work is to collect bluefin tuna catches from the ancestral Mediterranean and Atlantic trap fisheries to (i) characterise long-term fluctuations in bluefin tuna population migrating in the Mediterranean, (ii) analyse their causes et (iii) assess their implications for fisheries management.

The bluefin tuna main biological and ecological characteristics are first detailed. Then, the first part presents the trap fishery, and the process of collect and validation of the historical catches. This leads to develop a data base of **54 time-series more than 20 years long, the longest ones spanning about four centuries**. Mean historical catches were around 15 000 tons/year ([7 000;25 000]).

Time-series are analysed in a second part. Temporal variability of trap catches may be decomposed in three components: **100-year-long periodic fluctuations, 20-year cycles** and inter-annual variations. These medium- to long-term fluctuations, representing more than 50% of the variability in the time-series, were synchronous all around the western Mediterranean and adjacent North Atlantic. In contrast, short-term variability was synchronous at a local scale only. It is argued that **long-term fluctuations in trap catches could be considered as a proxy for those in abundance**, and a synthetic time-series is computed to depict them.

Biological and ecological processes that could cause such long-term fluctuations are discussed in a third part. We tested whether long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna might be related to large-scale environmental changes, using long time-series of the North Atlantic Oscillation (NAO), the Length of the Day index (LOD, a proxy of the atmospheric circulation index ACI) and the temperature. Spectral analyses of trap catches, LOD and temperature displayed similar spectra with peak at low frequency, whereas those of the NAO exhibited a broad band spectrum. Regression analyses and tests of correlation did not reveal any clear relationship between trap catches on the one hand and NAO and LOD on the other hand. In contrast, **long-term fluctuations in trap catches appear to be negatively and significantly related to long-term trends in temperature**. Underlying processes that could explain such a relationship are discussed, with special focus on **changes in migration patterns**.

Finally, implications of such fluctuations in term of fisheries management are discussed in a fourth part. A simulation framework, in which a simulated population dynamics model is coupled with a VPA, is built to test the pertinence of the diagnostic of stock assessment according to different scenarios on fluctuations origins and population status. In the hypothesis of fluctuations linked to variations in the recruitment, VPA appears able to reconstruct the fluctuations but the predictions may be biased if natural fluctuations are not taking into account. **In the hypothesis of fluctuations linked to changes in migration pattern, VPA is not able to reconstruct the population dynamics**. In a precautionary approach, quotas which follow may be unsuitable in the best case, at worst dangerous if they are defined in comparison with a reference point. The concept of cible reference points, fixe and unique over time, appears not relevant for bluefin tuna; estimate trajectory reference pertinent may prove to be more pertinent.

Key-words: *Thunnus thynnus* ; trap fishery ; Mediterranean Sea ; East Atlantic ; time-series ; long-term trend ; periodic fluctuations ; population dynamics ; tunas/environment relationships ; temperature ; NAO ; migration ; management ; VPA ; biological reference point ;

Table des matières

INTRODUCTION	1
Séries à long terme de thon rouge, enjeux écologique et halieutique	1
Une source de données historiques exceptionnelle	2
Objectifs et plan	4
PREMIÈRE PARTIE : LE THON ROUGE D'ATLANTIQUE EST ET SA PÊCHE ANCESTRALE À LA MADRAGUE.....	5
Introduction.....	7
I. Le thon rouge, un grand pélagique migrateur.....	8
I.1. Morphologie et physiologie	8
I.2. Distribution et migrations	8
I.3. Traits d'histoire de vie	12
II. La madrague, un engin passif et traditionnel.....	16
II.1. Historique et contexte de l'exploitation	16
II.2. Technologie et répartition	18
III. Séries historiques de captures	29
III.1. Collecte des données	29
III.2. Constitution d'une base de données homogènes.....	38
III.3. Description de la base de données.....	51
III.4. Estimation des productions historiques	54
DEUXIÈME PARTIE : LES FLUCTUATIONS D'ABONDANCE DU THON ROUGE EN MÉDITERRANÉE	57
Introduction.....	59
I. Variabilité spatio-temporelle des captures	61
I.1. Amplitude des fluctuations	61
I.2. Décomposition du signal temporel.....	64
I.3. Importance de la tendance	66
I.4. Synchronie et échelles spatiales de pertinence.....	67
II. Les fluctuations des captures : de bons indices des fluctuations d'abondance?	75
II.1. Arguments liés à la nature des données	75
II.2. Validation par l'analyse des séries.....	78
II.3. Indice synthétique des fluctuations d'abondance	80

TROISIÈME PARTIE : ORIGINE DES FLUCTUATIONS.....	81
Introduction	83
I. Les processus potentiels	84
I.1. Variations de l'effort de pêche et/ou de la capturabilité	84
I.2. Variations du recrutement.....	85
I.3. Changement des routes migratoires.....	86
II. Fluctuations à long terme, un forçage climatique ?	88
II.1. Matériel	90
II.2. Méthodes	95
II.3. Résultats	96
II.4. Discussion.....	101
 QUATRIÈME PARTIE : IMPLICATION DES FLUCTUATIONS POUR L'ÉVALUATION ET LA GESTION DU STOCK	 105
Introduction.....	107
I. Approche par modèle global	109
I.1. Cadre bayésien : PROCEAN	110
I.2. Cadre des modèles mixtes	113
II. Approche par simulations – Pertinence des diagnostics issus des VPA	115
II.1. Matériel et méthodes	116
II.2. Résultats	121
II.3. Discussion.....	128
 BILAN GÉNÉRAL ET PERSPECTIVES	 131
Séries à long terme de thon rouge.....	131
Fluctuations de la population migrant en Méditerranée.....	132
Déterminisme des fluctuations.....	132
Conséquences pour l'évaluation.....	133
 BIBLIOGRAPHIE	 135
 ANNEXES	 145
Annexe A : Méthode d'estimation des données manquantes	147
Matériel et méthodes.....	148
Résultats	149
Discussion – Conclusion.....	153
Annexe B : Séries environnementales à long terme.....	155
Annexe C : Paramétrisation, limites et performance de la VPA	159
Paramétrisation de la VPA.....	159
Limites et performances de la VPA.....	160

Liste des tableaux

Tab. 1. 1: Paramètres de l'équation de croissance (modèle de von Bertalanffy $L_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}]$).....	13
Tab. 1. 2 : Paramètres de la relation taille - poids ($W = aL^b$).....	13
Tab. 1. 3 : Noms locaux des diverses parties des madragues exploitées en Méditerranée et sur le proche Atlantique.	21
Tab. 1. 4 : Séries individuelles de captures de thon rouge par des sennes de plages.....	31
Tab. 1. 5 : Séries agrégées de captures de thon rouge par les madragues.....	31
Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues.....	33
Tab. 1. 7 : Catégories d'individus et poids correspondants (kg) utilisés dans les différentes régions.....	40
Tab. 1. 8 : Sensibilité à la classe de reproducteur considérée.....	40
Tab. 1. 9 : Régressions utilisées pour la conversion des séries en nombre de thons.....	43
Tab. 1. 10 : Classification géographique et présentation des séries de captures par les madragues retenues pour l'étude.....	45
Tab. 2. 1: Principales caractéristiques des séries temporelles de captures par les madragues.....	62
Tab. 3. 1 : Principales caractéristiques des séries de captures par les madragues utilisées dans l'étude environnementale :.....	90
Tab. 3. 2 : Principales caractéristiques des séries environnementales :	91
Tab. 3. 3 : Résultats des analyses entre séries environnementales et captures de BFT :.....	96
Tab. 4. 1 : Résumé des paramètres d'intérêts pour la gestion pour le modèle de Schaefer (Hilborn et Walters, 1992).	110
Tab. 4. 2 : Traits de vie du thon rouge utilisés dans le modèle de simulation.....	116

Liste des figures

Fig. 1. 1: "La découpe du thon"	7
Fig. 1. 2 : Distribution et migrations du thon rouge dans l'Atlantique	10
Fig. 1. 3 : Circulation superficielle d'été intéressant les migrations du thon rouge en Méditerranée occidentale et position de l'isotherme 15°C (Liorzou, 1989).....	12
Fig. 1. 4 : Taille et poids aux âges	12
Fig. 1. 5 : Aires de ponte du thon rouge en Atlantique Est et mers adjacentes, d'après Mather <i>et al.</i> (1995).....	13
Fig. 1. 6 : Nombre d'œufs aux âges estimés par ajustement d'une polynomiale aux données de Rodriguez Roda (1967a). 14	
Fig. 1. 7: Taux de femelles mûres à chaque âge estimé d'après les données de Mather <i>et al.</i> (1995).....	14
Fig. 1. 8: La pêche au thon au pied des deux tours d'Hercule (gravure de Georges Houfnaglius, 1564).	17
Fig. 1. 9 : Description d'une madrague et de son fonctionnement	19
Fig. 1. 10 : Typologie de l'implantation des madragues dans diverses régions.....	20
Fig. 1. 11 : Localisation des madragues siciliennes, et date de première citation dans un texte.....	22
Fig. 1. 12 : Localisation des madragues sardes.....	23
Fig. 1. 13 : Localisation des madragues tunisiennes (en italique : essais de madragues).	24
Fig. 1. 14 : Plan des madragues tunisiennes de Bordj Khadidja (à gauche) et de Sidi Daoud (à droite), d'après Gruvel (1926).....	24
Fig. 1. 15 : Localisation des madragues espagnoles.....	25
Fig. 1. 16 : Plan des madragues portugaises de Torre Alta (à gauche) et de Torre Althina (à droite).....	26
Fig. 1. 17 : Localisation des madragues portugaises au XIX ^{ème} siècle.	26
Fig. 1. 18 : Captures de thon d'"aller" et de "retour" capturés à Barbate de 1956 à 1969. Encart : Nombre de thons de "retour" en fonction du nombre de thons d'"aller".....	39
Fig. 1. 19 : Séries temporelles de captures à Conil et Zahara	41
Fig. 1. 20 : Production de quatre madragues au cours du XIX ^{ème} et/ou XX ^{ème} siècle, dans quatre régions de Méditerranée et du proche Atlantique : Espagne (Barbate), Sardaigne (Isola Piana), Maroc atlantique (Garifa), Tunisie (Sidi Daoud) . 42	
Fig. 1. 21 : Production de thon rouge par engin de pêche de 1950 à 1997 en Méditerranée (ICCAT, 1999).....	42
Fig. 1. 22 : Production de thon rouge par engin de pêche de 1950 à 1997 sur le proche Atlantique (Espagne, Portugal, Maroc, ICCAT, 1999).....	42
Fig. 1. 23 : Captures historiques des madragues portugaises.....	46
Fig. 1. 24 : Captures historiques des madragues espagnoles	47
Fig. 1. 25 : Captures historiques des madragues marocaines et tunisiennes.....	48
Fig. 1. 26 : Captures historiques des madragues siciliennes.....	49
Fig. 1. 27 : Captures historiques des madragues sardes.....	51
Fig. 1. 28 : Localisation des madragues d'intérêt.....	52
Fig. 1. 29 : Données disponibles de 1600 à 1960.....	53
Fig. 1. 30 : Répartition des séries en fonction du nombre de données.....	54
Fig. 1. 31 : Productions régionales estimées (en nombre de thons) pour la période 1910-1930.....	55
Fig. 2. 1: Etude des fluctuations des captures des madragues espagnoles.....	60
Fig. 2. 2 : Méthodologie suivie pour l'analyse spatio-temporelle des séries.	61
Fig. 2. 3 : Exemples de séries temporelles de captures par les madragues.....	63
Fig. 2. 4 : Trois premiers axes principaux de l'ACP réalisée sur les densités spectrales des 12 séries de plus de 80 ans.	66
Fig. 2. 5 : Pourcentage de variance expliquée par la première composante EVF en fonction de la longueur de la série.	67

Fig. 2. 6 : Distribution des séries sur les axes 1 et 2 des ACP réalisées sur les matrices de corrélation (i) des 39 séries se recoupant sur au moins 15 ans (a,b) et (ii) des 14 séries se recoupant sur au moins 50 ans (c,d).....	69
Fig. 2. 7 : Corrélogrammes modifiés de Koenig et Knops.....	73
Fig. 2. 8 : Evènements de société et captures (log) de la madrague de Favignana (Sicile).....	76
Fig. 2. 9 : Concordance de quelques séries de captures, d'après Sella (1929b).....	79
Fig. 2. 10 : Série synthétique (en gras) estimée par EVF sur la moyenne des valeurs standardisées des différentes séries (trait fin) :	80
Fig. 3. 1 : Reconstruction d'indices NAO à partir de données paléoenvironnementales (les saisons et/ou les indices ciblés sont différents dans chaque cas), par (a) Glueck et Stockton (2001), (b) Cook <i>et al.</i> (1998),.....	89
Fig. 3. 2 : Localisation des madragues (représentées par leurs indices, Tab. 3. 1) et des stations d'enregistrements des séries de températures locales (triangles identifiant de l'ouest à l'est : Cadix, Dar-El-Beida, Cagliari et Palerme).....	92
Fig. 3. 3 : Les séries temporelles de données environnementales	93
Fig. 3. 4 : Densités spectrales des 9 séries de captures de madrague (panneau de gauche) et des 10 séries environnementales (panneau de droite).	98
Fig. 3. 5 : Distribution des probabilités des régressions linéaires entre les séries de BFT et les séries environnementales :	99
Fig. 4. 1 : <i>A priori</i> sur le taux intrinsèque de croissance de la population de BFT r (à gauche) et sur le paramètre de forme du modèle global m (à droite).	112
Fig. 4. 2 : <i>A priori</i> conjoints sur le taux intrinsèque de croissance de la population de thon rouge r et sur le paramètre de forme du modèle global m	112
Fig. 4. 3 : Représentation du cadre de simulation, couplant un modèle de dynamique de population exploitée à une VPA	115
Fig. 4. 4 : Trois scénarios d'évolution de la mortalité par pêche.	119
Fig. 4. 5 : Présentation des 12 analyses	119
Fig. 4. 6 : Schéma explicatif de la résolution d'une VPA, cohorte par cohorte (Pelletier, 1991).	120
Fig. 4. 7 : Résultats des analyses 1 à 3 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement et de forte abondance au moment du diagnostic.....	122
Fig. 4. 8 : Résultats des analyses 4 à 6 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement et de faible abondance au moment du diagnostic	123
Fig. 4. 9 : Résultats des analyses 7 à 9 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à changements migratoires et de forte abondance au moment du diagnostic	126
Fig. 4. 10 : Résultats des analyses 10 à 12 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à changements migratoires et de faible abondance au moment du diagnostic	127

Introduction

L'objet de ce travail est de réunir, valider et exploiter une source de données historiques - les captures de thon rouge par les madragues méditerranéennes et proche Atlantique -, pour (i) caractériser les fluctuations à long terme de la population exploitée, (ii) étudier le déterminisme de ces fluctuations et (iii) en tirer les conséquences en terme d'évaluation et de gestion de stock.

Séries à long terme de thon rouge, enjeux écologique et halieutique

Caractériser et comprendre les fluctuations des populations naturelles constituent les enjeux majeurs de l'écologie (Krebs, 1972 ; May, 1976 ; Kendall *et al.*, 1999 ; Ranta *et al.*, 1999 ; Turchin, 1999 ; Lundberg *et al.*, 2000 ; Turchin, 2002). Les écologistes terrestres sont depuis longtemps convaincus de la clé que représente la variabilité temporelle, et donc les séries à long terme, pour appréhender la question de la dynamique des populations animales. Ils ont ainsi fournis les séries les plus nombreuses et les plus étudiées (e.g. lièvre des neiges (*Lepus americanus*) et lynx du Canada (*Lynx canadensis*, Royama, 1992), rongeurs, insectes), qui leur ont permis d'avancer les premiers modèles sur le déterminisme des fluctuations. Bien que promu dès le début du siècle par J. Hjort (1914, 1926), ce paradigme a mis plus de temps à s'imposer en halieutique. Les séries à long terme, moins nombreuses, ont cependant permis de démontrer l'existence de fluctuations naturelles chez plusieurs populations de poisson, des petits pélagiques (Ljungman, 1882 ; Cushing et Dickson, 1976 ; Baumgartner *et al.*, 1992 ; Schwartzlose *et al.*, 1999 ; Toresen et Oestvedt, 2000) aux salmonidés (Beamish et Bouillon, 1993 ; Beamish *et al.*, 1999) et aux gadidés (Cuvier, 1830 ; Dickson et Brander, 1993 ; Fromentin *et al.*, 1998 ; Bjørnstad *et al.*, 1999).

Outre son intérêt théorique, l'étude de la variabilité des abondances revêt un caractère particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit d'une ressource exploitée. En effet, plus précise est la compréhension de la dynamique spatio-temporelle de la ressource, plus pertinent peut être le mode de gestion proposé. Disposer de séries à long terme représente ainsi un enjeu tout particulier pour la ressource à dynamique complexe que représente le thon rouge (*Thunnus thynnus*, Linné 1758), pour laquelle se posent actuellement des problèmes de gestion (ICCAT, 2003).

La pêche au thon rouge est devenue depuis une quinzaine d'année une activité particulièrement lucrative du fait de la forte demande exercée par le marché japonais du sushi et du sashimi. Ainsi, un thon rouge de bonne qualité (frais, à la chaire grasse) peut se vendre plus de 40 000 US \$ sur la criée de Tokyo. Cette opportunité marchande a engendré une véritable révolution de la pêcherie. L'accroissement des moyens financiers qui en découlent (permettant l'utilisation d'avions pour le repérage des bancs, la "jumboïsation" ⁽¹⁾ des senneurs, ...) et les progrès technologiques (développement des GPS ⁽²⁾, radar à oiseaux, sondeur, sonar multi-faisceaux,...) ont considérablement augmenté l'efficacité des engins actuels et permis l'exploration de nouvelles zones de pêche. Depuis 5 ans, le développement de l'embouche ⁽³⁾ a révolutionné jusqu'aux lois du marché en permettant de réguler les ventes en fonction du cours du poisson. Cette révolution s'est traduite, au niveau de l'exploitation, par une augmentation quasi-exponentielle des captures qui atteignent plus de 50 000 t/an au cours de la dernière décennie. Le thon rouge d'Atlantique Est et de Méditerranée n'a probablement jamais subi de pression de pêche comparable à celle d'aujourd'hui.

Comme toutes les espèces de thonidés atlantiques, le thon rouge est géré par la Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique (CICTA, plus connue sous son acronyme anglais, ICCAT). Tous les 2 ans, des évaluations de stocks sont réalisées par son comité scientifique et servent, depuis 1996, à l'établissement de quotas (ICCAT, 1997). Cependant, de nombreuses incertitudes entourent ces évaluations (ICCAT, 1999). En 2000 et 2001, cette évaluation a été purement et simplement ajournée suite à la dégradation de la qualité des données de captures et d'effort, combinées à une méconnaissance de la dynamique de ces populations et donc de la quantification de facteurs biologiques et écologiques nécessaires aux modèles d'évaluations (Fromentin, 2003).

Une source de données historiques exceptionnelle

Il existe parallèlement une très riche qualité et quantité d'informations concernant la pêche au thon rouge par les madragues méditerranéennes et proche atlantiques. Les madragues sont des pièges fixes et passifs, de plusieurs kilomètres d'envergure, qui stoppent les thons migrant le long de la côte et les rassemblent dans une enceinte de filet où ils sont capturés lors de la "mattanza" (e.g. Farrugio, 1981a, Doumenge, 1998). Cette pêcherie est le fruit de l'observation millénaire des déplacements du thon rouge en Méditerranée (Eschyle, V BC ; Aristote, IV BC ; Pline l'Ancien, I BC ; Oppien, II AC). Les premiers pièges installés à la côte pour capturer le thon rouge sont répandus par les Phéniciens, qui les établissent dans leurs colonies autour de la Méditerranée

⁽¹⁾ Augmentation de la puissance et de la capacité de stockage des senneurs.

⁽²⁾ GPS est l'acronyme de "Global Positioning System", système de positionnement mondial.

⁽³⁾ Les thons sont capturés vivants par des sennes tournantes puis transférés dans des bateaux piscines qui les remorquent jusqu'à des fermes où ils sont engraisés dans des enclos. Cette technique permet d'obtenir une chaire plus grasse (augmentation de la valeur ajoutée), mais aussi de réguler les ventes en fonction du cours du marché.

et sur les côtes occidentales de l'Espagne et de l'Afrique. Poursuivie par les Arabes, la pêche au thon rouge s'organise au Moyen-âge avec la mise en place d'un système capitaliste par les Génois. Ces derniers promeuvent le système des madragues, homogénéisant le principe d'exploitation à l'échelle de la méditerranée occidentale et assurant la collecte des données de captures. Ce système va perdurer pendant 4 siècles, donnant naissance à une exceptionnelle source de données historiques de pêche au thon rouge.

L'idée d'exploiter cette précieuse source de données n'est pas récente. Parona (1919), puis Buen (1925) et Neuparth (1925) ont, les premiers, disserté sur les fluctuations périodiques observées dans les captures des madragues de leurs régions respectives (Italie, Espagne, Portugal). À la même époque, le Pr. Sella (descendant des anciens propriétaires génois) entame un impressionnant travail de collecte de données des madragues siciliennes, sardes, tunisiennes, croates, lybiennes et même espagnoles, portugaises et françaises. Le fruit de ce recensement, poursuivi par le Pr. Scaccini, est aujourd'hui sous la responsabilité du Pr. Piccinetti, au laboratoire de Fano (Italie). Dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, c'est un espagnol tout aussi passionné, le Pr. Rodriguez-Roda, qui se penche sur la question. Il travaille essentiellement sur les madragues des côtes sud de l'Espagne mais collecte des informations très détaillées (prises quotidiennes, catégories de taille, voire conditions environnementales régnant au moment de la capture). Ces données sont aujourd'hui disponibles au siège de l'ICCAT à Madrid. Mais bien qu'en grande partie déjà rassemblées, ces séries à plus ou moins long terme n'avaient encore fait l'objet d'aucune étude quantitative à grande échelle.

Constatant le caractère passif de la madrague, son peu d'évolution technologique et la permanence des sites d'installations, Fromentin *et al.* (2000) ont émis l'hypothèse que cette très riche source d'informations puisse apporter de précieux renseignements sur la dynamique temporelle du thon rouge (et éventuellement, à terme, servir à la gestion des stocks). Grâce au concours de plusieurs scientifiques passionnés, *i.e.* Pr. F. Doumenge (Institut Océanographique de Monaco), H. Farrugio (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, IFREMER) et A. Fonteneau (Institut de Recherche pour le Développement, IRD), un nombre suffisant de série est rassemblé et une étude préliminaire, basée sur un simple calcul de corrélation entre séries brutes et séries détendancialisées, est menée sur 5 longues séries. Les résultats appuient leur hypothèse et montrent l'opportunité de lancer une étude exhaustive, nécessitant un gros effort de documentation, afin de réunir toutes les données de captures disponibles et de mener une analyse quantitative plus poussée.

Cette étude, initiée dans le cadre d'un stage de DEA par S. Delefosse (1999), est l'objet de ce document. Elle est réalisée dans le cadre porteur de deux programmes de recherche : le programme européen STROMBOLI (*Spatial and Temporal Trends in catch Of Mediterranean Bluefin tuna: historical Observations and Latest Inquiries*, EU-DGXIV 99/022) et l'Action de Recherche Thématique "Variabilité spatio-temporelle" (ART 4) du Programme National "Environnement Côtier" (PNEC).

Objectifs et plan

Ce travail a donc pour objectif de rassembler et d'exploiter les données historiques des madragues afin de décrire la variabilité à long terme de la population de thon rouge migrant en Méditerranée, d'en analyser les causes et d'en tirer les conséquences en terme d'évaluation et de gestion de la pêche⁽¹⁾. Il est organisé de la façon suivante :

La première partie présente le matériel de l'étude. Le premier chapitre est une synthèse bibliographique des caractéristiques essentielles de la biologie et de l'écologie du thon rouge, sur lesquelles s'appuieront les chapitres suivants. Le chapitre 2 présente l'historique et le contexte du développement de la pêche à la madrague dans le bassin méditerranéen. Le fonctionnement de l'engin y est décrit et les modifications dont il a pu faire l'objet discutées. Le chapitre 3 décrit la méthodologie adoptée pour la collecte, la validation et l'homogénéisation des données. Il aboutit à la mise en place d'une base de données de séries temporelles de captures de thon rouge et à l'estimation d'un niveau historique de captures.

La seconde partie a pour objet la caractérisation de la variabilité spatio-temporelle de la population de thon rouge exploitée par les madragues. Le chapitre 1 est une analyse descriptive des séries de captures, avec identification des cycles et des tendances, quantification de leur importance relative et caractérisation de la variabilité spatiale. Le chapitre 2 propose une discussion sur la pertinence de considérer les fluctuations à long terme des captures des madragues comme de bons indicateurs des fluctuations à long terme des abondances de thon rouge migrant sur le proche Atlantique et en Méditerranée. Il aboutit à la construction d'une série synthétique décrivant ces fluctuations.

La troisième partie aborde la question du déterminisme de ces fluctuations. Le chapitre 1 est une revue des différentes causes les plus souvent envisagées, à savoir des variations de l'effort de pêche et/ou de la capturabilité, des variations du recrutement ou un changement des routes migratoires. Le chapitre 2 teste l'hypothèse d'un forçage climatique à grande échelle et propose une alternative plausible au comportement migratoire couramment admis du thon rouge.

La quatrième partie porte sur les conséquences des fluctuations pour l'évaluation et la gestion de la pêche. Le chapitre 1 est une tentative de quantifier les erreurs faites sur les estimations de points de référence grâce à une approche par modèle global. Le chapitre 2 se place dans le cadre des évaluations de stock de l'ICCAT pour tester et discuter la pertinence des diagnostics posés à l'issue des VPA selon l'origine des fluctuations (variations du recrutement ou changements migratoires) et différents états du stock.

⁽¹⁾ Le but premier de ce document n'est donc pas d'ordre méthodologique. Cette étude utilise cependant de nombreux outils d'analyse spatio-temporelle (analyse spectrale, analyse en composantes principales...), qui sont des méthodes classiques, déjà bien connues des spécialistes de l'analyse de séries. Pour éviter d'alourdir le manuscrit et concentrer le corps du texte sur les résultats, leurs algorithmes ne sont pas détaillés. Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'ouvrage d'écologie numérique de Legendre et Legendre (1998) et/ou au manuel d'utilisation de la librairie Passtec+ (Beliaeff *et al.*, 2000).

PREMIERE PARTIE

Le thon rouge d'Atlantique Est et sa pêche ancestrale à la madrague

“Ce qui importe, c'est d'aller vers...”
Saint-Exupéry

Introduction

Vestiges archéologiques et représentations antiques témoignent de l'intérêt que suscite le thon rouge chez les populations méditerranéennes depuis des millénaires (Doumenge, 1998 ; Maggio, 2000 ; Fig. 1. 1). L'observation de ses déplacements en Méditerranée, canalisés par la configuration géographique des péninsules, des îles et des détroits, a donné lieu à l'une des pêches les plus anciennes qui ait été organisée à grande échelle : la pêche à la madrague (Doumenge, 1998).



Fig. 1. 1: "La découpe du thon"

Amphore grecque, VI^{ème} siècle avant J.C., Musée de Berlin d'après Gerhard (1858)

Cette première partie s'attache à décrire ce qui fait toute l'originalité de cette pêcherie, qui se fonde sur le comportement original d'une espèce et dont les principes élémentaires remontent à plus de dix siècles. Une synthèse des connaissances sur le thon rouge est tout d'abord présentée. L'objectif n'est pas de dresser un état des lieux exhaustif et détaillé des connaissances sur la biologie et l'écologie du thon rouge - la très bonne synthèse de Mather *et al.* (1995) existe déjà à ce propos - mais veut donner un certain nombre de repères et de caractéristiques essentielles et validées sur lesquelles s'appuieront les hypothèses posées dans les chapitres suivants. Une étude approfondie du développement de la pêcherie passive du thon rouge en Méditerranée et sur le proche Atlantique est ensuite conduite. Elle rassemble les connaissances sur la pêche à la madrague, recueillies dans la littérature historique et au cours de recherches de terrain menées pendant ces trois dernières années. Elle aboutit à l'inventaire des données de production des principales madragues de Méditerranée et d'Atlantique Est et à une estimation de la production historique de cette pêcherie.

I. Le thon rouge, *un grand pélagique migrateur*

Le thon rouge *Thunnus thynnus* (Linné, 1758) est un poisson Téléostéen Actinoptérigien de l'ordre des Perciformes et de la famille des Scombridés, groupe des Thunnidés – Scombrinés. Avec un poids maximal situé couramment entre 250 et 620 kg, atteignant parfois presque la tonne, il est l'un des plus gros Téléostéens, d'où l'origine probable de son nom "thon" que Heldt (1926) attribut au mot phénicien *Thon* ou *Than* désignant « *les plus grands animaux aquatiques* ».

I.1. Morphologie et physiologie

De nombreuses adaptations morphologiques confèrent au thon rouge un remarquable hydrodynamisme : un corps allongé et fusiforme, une nageoire caudale fine et profondément fourchue, carénée sur les côtés, une carène latérale, des nageoires dorsales et pectorales se repliant et s'encastrent dans des cavités pendant la nage (Tiews, 1962). Son système musculaire est évolué et particulièrement développé. Formé de muscles blancs, mais aussi de muscles rouges dont le rendement métabolique est plus élevé, il lui permet de parcourir des distances considérables à grande allure pendant de nombreuses heures (Korsmeyer et Dewar, 2001). Un thon rouge adulte peut ainsi parcourir environ 70 à 80 km/jour à une vitesse moyenne de 6 km/h, et atteindre quelques 30 km/h en pointe (Lutcavage *et al.*, 2000).

Au sommet de l'évolution des thonidés, le thon rouge dispose d'une capacité de thermo-régulation très développée : sa température interne est régulée entre 24 et 35°C grâce à un système circulatoire d'échange de chaleur à contre-courant, le *rete mirabile*. Ce système permet de conserver ou d'évacuer la chaleur produite par l'activité musculaire et ainsi d'améliorer les performances musculaires, d'accroître les facultés de récupération après un effort prolongé, et de s'émanciper, dans une certaine mesure, des variations thermiques du milieu. Sa vessie natatoire a un développement de type extensif lui permettant des migrations verticales importantes (Korsmeyer et Dewar, 2001).

Ces adaptations lui permettent d'effectuer de grandes migrations dans les eaux tropicales et tempérées de l'Atlantique Nord et des mers adjacentes et de coloniser une large aire de distribution.

I.2. Distribution et migrations

I.2.1 Aire de répartition et préférences écologiques

Le thon rouge fréquente préférentiellement les eaux tempérées et tropicales des océans Pacifique et Atlantique. Dans ce dernier, il occupe une aire de répartition allant des îles Lofoten (côte ouest de la Norvège) jusqu'à l'équateur, et de la mer des Antilles jusqu'à la Nouvelle Ecosse (Fig. 1. 2). Sa tolérance thermique

s'élargit avec l'âge, allant de 10-12°C à 25-29°C pour les adultes (24°C pour la ponte, Rivas, 1978 ; Schaefer, 2001). C'est également un poisson euryhalin, supportant des eaux très dessalées (18-20‰ en Mer Noire). Il se déplace en banc, en surface dans les eaux tempérées (0 à -20m), en profondeur lorsque les eaux profondes sont plus chaudes que celles de surface (-100 à -200 m, les plongées pouvant atteindre -1000 m d'après les marques archives et *pop-up*, Lutcavage *et al.*, 2000 ; Block *et al.*, 2001).

1.2.2 Routes de migration

Repérées de longue date dans les bassins méditerranéens, depuis la mer Noire jusqu'à Gibraltar, les migrations du thon rouge n'ont cessé d'intriguer les naturalistes. La description la plus ancienne remonte à l'Antiquité, avec les écrits d'Aristote : « ... *les thons pénètrent dans le Pont en suivant la rive droite et ils en ressortent en longeant la gauche. On prétend qu'ils agissent ainsi parce qu'ils voient mieux du côté droit... Quoi qu'il en soit c'est le jour que voyagent les poissons qui vont par bancs et c'est la nuit qu'ils se reposent et se nourrissent à moins qu'il n'y ait la lune, alors ils poursuivent leur route sans se reposer. Certains habitants des côtes disent qu'au moment du solstice d'hiver, ils ne changent plus de place et restent en repos, à l'endroit où l'hiver les a surpris jusqu'à l'équinoxe... [...] Quand arrive le printemps, ils se mettent en marche et gagnent la côte pour s'accoupler et pondre...* ». Cette théorie dite "migratoire" faisait ainsi naître chaque été les thons en Mer Noire avant de les voir entreprendre un périple circum-méditerranéen jusqu'au détroit de Gibraltar et à l'océan Atlantique. Elle a prévalu de nombreux siècles avant que n'émerge, au début du XIX^{ème} siècle, la théorie "autochtone" : Pavesi (1889) puis Bounhiol (1911), Roule (1914, 1918), Buen (1925) et Scordia (1938) soutinrent successivement le concept de deux populations, l'une méditerranéenne, l'autre atlantique, complètement distinctes (voir également Farrugio, 1981a ; Mather *et al.*, 1995). Les premières expériences de marquage de Sella (1929a, 1929b), puis les marquages intensifs de Rodriguez-Roda (1964a, 1980a), vinrent finalement démontrer l'existence d'échanges entre bassins atlantique et méditerranéen.

Depuis, les expériences de marquage traditionnel, et plus récemment, les marques archives et *pop-up* ont permis de documenter les migrations atlantiques et méditerranéennes du thon rouge (Mather *et al.*, 1995 ; Gunn et Block, 2001). Bien que de nombreuses incertitudes demeurent encore, le schéma suivant est celui actuellement couramment admis pour le thon rouge d'Atlantique Est (suivant la dénomination des unités de gestion de l'ICCAT, ICCAT, 2003). Il est possible qu'une proportion non négligeable d'adultes demeurent toute l'année en Méditerranée. Néanmoins il est prouvé que des reproducteurs effectuent de vastes migrations depuis leurs aires de nutrition (e.g. côtes norvégiennes et mer du Nord pour les plus grands individus (Tiews, 1964 ; Hamre *et al.*, 1971), golfe de Gascogne (Bard *et al.*, 1973 ; Cort et Cendrero, 1975), upwelling des côtes marocaines atlantiques (Aloncle, 1964) vers les frayères, principalement méditerranéennes. A la fin du printemps - début de l'été, ces géniteurs passent le détroit de Gibraltar (thons de course, Sella, 1929b), longent les côtes nord africaines d'ouest en est par faibles fonds, environ 10 à 30 m, puis remontent vers les deux principales zones de pontes

(l'archipel des Baléares et le sud de la mer Tyrrhénienne). Des individus ont également été identifiés dans le bassin oriental et en mer Noire, mais aucune zone de ponte n'y est connue. Une fois la ponte achevée, les thons peuvent regagner l'Atlantique (thons de retour), laissant derrière eux leur progéniture qui semble passer sa première année dans la Méditerranée occidentale et l'Adriatique. Dès leur deuxième année, les jeunes thons commencent à sortir de la Méditerranée et à rejoindre les migrations atlanto-méditerranéennes des adultes (Sara, 1964, 1973). A partir des années suivantes, les migrations peuvent être de plus en plus lointaines, et parfois trans-atlantiques.

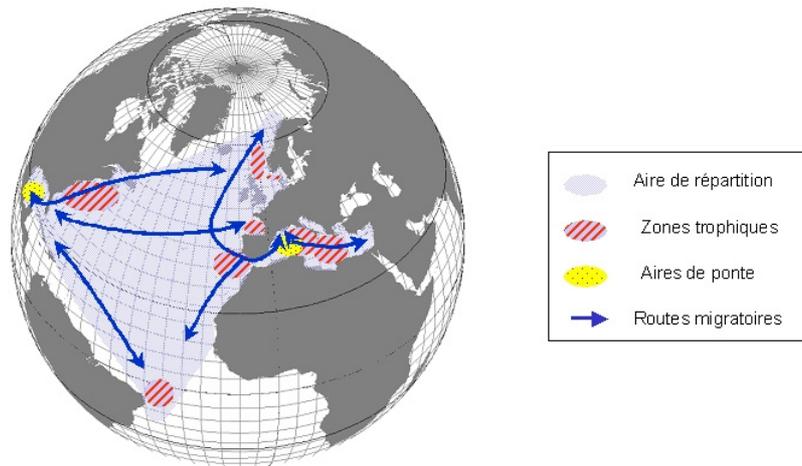


Fig. 1. 2 : Distribution et migrations du thon rouge dans l'Atlantique

Le thon rouge d'Atlantique Ouest est généralement considéré se reproduire dans le golfe du Mexique (Mather *et al.*, 1995), mais de récentes études font état de nouvelles zones de ponte potentielles au large de la Caroline du Nord (Block *et al.*, 2001), et, bien que plus controversée, dans l'Atlantique centre (Lutcavage *et al.*, 1999). Comme le thon rouge de l'Atlantique Est, il entreprend ensuite de grandes migrations, principalement vers le nord, le long de la côte est américaine suivant le *Gulf Stream*, voir trans-atlantiques vers l'Atlantique Est ou la Méditerranée (Block *et al.*, 2001).

Les migrations du thon rouge comporte encore cependant de nombreuses inconnues, que cherchent à résoudre les nouvelles techniques de marquages en plein essor.

1.2.3 Déterminisme des migrations

Le déterminisme des migrations du thon rouge est très mal connu, mais quelques hypothèses peuvent néanmoins être avancées. Le chapitre précédent met en avant deux principales finalités à ces déplacements : la quête de nourriture et le ralliement des frayères. En se basant sur l'hypothèse évolutionniste, ces migrations, pour être rentables, doivent permettre aux individus de rejoindre des zones où les conditions de nutrition et/ou de reproduction seront suffisamment favorables pour que le bénéfice pour l'espèce soit supérieur au coût énergétique élevé du déplacement.

La migration trophique va ainsi rechercher à maximiser le bénéfice énergétique, *i.e.* à rejoindre des zones où les conditions hydro-climatiques permettront une production primaire et secondaire suffisamment importante pour couvrir les dépenses énergétiques du déplacement et favoriser la croissance des individus. Il semble que les aires trophiques fréquentées par le thon rouge évoluent dans le temps et dans l'espace : les eaux du large de la Norvège et de la Mer du Nord ont été largement fréquentées par des bancs de thons de 1951 à 1962, avant que ceux-ci n'en disparaissent brusquement (Tiews, 1978 ; Pusineri *et al.*, 2002) ; l'épisode de la pêche brésilienne, tout aussi éphémère (1960-1967, Mather *et al.*, 1995), laisse également supposer une fréquentation temporaire de ces eaux par le thon rouge. Des changements des facteurs physiques du milieu (températures des eaux de surface (SST),...) et des courants peuvent être avancés pour expliquer cette diversité spatio-temporelle des zones trophiques fréquentées (*e.g.*, une réduction du flux atlantique sur la mer du Nord et/ou un refroidissement pour expliquer l'effondrement de la pêche nordique, Binet et Leroy, 1987 ; Corten, 1990 ; Marsac, 1999).

Les migrations de reproduction apparaissent au contraire bien déterminées dans le temps (de mars - avril à septembre) et dans l'espace (golfe du Mexique, Méditerranée occidentale principalement). Là encore, seules des hypothèses peuvent être avancées quant aux mécanismes qui déclenchent et guident ces migrations. Les indices potentiellement utilisables pour s'orienter dans le milieu marin incluent les corps célestes, la topographie du fond, des amers à terre, les courants, des gradients de température et de salinité, les odeurs et les saveurs, les sons et le géomagnétisme (Stevick *et al.*, 2002). On peut supposer, à l'instar des grands migrateurs que sont les salmonidés (Healey et Groot, 1986 ; Hansen *et al.*, 1993) ou les tortues marines (Lohmann et Lohmann, 1996 ; Lohmann *et al.*, 1999), que le thon rouge va utiliser des mécanismes différents selon s'il se trouve éloigné ou à l'approche du site "recherché" :

- à grande échelle, il pourra avoir recours à la "navigation à la boussole" et à l'empirisme : géomagnétisme pour la longitude, photopériode pour la latitude, mémoire des courants,...
- à l'approche du site, il utilisera plutôt des indices de l'environnement local, chimiques ou bathymétriques : topographie de la côte, gradient de température, de salinité/densité...

La navigation magnétique s'appuie sur la faculté de l'animal à déterminer sa position globale et sa position relative par rapport au but, à partir des caractéristiques du champ magnétique terrestre. Il doit pour cela être capable de percevoir au moins deux paramètres magnétiques distincts, qui varient chacun dans une direction différente à travers la surface terrestre. Une telle sensibilité à un champ magnétique a été mise en évidence chez l'albacore *Thunnus albacares* (Walker, 1984 ; Walker *et al.*, 1984, 1997), ce qui laisse envisager la possibilité chez les thonidés d'une orientation en utilisant une carte magnétique bicoordonnée. Le croisement de deux indices de nature différente est également possible : la tortue, par exemple, localise la région recherchée en croisant isobathe et isoligne magnétique (angle d'inclinaison ou intensité, Lohmann *et al.*, 1999).

Près du but, les données sont plus précises. En Méditerranée occidentale, les grands trajets migratoires observés suivent les grandes veines de courant (Fig. 1. 3). Dès 1929, Sella (1929a, 1929b) soulignait que les adultes en période de reproduction étaient « *hypersensibles aux variations du milieu* », et que des

phénomènes de thermotropisme et d'halotropisme pouvaient éventuellement guider le thon rouge. Récemment, l'influence de la température sur les derniers stades de maturation des gonades a été démontrée par Medina *et al.* (2002).

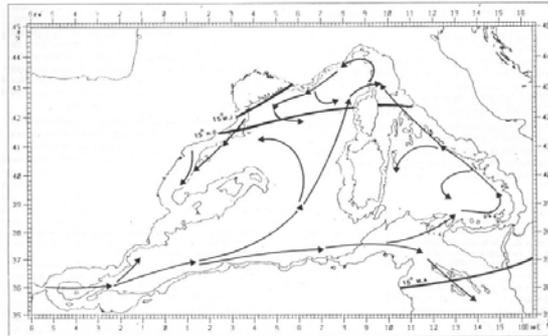


Fig. 1. 3 : Circulation superficielle d'été intéressant les migrations du thon rouge en Méditerranée occidentale et position de l'isotherme 15°C (Liorzou, 1989).

I.3. Traits d'histoire de vie

I.3.1 Croissance

La croissance du thon rouge est relativement rapide, du moins dans les trois premières années (Fig. 1. 4). Les œufs mesurent environ 1 mm de diamètre. La croissance est plus importante pendant l'été (30 à 40 cm le premier été sur 50 à 60 cm pendant la première année, puis une dizaine de cm les étés suivants sur 20 à 30 cm pendant l'année, Mather et Schuck, 1960 ; Mather *et al.*, 1995). A la fin du premier été, un jeune thon de 3 mois mesure ainsi un peu moins de 35 cm de long et pèse un peu plus de 300 g ; à 1 an, il atteint 50 cm et pèse 3 à 5 kg ; à six ans, il dépasse les 60 kg et mesure environ 1,5 m. Sa croissance en longueur est importante durant les premières années de sa vie, alors que sa croissance pondérale devient relativement plus élevée à partir de la quatrième année : 15 à 30 kg par an (Cort, 1991). Les mâles ont une croissance plus rapide que les femelles après maturation. Les plus gros thons sont essentiellement des mâles qui peuvent atteindre plus de 3 m et peser jusqu'à 900 kg.

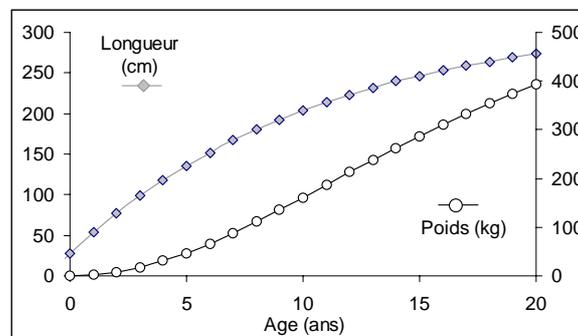


Fig. 1. 4 : Taille et poids aux âges estimés selon les équations et paramètres en vigueur à l'ICCAT

De nombreuses courbes de croissance et relations taille - poids sont disponibles dans la littérature. Tiews (1962), Farrugio (1981a) puis Mather *et al.* (1995) en ont proposé une synthèse. On retiendra pour cette étude, les paramètres utilisés dans les procédures d'évaluation de l'ICCAT pour le stock est atlantique (Cort, 1991 ; ICCAT, 1997, Tab. 1. 1, Tab. 1. 2).

Tab. 1. 1: Paramètres de l'équation de croissance (modèle de von Bertalanffy

$$L_t = L_\infty \left[1 - e^{-k(t-t_0)} \right]$$

Paramètre	Valeur
L_∞	318,85
t_0	-0,97
k	0,093

Tab. 1. 2 : Paramètres de la relation taille - poids ($W = aL^b$)

Paramètre	Valeur
a	$2,95 \times 10^{-5}$
b	2,898958

1.3.2 Reproduction

La ponte est annuelle et se déroule de mi-mai à fin juin dans des eaux généralement supérieure à 24°C (Schaefer, 2001). Les reproducteurs se rassemblent alors en grand nombre sur des frayères. Pour l'Atlantique Est, la Méditerranée occidentale semble être une aire de frai privilégiée ; deux zones de ponte principales y sont clairement identifiées : les Baléares et le Sud de la mer Tyrrhénienne (Fig. 1. 5). D'autres zones, comme la baie ibéro-marocaine, les Canaries, les Açores, le golfe de Gascogne et la mer Ionienne sont également évoquées (e.g. Buen, 1925, 1927 ; Rivas, 1954 ; Furnestin et Dardignac, 1962 ; Aloncle, 1964). Les paramètres caractéristiques de la fécondité du thon rouge sont présentés dans l'encadré 1.

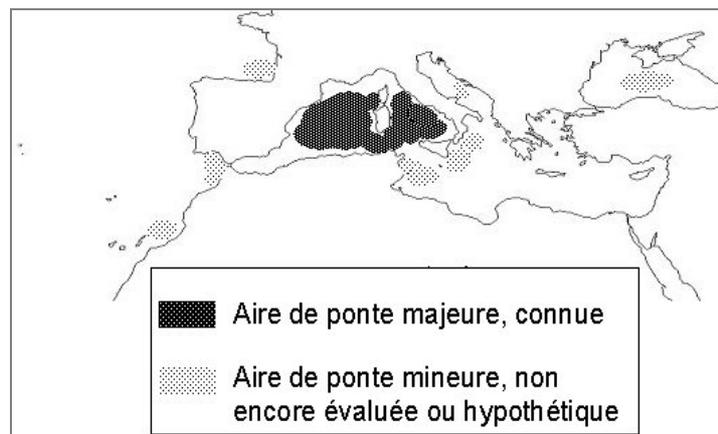


Fig. 1. 5 : Aires de ponte du thon rouge en Atlantique Est et mers adjacentes, d'après Mather *et al.* (1995).

Encadré 1 : Fécondité du thon rouge

Les principaux paramètres caractéristiques de la fécondité du thon rouge peuvent être estimés à partir de données de la littérature :

◆ les études sur le **sexe ratio** (sr) sont synthétisées par Tiews (1962). Les résultats, bien que très variables, montrent une légère prédominance du nombre de femelles (environ 60 pour 40 mâles).

◆ le **nombre d'œufs** f_t produits par une femelle d'âge t peut être estimé à partir de la courbe de fécondité en fonction de la taille proposée par Rodriguez-Roda (1967a), de la fonction de croissance de Farrugio (1981a) et du nombre maximum d'œufs donné dans la littérature (Mather *et al.*, 1995), soit :

$$- \text{pour } x \leq 2, f_t = 0,$$

$$- \text{pour } x > 2, f_t = at^3 + bt^2 + ct + d \text{ avec } (a, b, c, d) \in \mathfrak{R}, \text{ estimés par ajustement d'une}$$

fonction polynomiale à la courbe de fécondité ($r^2=99,9\%$), avec $f_t \leq 46000$.

Suivant McAllister *et al.* (2000), nous supposons f_t être normalement distribué, avec une moyenne \bar{f}_t et une variance $0,1\bar{f}_t$. Ainsi, une femelle porte de 5 à 45 millions d'œufs selon son âge. A titre d'exemple, une femelle de 10 ans (2 m, 150 kg) porte plus de 9 millions d'œufs (Fig. 1. 6).

◆ l'**âge à maturité** semble varier spatialement et probablement temporellement. Pour la population de thon rouge d'Atlantique Est, la maturité sexuelle est considérée atteinte vers 4-5 ans (Mather *et al.*, 1995).

L'ogive de maturité des femelles O_t est calculée en ajustant un modèle classique de maturité

$$O_t = \frac{1}{1 + \exp(g(t-k))}$$

aux données de maturité à chaque âge extraites de la littérature et synthétisées par Mather *et al.* (1995, Fig. 1. 7). L'ajustement ($r^2=99,8\%$) conduit à l'estimation des paramètres $g = -1,25$ et $k = 4$. Suivant McAllister *et al.* (2000), nous supposons g et k normalement distribués, avec des moyennes respectives \bar{g} et \bar{k} et un coefficient de variation 0,1.

◆ finalement, le **taux de fécondité** F_t est calculé comme $F_t = sr \times f_t \times O_t$.

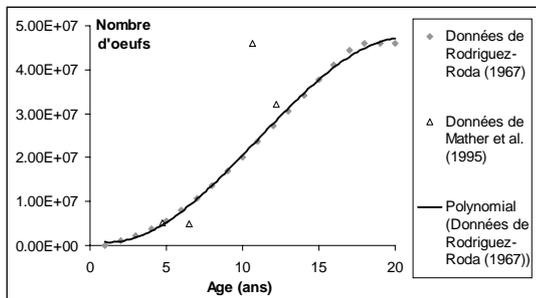


Fig. 1. 6 : Nombre d'œufs aux âges estimés par ajustement d'une polynomiale aux données de Rodriguez Roda (1967a).

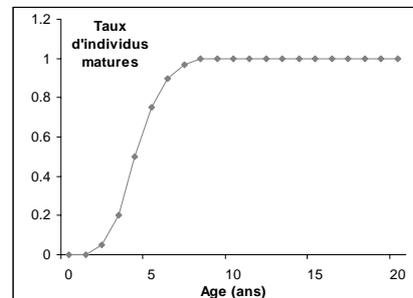


Fig. 1. 7 : Taux de femelles mûres à chaque âge estimé d'après les données de Mather *et al.* (1995)

1.3.3 Mortalité naturelle

Il n'existe que très peu d'information sur le taux de mortalité naturelle du thon rouge de l'Atlantique. Sa longévité serait au moins supérieure à 15 ans (nous la supposons ici égale à 20 ans, suivant Mather *et al.*, 1995). Les considérations relatives à la mortalité naturelle du thon rouge, qui conduisent aux estimations des paramètres utilisés dans ce document, sont détaillées dans l'encadré 2.

Encadré 2 : Taux de mortalité naturelle et de survie

◆ Taux de mortalité naturelle

Pendant longtemps, l'ICCAT a considéré, dans les procédures d'évaluation de stock, une mortalité naturelle (M) constante pour tous les âges en raison d'un manque de connaissances sur ce paramètre et de commodités d'ordre méthodologiques (meilleur ajustement des modèles). Depuis 1998 cependant, un M âge-dépendant, basé sur le vecteur de mortalité naturelle du thon rouge du sud (*Thunnus maccoyii*) est utilisé pour le stock est (ICCAT, 1999). La disponibilité de nourriture et la prédation ayant des effets certainement plus conséquents sur les groupes d'âges les plus jeunes, il est en effet raisonnable de supposer que la mortalité naturelle du thon rouge de l'Atlantique (M_{BFT}) varie avec l'âge (avec des fluctuations inter-annuelles) et est plus élevée pour les premiers groupes d'âges. Le vecteur de mortalité naturelle du thon rouge du sud (M_{SBF}), estimé d'après une vaste expérience de marquage, étant l'information actuellement disponible relayant ces critères avec le plus d'objectivité, nous adopterons dans cette étude, pour les âges $t = 1$ à 10+ respectivement :

$$M_{BFT} = M_{SBF} = [0,49 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,20 ; 0,175 ; 0,15 ; 0,125 ; 0,1]$$

Pour tenir compte des incertitudes liées à la détermination de ce facteur, nous supposerons M lognormal de moyenne M_t et de coefficient de variation 0,5.

◆ Le taux de survie S_t est calculé comme $S_t = 1 - M_t$.

Les informations relatives à la mortalité des juvéniles d'âge 0 sont très peu nombreuses dans la littérature et très incertaines (Mather *et al.*, 1995 ; Lioka *et al.*, 2000). S_0 est donc estimée à partir des survies d'autres espèces présentant des traits de vie proches et dont la survie à l'âge 0 est mieux documentée : l'espadon (*Xiphias gladius*, stratégie plus $r^{(1)}$ que le thon rouge, *e.g.* McAllister *et al.*, 2000 ; Fromentin *et al.*, 2001) et diverses espèces de requins (stratégie plus $k^{(2)}$ que le thon rouge, *e.g.* Cortes, 2000). En raison des incertitudes liées à son estimation et aux nombreux facteurs aléatoires dont elle dépend (conditions environnementales, prédation,...), S_0 est présumée être distribuée selon une loi lognormale de moyenne $2,25 \times 10^{-8}$ et de coefficient de variation 1,0.

1.3.4 Nutrition

Le thon rouge est un chasseur carnassier très vorace : ses caractéristiques morphologiques et physiologiques entraînant un grand besoin de protéines, il est en quête permanente de nourriture. Les adultes se nourrissent principalement de petits pélagiques (anchois, sardines, maquereaux, harengs, sprats, Tiews, 1962 ; Mather *et al.*, 1995). Les juvéniles ont un régime alimentaire composé à 60% de crustacés, 20% de poissons et 20% de céphalopodes. Le thon rouge semble toutefois être un chasseur opportuniste et avoir un large spectre de proies potentielles. En période de reproduction, les géniteurs cesseraient de s'alimenter (Tiews, 1962).

⁽¹⁾ Stratégie r : stratégie d'évolution privilégiant le renouvellement rapide des générations ; les espèces à stratégie r présentent une croissance plutôt rapide, une maturité précoce, plusieurs événements reproductifs par an, une progéniture nombreuse (Begon *et al.*, 1996).

⁽²⁾ Stratégie k : stratégie d'évolution visant à maintenir la population au niveau de la capacité de charge du milieu K ; les espèces à stratégie k ont une maturité plus tardive, privilégient l'allocation d'énergie à la qualité des œufs plutôt qu'à leur nombre, ont une durée de vie longue (Begon *et al.*, 1996).

II. La madrague, *un engin passif et traditionnel*

Les migrations du thon rouge ont très tôt donné lieu à des pêches périodiques « *merveilleuses* » (Oppien, II AC) sur les rivages méditerranéens. Les techniques de pêche se sont développées au cours des siècles et répandues au rythme des conquêtes et des invasions. Elles trouvent leur aboutissement au Moyen-âge dans un système qui s'organise à l'échelle du bassin méditerranéen occidental : la madrague.

Le terme même de madrague illustre son histoire longue et circum-méditerranéenne. De nombreuses origines lui sont proposées. Selon Gourret (1894), il dériverait de *mandraque*, du grec *μανδρα* (parc, bergerie) et du latin *aqua*, eau. D'autres auteurs (Dieuzeide et Novella, 1953 ; Pessoa, 1997) lui proposent une origine provençale (*madrago*) ou encore espagnole (*almadraba*), dérivant de l'arabe *alma* (le lieu) et *darab* (tuer), soit le lieu de la tuerie, ou de (*al*) *mazraba* : espèce de clôture. Berthelot (1869) y voit une expression, transmise de conquête en conquête des Grecs anciens aux Carthaginois, puis aux Romains et de ceux-ci aux Goths et aux Grecs du Bas-Empire puis enfin aux Arabes. Le terme madrague a bien souvent été abusivement employé dans la littérature pour désigner indistinctement les divers engins de pêche utilisés à la côte, qu'il s'agisse d'arrêter les thons de passage au moyen de filets sédentaires ou de les cerner avec des filets mobiles. La véritable madrague a pourtant une définition stricte, celle d'un piège fixe et passif composé d'au moins deux parties : (1) un barrage plus ou moins perpendiculaire au rivage qui sert à l'interception et au déroutement du poisson et (2) plusieurs chambres de filets où le poisson se concentre, la capture s'effectuant dans la dernière chambre.

Ce chapitre a pour premier objectif de replacer la pêche à la madrague dans son contexte historique, social et économique pour en souligner les contraintes et les enjeux. Il décrit ensuite la technologie et le fonctionnement de l'engin, en analysant en particulier son évolution dans le temps et dans l'espace. Une synthèse est proposée dans le corps du texte et différents encadrés détaillent l'historique et les éventuelles particularités locales des madragues dans les différents hauts lieux de la pêche au thon sur les côtes méditerranéennes et proches atlantiques.

II.1. Historique et contexte de l'exploitation

Les traces d'une activité de pêche au thon rouge le long des côtes méditerranéennes remontent à la préhistoire (e.g. Desse et Desse-Debret, 1994 ; Powell, 1996 ; Stratouli, 1996) et les prémices d'une activité organisée à l'Antiquité (Aristote, IV BC ; Oppien, II AC ; Thomazi, 1947 ; Doumenge, 1998). Les premiers engins utilisés pour la capture du thon sont des filets encerclant (type senne de plage, seinche, cerne, Fig. 1. 8) ; ils ont subsisté jusqu'au début du XVII^{ème} siècle en Sardaigne et même jusqu'au début du XIX^{ème} siècle en

Andalousie (Duhamel du Monceau, 1769-1782 ; Sañez-Reguart, 1791-1795 ; Pavesi, 1889). Cette technique présentait l'avantage de ne pas imposer d'investissements lourds mais se trouvait, notamment en Espagne, largement tributaire d'une main d'œuvre populaire et agitée (Sole, 1965). La pêche au thon s'organisant vers un ordre industriel, la technique de piège fixe est peu à peu adoptée. Ces engin sont conçus en Sicile dès le Haut Moyen-âge et sont adoptés en Sardaigne au début du XVII^{ème} siècle puis en Andalousie au début du XIX^{ème} siècle (Encadré 3 à Encadré 7). On parle de *tonnarella* ou *thonnaire* lorsqu'ils sont de petite taille (sur les côtes françaises notamment), de *tonnara*, d'*almadraba* ou madrague quand il s'agit d'une installation de grande envergure (plusieurs kilomètres de long).



Fig. 1. 8: La pêche au thon au pied des deux tours d'Hercule (gravure de Georges Houfnaglius, 1564).

Pêche à la senne de plage et valorisation du produit de la pêche à terre à Cadix au XVI^{ème} siècle : les madragues n'y sont pas encore en usage.

Les moyens mis en œuvre sont alors à l'échelle d'une véritable entreprise (Doumenge, 1998). La technique de pêche à la madrague elle-même implique de lourds investissements en filets et en embarcations (plus de 1000 t de matériel pour la calaison, une dizaine d'embarcations pour les opérations de pêche), auxquels s'ajoutent les frais de main d'œuvre. A terre, la conservation et le conditionnement du poisson nécessitent une organisation industrielle. Les captures massives ne peuvent être toutes écoulées sur les marchés locaux et doivent être valorisées. Leur traitement réclame un artisanat spécialisé et des matières premières (sel, huile, bois pour la confection des tonneaux). Le produit de la pêche est tout d'abord simplement salé. Puis la conserve à l'huile se développe au XVIII^{ème} siècle ; elle nécessite une cuisson et la construction d'infrastructures adaptées. Dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, la conserverie en boîte métallique s'impose et ce sont de véritables usines qui

deviennent nécessaires. La gestion de la main d'œuvre est également à échelle entrepreneuriale : il faut mobiliser, loger, nourrir et rémunérer, pour quelques semaines et à dates précises, des centaines de pêcheurs, tonneliers, saleurs et autres forgerons. Il faut enfin vendre et exporter cette marchandise sous forme de barils de salaison ou de produits annexes (Bresc, 1986).

Le système de la madrague nécessite donc un soutien financier solide, capable d'assumer les avances indispensables à sa mise en place et à son exploitation (à titre d'exemple, les investissements sont estimés entre 800 000 et 1 000 000 livres à la fin du XIX^{ème} siècle en Italie et à 1 200 000 pesetas en Espagne après la première guerre mondiale lorsqu'un thon de 100 kg en vaut environ 200, Doumenge, 1998). En entrepreneurs particulièrement doués, les marchands génois vont rapidement s'imposer et faire prospérer le système. Dès le début du XII^{ème} siècle, ils sont les principaux partenaires des ports musulmans de la méditerranée occidentale et du proche Atlantique (Doumenge, 1998). Leur influence s'étend rapidement : pêcheries de l'Andalousie et de l'Algarve, Sicile, Sardaigne (Heers, 1961). Ils savent obtenir les concessions favorables des suzerains à court d'argent (Encadré 4), assurer le transfert de technologie des madragues perfectionnées utilisées en Sicile jusqu'en Andalousie, en Sardaigne et en Tunisie (Encadré 4, Encadré 5), valoriser les produits de la pêche (Heers, 1961 ; Bresc, 1986), organiser le transport et le marché (Doumenge, 1998). Du XV au XIX^{ème} siècle, les Génois se trouvent ainsi impliqués dans la gestion des madragues de tous les hauts lieux de la pêche au thon, promouvant ainsi l'homogénéisation du système d'exploitation et l'organisation du négoce à l'échelle du bassin méditerranéen occidental.

Ce système, reposant sur la libre circulation des hommes, des marchandises et des capitaux entre un pôle central et des établissements producteurs lointains est ébranlé dès la fin du XIX^{ème} siècle par les affrontements politiques franco-italiens et le cloisonnement de l'espace méditerranéen suite aux poussées coloniales. Il se fragmente définitivement au XX^{ème} siècle avec les crises économique-politiques de la première guerre mondiale, la mise en place du régime fasciste, la guerre civile espagnole et la seconde guerre mondiale (Doumenge, 1998).

II.2. Technologie et répartition

Une madrague est une installation de pêche fixe qui se base sur deux principes : l'interception des poissons et leur concentration en une zone restreinte où la capture est possible. La madrague se compose en conséquence de deux parties : un barrage plus ou moins perpendiculaire au rivage, la "queue", qui intercepte et dérouté les thons, et une série de chambres, qui forme le "corps" proprement dit de la madrague où se concentre le poisson. Rassemblés dans la dernière chambre, la "chambre de la mort", les thons sont capturés à l'aide de gaffes lors de la mise à mort ou *mattanza* (e.g. Berthelot, 1869 ; Gourret, 1894 ; Thomazi, 1947 ; Naintré *et al.*, 1948 ; Fontaine, 1974, Fig. 1. 9, Encadré 8).

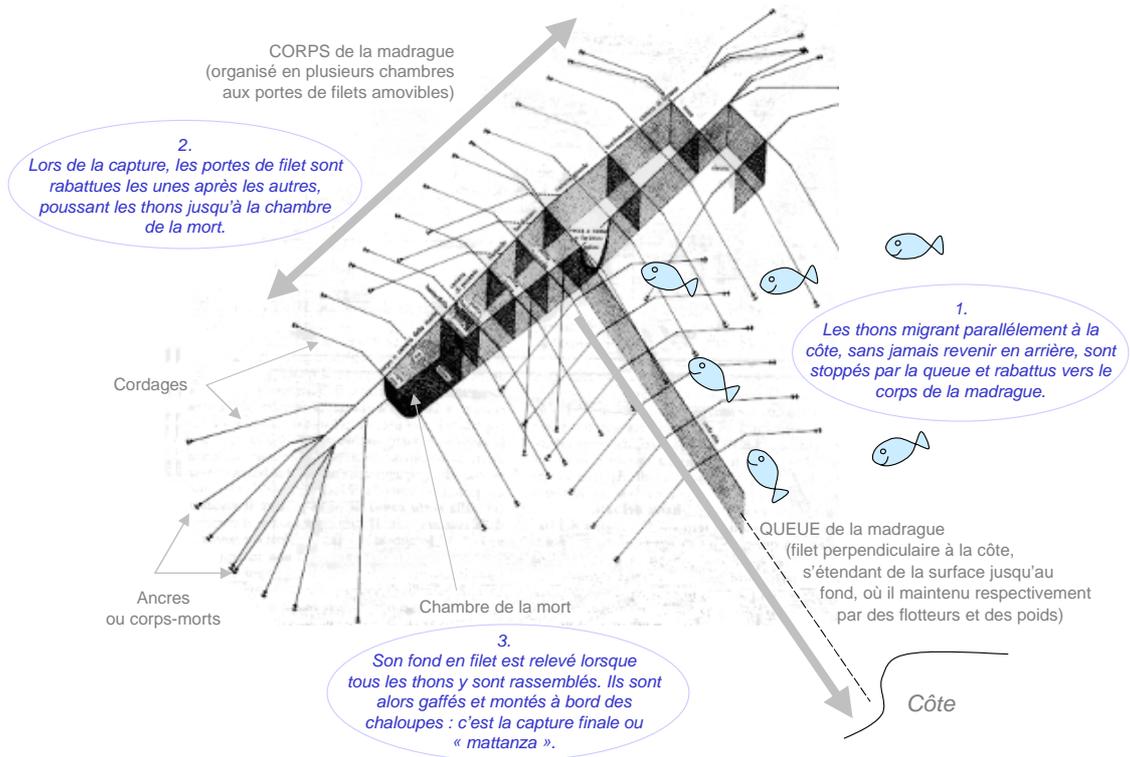


Fig. 1. 9 : Description d'une madrague et de son fonctionnement.
Madrague de Favignana (Consolo ,1986).

Les nombreuses descriptions (e.g. notamment Pavesi (1889) pour l'Italie, Sañez-Reguart (1791-1795) pour l'Espagne, Bragança (1899) pour le Portugal mais aussi De Fages et Ponzevera (1908), Aubertin (1909), Beaugé *et al.* (1936), Dieuzeide et Novella (1953), Fodera (1961), Sara (1980), ...) font état de conceptions similaires des madragues tout autour du bassin méditerranéen et du détroit de Gibraltar (Fig. 1. 10), les quelques différences résidant dans le nombre de queues installées selon que les madragues capturent le thon "de course" (quand il rentre en Méditerranée) ou "de retour" (quand il en sort). Dieuzeide et Novella (1953) soulignent ainsi la ressemblance des noms désignant les diverses parties des engins (Tab. 1. 3), preuve selon eux d'une origine commune, d'une identité d'application des mêmes principes de conception.

La caractéristique de la madrague d'être une installation fixe conditionne ses dimensions et les limites de son rendement. En raison de la nature relativement simple de l'engin (ensemble de filets, de flotteurs, de cordages et d'ancres pour fixer le tout), la madrague n'a fait l'objet que très peu d'innovations techniques au cours des siècles (passage de filets en chanvre à des filets de nylon, optimisation de la taille des mailles et de l'installation,...) qui n'ont en rien révolutionné la pêche, la madrague gardant son caractère traditionnel, fixe et passif (Santamaria, 1923 ; Sara, 1980).

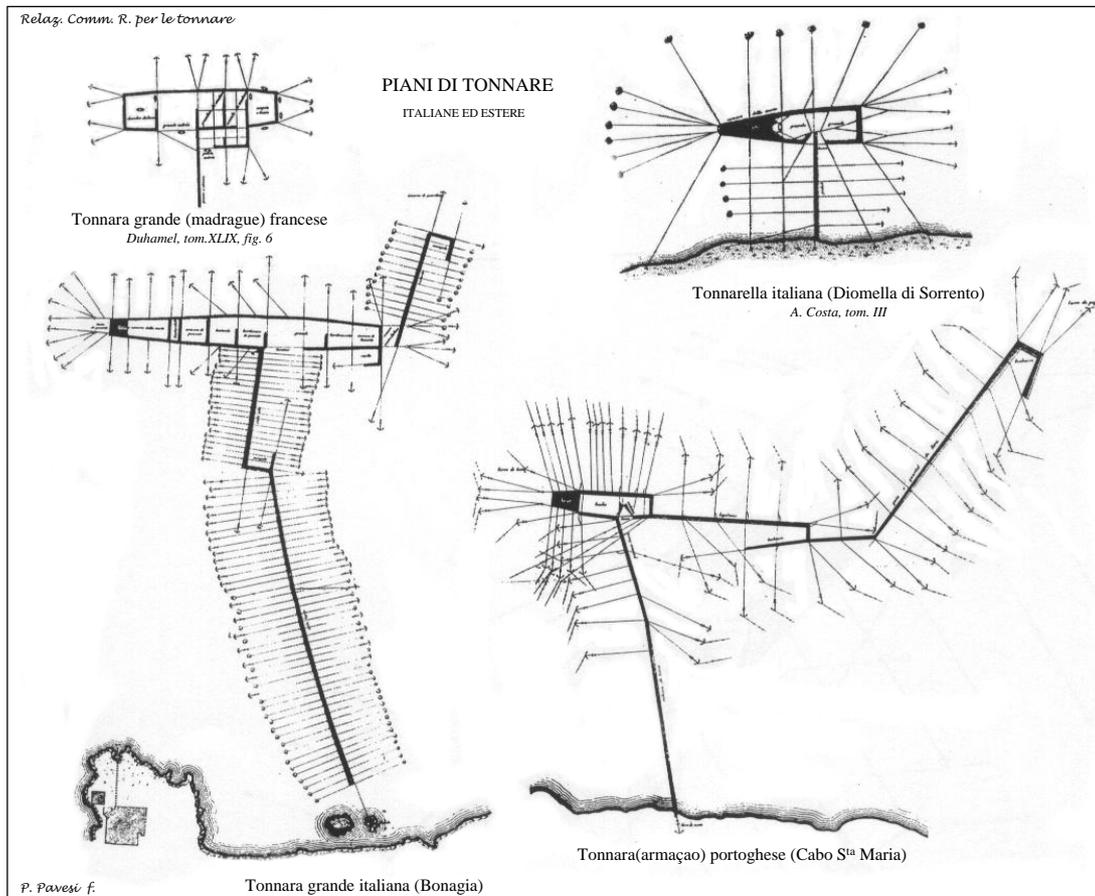


Fig. 1. 10 : Typologie de l'implantation des madragues dans diverses régions.

Source : Pavese (1889)

Les madragues sont calées en des lieux où des observations plusieurs fois séculaires ont montré le passage annuel des thons. Judicieusement choisis, ces sites n'ont pratiquement pas varié au cours des siècles (e.g. Sarmiento, 1757 ; Bragança, 1899 ; Parona, 1919 ; Buen, 1925 ; Sella, 1929a ; Anonyme, 1931 ; Rodriguez-Roda, 1964b ; Conte, 1985). La madrague est calée une fois par an et reste en place jusqu'à la fin de la campagne ; l'activité de pêche, calée sur les époques de passage des thons, commence vers les premiers jours d'avril, est abandonnée en juillet puis reprend, de manière plus anecdotique, d'août au début de l'automne. Les lieux et durées de calaison étant relativement stables, seul le nombre de madragues en activité a pu évoluer, en fonction du contexte socio-économique et des périodes plus ou moins fastes de la pêche au thon rouge. Les lourds investissements requis pour armer une madrague, ainsi que les redevances versées pour leur exploitation, avaient rapidement raison des madragues les moins bien placées (Doumenge, 1998). Le nombre de sites favorables ayant été occupés par des madragues sur le pourtour du bassin méditerranéen occidental et dans les approches atlantiques est de 250 environ, avec une concentration en divers endroits : Sicile (85), Sardaigne (25), côtes sud de l'Espagne (14), Algarve (22) mais aussi archipel toscan et Ligurie (10), Campanie et botte italienne (20), Espagne méditerranéenne (28), Provence et

Corse (20), Afrique du Nord (4, Pavesi, 1889). Les informations précises existant sur les madragues exploitées au XIX^{ème} et XX^{ème} siècles et celles, plus sporadiques, concernant la période historique montrent cependant que les principales madragues, capturant une grande part de la production totale dans les périodes bien documentées, ont toujours fonctionné (Sarmiento, 1757 ; Berthelot, 1869 ; Pavesi, 1889 ; Cancila, 1972 ; Sara, 1980 ; Doumenge, 1998). Il s'agit notamment des madragues siciliennes de Favignana, Formica, Bonagia, Marzamemi, Scopello, des sardes de Caloforte (Porto Paglia, Porto Scuso, Isola Piana) et de Saline, la calabre Pizzo, Sidi Daoud au cap Bon en Tunisie, les 5 andalouses Arroyo Hondo, Sancti Petri/Punta de la Isla, Torre Atalaya, Barbate, Zahara, les 2 portugaises Barril et Medo das Casas. Enfin, la madrague est restée pendant des siècles, et jusqu'au développement de la pêche moderne à la senne et à la palangre dans les années 60, le principal moyen de capture du thon rouge (Farrugio, 1981a ; Doumenge, 1998). Tous ces arguments suggèrent que la pêche du thon rouge en Méditerranée et sur le proche Atlantique ait peu évolué depuis le Moyen-âge jusqu'au début du XX^{ème} siècle et que l'effort de pêche exercé par les madragues est resté relativement constant.

Tab. 1. 3 : Noms locaux des diverses parties des madragues exploitées en Méditerranée et sur le proche Atlantique.

D'après Pavesi (1889), Dieuzeide et Novella (1953).

Partie de la madrague	Désignation					
	française	sicilienne	tunisienne	algérienne	espagnole	portugaise
Madrague (engin)	<i>madrague</i>	<i>tonnara</i>	<i>madrague</i>	<i>madrague</i>	<i>almadraba</i>	<i>armação</i>
Corps de la madrague	<i>corps</i>	<i>isola delle reti</i>	<i>corps</i>	<i>corps</i>	<i>buche</i>	<i>bucho</i>
Queue de la madrague	<i>queue</i>	<i>pedale</i>	<i>queue, barrage</i>	<i>queue</i>	<i>cola, radera</i>	<i>rabiera</i>
Queue supplémentaire	<i>retour</i>	<i>rivolto</i>		<i>rébot, queue sup.</i>	<i>reboto</i>	<i>cauda, quartel de fora</i>
1 ^{ère} chambre	<i>grandou</i>	<i>camera grande</i>	<i>1^{ère} chambre</i>	<i>1^{ère} chambre</i>	<i>foratigo, camara</i>	<i>câmara, endixes</i>
Autres chambres	<i>gardy, pichou</i>	<i>camera, bordonarello, bastardo, picciolo</i>	<i>2^{ème} chambre</i>		<i>camara, bordonal</i>	<i>endixes</i>
Chambre de mort	<i>fosse, corpou, mattance, muerte</i>	<i>corpo, camera della morte</i>	<i>chambre de mort</i>	<i>copo</i>	<i>copo, buche, camara de la muerte</i>	<i>corpo</i>
Entrée	<i>bouche</i>	<i>miroir, bocca</i>			<i>boca</i>	<i>boca</i>
Porte d'entrée	<i>porte, porto</i>	<i>foratico</i>	<i>porte</i>	<i>porte, puerta</i>	<i>puerta</i>	<i>porta</i>
Porte des chambres	<i>porte, porto</i>	<i>porta</i>	<i>porte</i>	<i>porte, puerta</i>	<i>puerta</i>	<i>porta</i>
Filet de fond de la chambre de mort	<i>corpus, plan, gravichelli, corpou</i>	<i>corpo, culica, leva</i>	<i>corpo</i>	<i>ciel, copo</i>	<i>red de sacada, matador</i>	
Ensemble (engin et usine)	<i>madrague</i>	<i>tonnara</i>	<i>thonaire</i>	<i>madrague</i>	<i>almadraba</i>	<i>armação</i>
Filet de manœuvre	<i>ingaro</i>				<i>red suelta</i>	
Capture	<i>mattance</i>	<i>mattanza</i>	<i>mattance</i>	<i>mattance</i>	<i>matanza</i>	<i>matanza</i>

Encadré 3 : La pêche à la madrague en Sicile

La Sicile est l'un des hauts lieux de la pêche au thon en Méditerranée. L'installation des madragues y est comme partout le fruit de l'observation plusieurs fois séculaire du comportement du poisson. Il apparaît au printemps sur la côte nord pour s'en éloigner au début de l'été ; sa présence est alors signalée sur la côte sud de l'île jusqu'au début de l'automne.

Les origines de la madrague en Sicile ne peuvent être retracées précisément. Les premières traces de la présence de thons se devinent dans les dessins de l'époque néolithique retrouvés dans la grotte de Genovese, dans l'île de Maretimo (Egados). Des écrits d'Eschyle, 5 siècles avant JC, comparent le massacre de Salamine à une *mattanza*, ce qui laisse imaginer qu'il s'agissait déjà d'une pêche massive, requérant un système de concentration semblable, au moins dans son principe, à celui des madragues (Fodera, 1961). Les progrès et déclin de la pêche au thon au gré des invasions successives sont décrits par Noël de La Morinière (1815) : le développement connu sous l'emprise de la Grèce, se maintint sous la période romaine. La pêche au thon déclina lors de l'invasion sarrasine puis reprit au XI^{ème} siècle, après que Roger le Normand eut chassé les Arabes de la Sicile. C'est alors qu'apparaît la notion de *tonnara*, la madrague sicilienne (Bresc, 1984). Berthelot (1869) mentionne notamment qu' « en 1210, Guillaume II roi de Sicile accorda diverses redevances sur la *tonnara* de Palerme à l'archevêque de cette ville ». Cependant, il faut attendre le XVI^{ème} siècle pour trouver des descriptions précises permettant d'affirmer avec certitude qu'il s'agit d'installations semblables à celles qui perdureront jusqu'à nos jours.

Les madragues siciliennes ont fait l'objet de plusieurs documents historiques qui recensent une centaine de madragues (*tonnarella* et *tonnara*, Fig. 1. 11) entre le XI^{ème} et le XX^{ème} siècle et fournissent des informations sur leurs caractéristiques (dimensions, nature des installations, lieux de calaison...), leur histoire et leur production (Pavesi, 1889 ; Parona, 1919 ; Cancila, 1972). A la fin des XI^{ème} et XII^{ème} siècles, on peut ainsi localiser avec certitude 6 madragues ; il y en aura au moins 18 au XIII^{ème} siècle. Un véritable épanouissement aux XIV^{ème} et XV^{ème} siècles portera le nombre des installations jusqu'à une quarantaine et ce nombre restera ensuite à peu près constant jusqu'à la fin du XVIII^{ème} siècle (Doumenge, 1998). La fin du XVIII^{ème} siècle et le début du XIX^{ème} sont marqués par l'abandon des madragues les moins bien placées. Ces éléments montrent que toutes n'ont pas fonctionné en continu mais que les principales installations, dont le bien fondé du lieu de calaison a permis des productions toujours parmi les plus élevées, ont perduré au cours des siècles. Il s'agit notamment des madragues de Favignana, Formica (toutes deux propriétés depuis 1637 et pendant 237 ans de la famille Pallavicini), Bonagia, Secco, Scopello, Castellamare, Magazzinazzi, Solanto, San Giorgio, Oliveri, Marzamemi, Capo Passero. Les matériels et les opérations de pêche des madragues siciliennes de course sont précisément décrits par Fodera (1961).

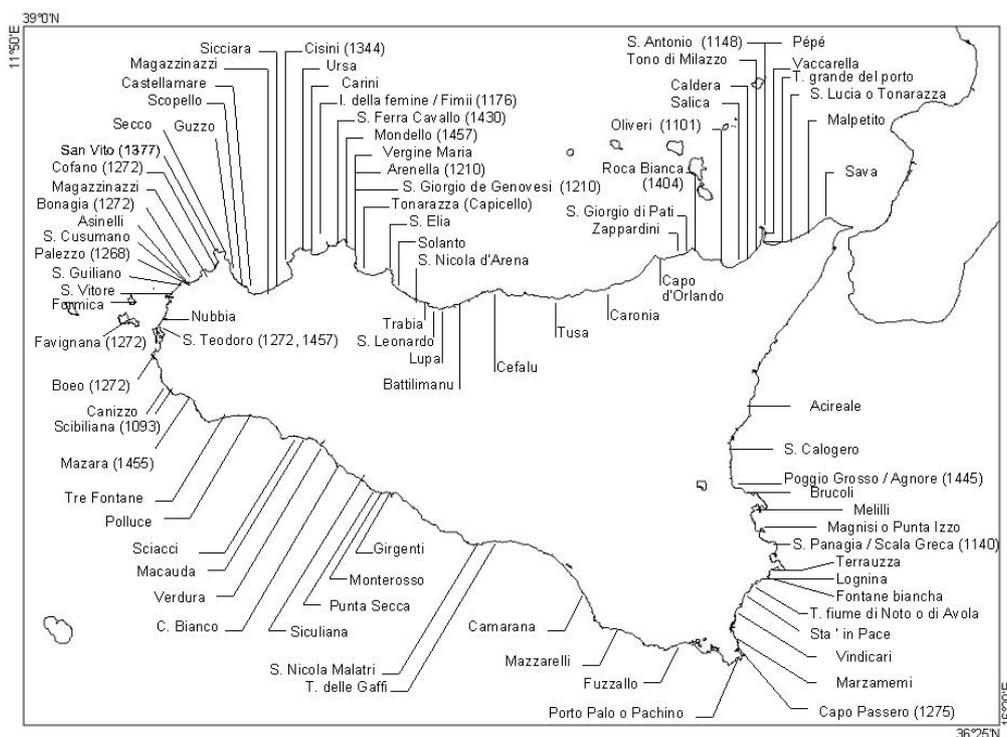


Fig. 1. 11 : Localisation des madragues siciliennes, et date de première citation dans un texte. D'après Pavesi (1889), Anonyme (1931), Fodera (1961), Bresc (1981 ; 1986). T. pour *Tonnara*, I. pour *Isola*, S. pour *San*

Encadré 4 : La pêche à la madrague en Sardaigne

Plus démunie en entrepreneurs et en capital que la Sicile, la Sardaigne fait l'objet d'un développement de la pêche à la madrague plus tardif, au début du XV^{ème} siècle (Conte, 1985). Elle prend son essor avec les investissements des entrepreneurs génois, et notamment Antonio Vivaldi qui achète en 1654 au roi Philippe IV d'Espagne les 6 madragues de Porto Paglia, Porto Scuso, Saline, Santa Catarina, Vignola, Cala Agostina (Doneddu, 1983).

Un total de 27 madragues est recensé en Sardaigne (Fig. 1. 12), dont 5 ont été actives sur plusieurs siècles : Saline, dans le golfe d'Asinara au nord de l'île, Porto Paglia, Porto Scuso et Isola Piana au sud ouest de l'île, ainsi que, dans une moindre mesure, Flumentorgiu (Pavesi, 1889 ; Parona, 1919 ; Anonyme, 1931 ; Conte, 1985). Leur histoire et des éléments sur leurs caractéristiques et leurs productions sont en particulier décrits dans les documents de Rubino (1995) pour Saline, Conte (1985) pour Porto Paglia, Porto Scuso et Isola Piana, ainsi que dans le rapport de Pavesi (1889).

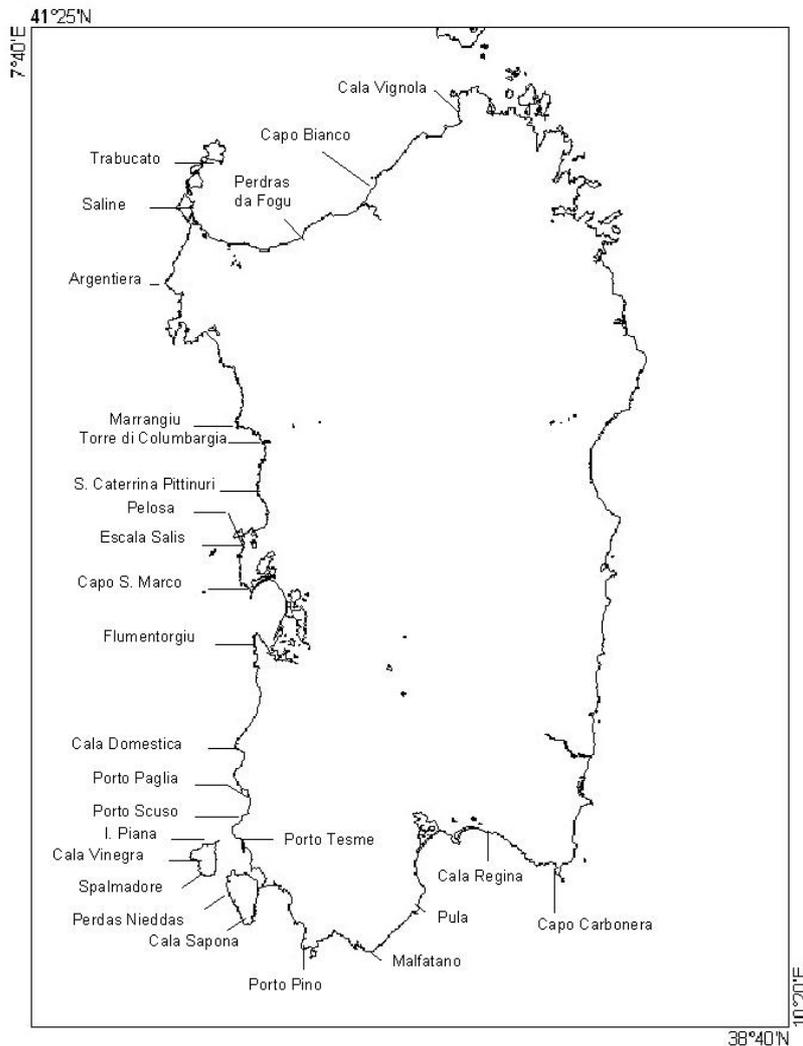


Fig. 1. 12 : Localisation des madragues sardes.
D'après Angotsi (1901), Pavesi (1889), Conte (1985), Anonyme (1931).
I. pour *Isola*, S. pour *San / Santa*

Encadré 5 : La pêche à la madrague en Tunisie

La pêche au thon rouge sur les côtes tunisiennes est pratiquée depuis la plus haute antiquité. Introduite par les Phéniciens, elle fournit le commerce de Carthage jusqu'aux dernières années de l'empire romain. Ayant perdu de son activité sous la domination arabe, elle connaît une renaissance à partir du XIX^{ème} siècle lorsque les Siciliens développent la pêche à la madrague. Pendant près d'un siècle et demi, la pêche au thon en Tunisie demeure alors une industrie italienne, pratiquée par des équipages siciliens pour un marché presque exclusivement péninsulaire (Ganiage, 1960).

La première concession, dans la région de Monastir, est accordée au génois Bonfiglio entre 1817 et 1820. En 1826, le roi Hussein Bey concède le droit de pêcher le thon sur les côtes du cap Bon à un autre génois, Joseph Raffo. Trois madragues sont alors exploitées : Sidi Daoud (Fig. 1. 13, Fig. 1. 14, active depuis au moins 1823, Buen, 1927), Ras Zebib (abandonnée vers 1850), et Monastir (abandonnée vers 1854, Pavesi, 1889). En 1901, les descendants de Raffo cèdent la concession au génois Parodi, déjà propriétaire de plusieurs madragues en Sicile et au Portugal, qui la gardera jusqu'en 1943 (De Fages et Ponzevera, 1908 ; Ganiage, 1960). Le XX^{ème} siècle voit le nombre de madragues exploitées se multiplier sur les côtes tunisiennes : Bordj Khadidja, (1901, Fig. 1. 14), Ras el Ahmar (1905), El Auaria (1907), Ras el Mhr (1906), Ras Salakta-Menzel Temine-Mehdia (1906), Ras Marsa (1907), ainsi que Monastir et Kuriat, qui fonctionnaient alternativement, une année sur deux (De Fages et Ponzevera, 1908).

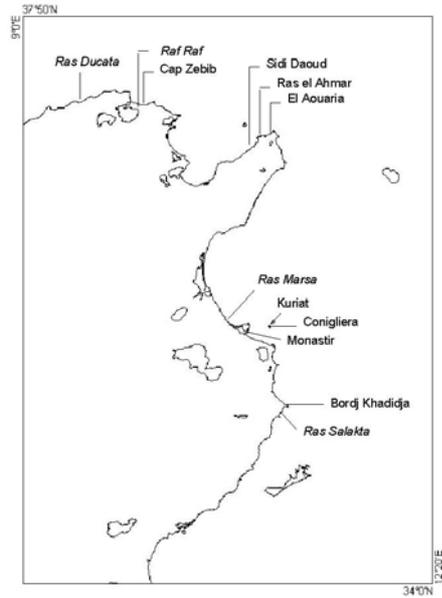


Fig. 1. 13 : Localisation des madragues tunisiennes (en italique : essais de madragues). D'après Plusquellec (1956).

Couramment appelée thonnaires (dérivant de la *tonnara* sicilienne), les madragues tunisiennes sont construites selon le principe déjà largement éprouvé en Sicile et Sardaigne. Ce sont essentiellement des madragues de courses, fonctionnant du mois de mai à début juillet.

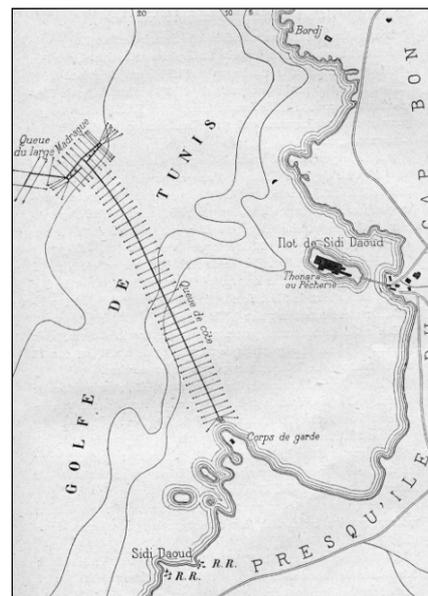
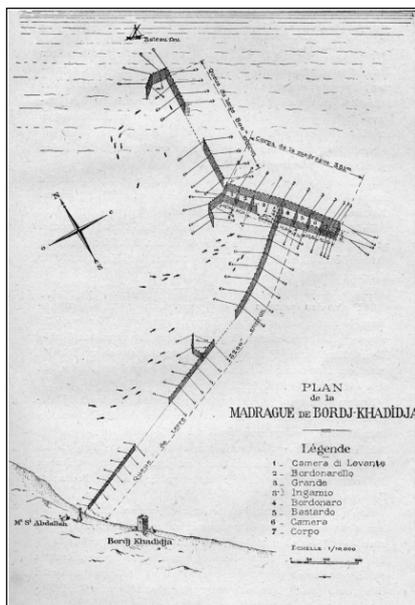


Fig. 1. 14 : Plan des madragues tunisiennes de Bordj Khadidja (à gauche) et de Sidi Daoud (à droite), d'après Gruvel (1926).

Encadré 6 : La pêche à la madrague en Espagne

La pêche du thon rouge sur les côtes hispaniques était déjà pratiquée par les Phéniciens il y a plus de 3000 ans (Rodríguez-Roda, 1980b) et s'est poursuivie sous la domination romaine et arabe (Berthelot, 1869 ; Sole, 1965). Elle s'organise au Moyen-âge, sous la tutelle de grandes familles nobles. En 1294, un privilège du roi don Sancho el Bravo accorde l'exclusivité de la pêche au thon dans le sud atlantique de l'Espagne à Alonso Perez de Guzman el Bueno (Sole, 1965). En 1376, Henri II étend ce privilège à « l'établissement de madragues depuis le Guadiana jusqu'à la côte du royaume de Grenade conquise ou à conquérir » à l'ancienne maison des Niebla, les descendants de Guzman. La concession passe ensuite par héritage aux ducs d'Albe et de Medina Sidonia, dont la famille aura ainsi bénéficié d'une jouissance exclusive de la pêche au thon en Andalousie pendant plus de 5 siècles (1294-1811, Berthelot, 1869).

Plusieurs techniques de pêche ont coexistées en Andalousie :

- la senne de plage, immense filet avec lequel on embrasse une vaste étendue de mer au passage des thons avant de le haler à terre, à la force des bras, pour rabattre le poisson sur la plage (e.g. Carbonero),
 - la cerne, ou *almadraba de vista* (qui peut être traduite par madrague de guet) comme à Conil (dont Berthelot (1869) dresse un très vivant descriptif),
 - les *almadrabas de monteleva*, filets fixes, fonctionnant selon le principe des madragues, mais qui se montent et s'enlèvent au besoin (e.g. madrague de Scombrera, près de Carthagène),
 - et enfin les *almadrabas de buche*, véritables madragues sédentaires, semblables à celles employées en Sicile, qui ont vocation à durer toute une saison de pêche (e.g. Terron). Parmi les *almadrabas de buche*, certaines sont ouvertes vers l'ouest, elles sont dites de passage et capturent le thon lors de son entrée dans le bassin méditerranéen, d'autres sont ouvertes vers l'est et sont dites de retour.
- Cette dernière technique se généralise au début du XIX^{ème} siècle, sous l'influence des négociants génois et pour remédier aux problèmes de main d'œuvre, dont Cervantes fit écho des mœurs suspectes et agités.

Le nombre des engins en activité a légèrement varié au cours des siècles. Sañez-Reguart (1791-1795) comptabilise 13 à 14 madragues à poste fixe en 1791 depuis le golfe de Rosas jusqu'à la frontière du Portugal : 3 aux îles Baléares et 10 sur la côte continentale (dont Benidorme, Tabarca, San Juan de los Terreros, Agua Amarga, Terron ou Tuta, Fig. 1. 15). En 1804, elles sont 17, dont 7 en Andalousie, toujours sous le contrôle du duc de Medina Sidonia (Berthelot, 1869). Vers 1815, l'aristocratie abandonne ses droits et la gestion des madragues est confiée à des corporations de pêcheurs (Berthelot, 1869 ; Pavese, 1889). Leur nombre a alors pu atteindre 17 sur la côte atlantique, 27 sur la côte méditerranéenne. Mais nombre d'entre elles, mal placées, sont rapidement abandonnées. Conil, jadis si célèbre, reste 10 ans inexploitées (1822-1832). En 1889, Pavese compte 15 madragues, 9 dans le golfe de Cadix et 7 en Méditerranée. Barbate, Zahara et Sancti Petri constituaient alors des madragues de premier ordre, venaient ensuite Conil et Torre Atalaja. Au début du XX^{ème} siècle, les madragues sont privatisées et, de 1929 à 1960, leur exploitation est dominée par la société "Consortio Nacional Almadradero, S.A.". Franco restaure la politique des droits exclusifs sur les madragues dans les années 30-40, ce qui a pour conséquence de réduire finalement le nombre des madragues à une dizaine.

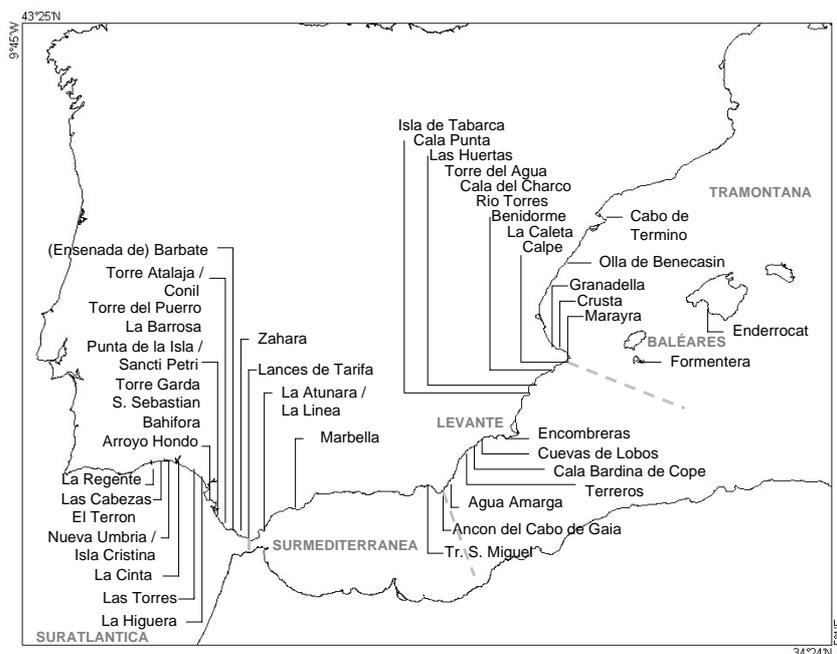


Fig. 1. 15 : Localisation des madragues espagnoles.
D'après Pavese (1889), Buen (1925), Belloc (1961), Rodríguez-Roda (1964b).

Encadré 7: La pêche à la madrague au Portugal

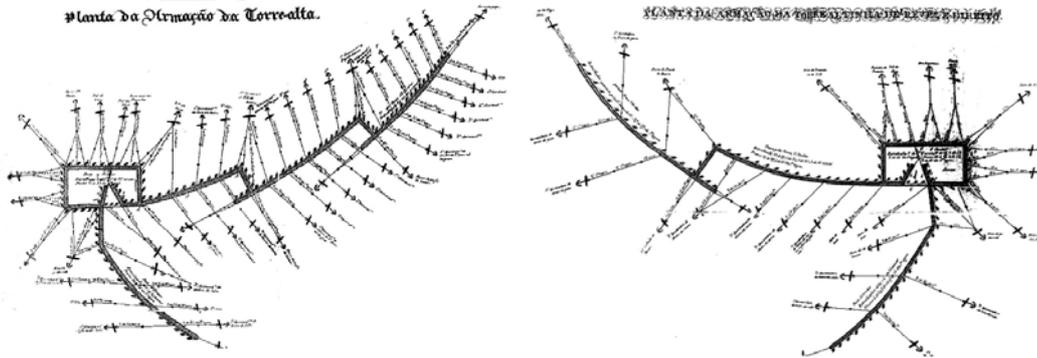


Fig. 1. 16 : Plan des madragues portugaises de Torre Alta (à gauche) et de Torre Althina (à droite).

Selon Neuparth (1925), « la pêche du thon rouge [se pratique] sur les côtes de l'Algarve depuis des temps immémoriaux et, à ce qu'il paraît, toujours au moyen de madragues ». Le thon rouge a cependant été pêché avec des techniques plus primitives au temps des colonies phéniciennes et carthagoises, puis sous la domination arabe (Pessoa, 1997). La pêche à la madrague proprement dite se développe en Algarve dès le XV^{ème} siècle, avec les améliorations techniques apportées de Sicile par les Génois et prospère jusqu'au XVII^{ème} siècle grâce à l'exportation de thons salés (Silva Lopez, 1841 ; Pavese, 1889 ; Pessoa, 1997). Le XVIII^{ème} siècle est marqué par plusieurs crises économiques et sociales successives, et les captures qui diminuent à la fin du siècle signent le déclin de la pêcherie, qui passe de « 8 à 9 madragues à 1 ou 2 en 1815 » (Pavese, 1889). Au XIX^{ème} siècle, l'abolition des privilèges et l'attribution de licences de pêche changent le contexte de l'exploitation et donnent un nouvel essor à la pêcherie. En 1884, 13 madragues sont actives : Torre Althina (Fig. 1. 16), Cabo Carvoeiro, Pedro de Galé, Oira, Vallongo, Forte Novo, Ramalhete, Cabo Santa Maria, Bias, Senhora do Livramento, Barril, Medo das Casas et Abobora (Pavese, 1889, Fig. 1. 17). Nos recherches en identifient 21 sur la période 1900-1933, Vilela (1960) indique qu'elles sont 5 sur la période 1933-1960.

Les lieux et techniques de pêche sont décrits par Silva Lopez (1841).

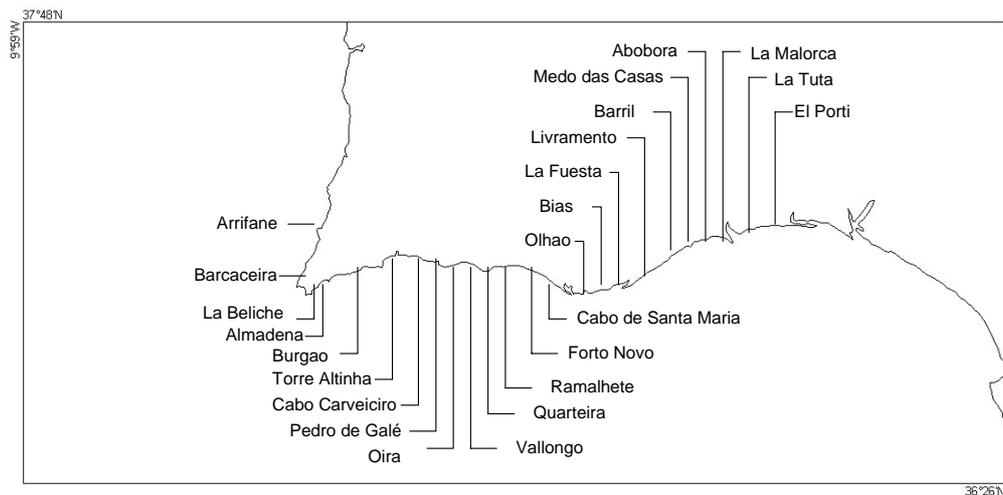


Fig. 1. 17 : Localisation des madragues portugaises au XIX^{ème} siècle. D'après Pavese (1889) .

Encadré 8 : Le déroulement d'une pêche à la madrague

Un récit historique (Aubertin, 1909) pour narrer une pêche à la madrague en 2002, à Barbate...



« Les thons, côtoyant le rivage, ont rencontré la queue de la madrague et pénétré dans la première enceinte de filets, puis dans la seconde, sans chercher à revenir en arrière, leur instinct les poussant toujours en avant... »

« ... Quand tout le banc a pénétré, les vigies donnent le signal. Les barques attachées à l'exploitation arrivent avec leur équipage. Les filets transversaux sont successivement disjointés du filet longitudinal et remontés à bord de barques, poussant les thons toujours plus en avant... »



« ... Quand ils sont tous introduits dans la chambre de la mort, la cloison est fermée et le capitaine donne le signal de la "mattanza" ... »



« ... Les bateaux présents forment un carré autour de cette chambre ; les hommes relèvent, au moyen de câbles fixés à l'avance, la partie horizontale du filet de fond qu'ils ramènent à la surface... »

Encadré 8 : Le déroulement d'une pêche à la madrague

- suite -



« ... les thons sont alors harponnés

et embarqués au fur et à mesure,

c'est la capture finale... »



« ...Quand il n'en reste plus, le filet est largué et retombe au fond. La cloison est réouverte et refermée à nouveau quand une nouvelle série de condamnés a pénétré dans le compartiment de matance. La manœuvre se répète jusqu'à ce que le banc primitif soit épuisé. »



III. Séries historiques de captures

La pêche à la madrague s'organise dans le bassin méditerranéen au Moyen-âge, alors même que les sociétés développent leur système administratif. La perception de la dîme ecclésiastique et des impôts royaux s'organise et impose un enregistrement fidèle des recettes et des enquêtes sur les lieux de production. C'est ainsi qu'est tenue, et manuscrite, une comptabilité des prises et des produits élaborés directement sur les lieux de pêche des madragues. Malgré quelques difficultés d'interprétation et certaines lacunes, ces registres vont constituer une source de données unique pour retracer l'évolution de la pêche au thon rouge de la fin du XVI^{ème} au milieu du XX^{ème} siècle.

Ce chapitre présente dans un premier temps la méthode de recensement et les résultats de la collecte des données historiques. Il détaille ensuite la méthodologie mise en place pour constituer une base de données homogène, sur laquelle pourront se fonder les analyses statistiques des parties suivantes. Les séries retenues sont alors présentées et la structure particulière de la base de données discutée. Les séries de captures sont finalement utilisées pour estimer un niveau de production historique des madragues en Méditerranée occidentale et sur le proche Atlantique.

III.1. Collecte des données

Le recensement et la collecte des données de captures de thon rouge par les madragues ont été conduits en cherchant à identifier puis explorer toutes les sources susceptibles de receler ces données historiques.

La première source de données potentielle est la littérature. S'agissant de collecter des documents anciens, la recherche bibliographique a été poursuivie dans les grandes bibliothèques françaises (Institut Océanographique, bibliothèque centrale du Museum National d'Histoire Naturelle, Bibliothèque Nationale de France). Des contacts personnels ont également été sollicités pour leur bibliothèque particulière. Ces recherches bibliographiques, initiées par F. Doumenge, H. Farrugio et A. Fonteneau, ont permis de rassembler une littérature historique avec notamment, les ouvrages du Père Sarmiento (1757, présentant des séries de production des sennes de plages puis des madragues espagnoles depuis 1525), de Cancila (1972, avec les plus longues séries siciliennes) et de Bragança (1899, production de l'Algarve à la fin du XIX^{ème} siècle).

La seconde source de données est constituée par des documents d'archives présentant les comptes et productions des madragues, enregistrés à l'époque par leurs propriétaires et conservés par leurs descendants ou par différentes administrations. Des recherches ont ainsi été menées dans les départements d'archives appropriés français et espagnols (archives régionales, départementales et/ou municipales françaises, musées d'histoire locale des départements provençaux (Bouches du Rhône, Var, Alpes Maritimes), archives générales de la marine espagnole). Cependant, le recueil de données le plus productif a été réalisé au cours de trois missions d'inventaires d'archives personnelles, effectuées dans le cadre du programme européen STROMBOLI. Au cours de la première mission (15-18 février 2000), au laboratoire de Fano (Italie), le Pr. Piccinetti nous a donné accès aux archives collectées au début du siècle par le Pr. Sella, puis par le Pr. Scaccini. Tout au long de leurs carrières, ces derniers se sont attachés à la collecte des données de madragues méditerranéennes, notamment sardes et siciliennes. Au vu des centaines de lettres écrites aux propriétaires de madragues comme aux administrations locales, nous pouvons sans trop de risques affirmer que toutes les données de madragues italiennes encore existantes au XX^{ème} siècle ont été collectées par ces auteurs et sont donc disponibles pour notre étude. La deuxième mission (6-13 mars 2000), au siège de l'ICCAT à Madrid, a été réalisée en collaboration avec l'Instituto Español de Oceanografía (IEO). Elle a permis de réaliser un inventaire des archives du Pr. Rodriguez-Roda et de collecter plusieurs séries de captures des madragues espagnoles et marocaines. Enfin, la visite des archives des ducs de Medina Sidonia, anciens propriétaires des madragues d'Andalousie (14-17 mai 2001, à Sanlúcar de Barrameda, en collaboration avec l'IEO), a permis de retrouver les données publiées par Sarmiento (1757), de les valider et de les compléter.

Ce recensement a permis de rassembler plus de 110 séries de production provenant du pourtour du bassin méditerranéen (Espagne (1), Maroc (5), Tunisie (9), Sicile (28), Sardaigne (9), Italie continentale (8), Croatie (3) et Libye (11)) et des côtes atlantiques proches du détroit de Gibraltar (Portugal (21), Espagne (14), Maroc (5), Tab. 1. 4, Tab. 1. 6). Par ailleurs, 5 séries provenant des côtes françaises (Var et Alpes Maritimes), 4 des côtes algériennes et 4 des côtes méditerranéennes espagnoles cumulent les productions par quartier maritime (Tab. 1. 5). Selon les sites et les périodes, ces séries de production des madragues sont exprimées en nombre d'individus (ventilé ou non en catégories de taille), en poids ou encore, en nombre de barils⁽¹⁾.

⁽¹⁾ D'après Pavese (1889), un baril représente environ 60 kg de thon frais, soit 33 kg de poisson cuit.

Tab. 1. 4 : Séries individuelles de captures de thon rouge par des sennes de plages.

Les colonnes représentent la région, le nom de la senne de plage et la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu) et la source des données (** archivers du duché de Medina Sidonia).

Région	Senne de plage	Période	N obs	Unité	Source
Espagne	Carboneras	1743-1766	24	N	Medina Sidonia***
Espagne	Conil	1503-1809	221	N	Medina Sidonia***
Espagne	Conilejo	1525-1722	32	N	Medina Sidonia***
Espagne	Rio del terron	1741-1768	28	N	Medina Sidonia***
Espagne	(Lances de) Tarifa	1743-1786	27	N	Medina Sidonia***
Espagne	Zahara	1503-1804	184	N	Medina Sidonia***

Tab. 1. 5 : Séries agrégées de captures de thon rouge par les madraques.

Les colonnes représentent la région, le quartier maritime et la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, T = poids en tonnes) et la source des données (* archivers personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda).

Région	Quartier maritime	Période	N obs	Unité	Source
Algérie	Alger	1884-1934	47	N ; T	Scaccini & Sella*, Heldt (1937)
Algérie	Bone	1894-1918	8	T	Scaccini & Sella*
Algérie	Oran	1881-1934	52	N ; T	Scaccini & Sella*, Heldt (1937)
Algérie	Philippeville	1884-1934	46	N ; T	Scaccini & Sella*, Heldt (1937)
France	Cannes	1887-1912	24	T	Scaccini & Sella*
France	La Seyne	1876-1912	16	T	Scaccini & Sella*, Pavesi (1889)
France	Nice	1898-1911	12	T	Scaccini & Sella*
France	Saint-Tropez	1876-1912	37	T	Scaccini & Sella*
France	Toulon	1875-1912	37	T	Scaccini & Sella*
Espagne	Baléares	1956-1975	20	T	San Feliu (1978)
Espagne	Cadix	1929-1958	30	N	Rodriguez-Roda**
Espagne	Huelva	1928-1958	31	N	Rodriguez-Roda**
Espagne	Levante	1956-1975	20	T	San Feliu (1978)
Espagne	Sud Atlantique	1929-1975	46	N ; T	Lozano Cabo (1958), San Feliu (1978)

Tab. 1. 5 : Séries agrégées de captures de thon rouge par les madragues (suite).

Les colonnes représentent la région, le quartier maritime, le quartier maritime et la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda).

Région	Quartier maritime	Période	N obs	Unité	Source
Espagne	Sud Méditerranée	1956-1975	20	T	San Feliu (1978)
Espagne	Tramontana	1956-1975	20	T	San Feliu (1978)
Italie continentale	Brindisi	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Cagliari	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Castellamare di Stabia	1885-1914	29	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	La Maddalena	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Libri	1885-1914	25	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Messina	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Napoli	1885-1927	34	N ; T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Palermo	1885-1921	37	N ; T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Pizzo	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Portoferraio	1885-1914	29	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Porto Empedocle	1911-1914	4	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Siracuse	1885-1914	30	T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Trapani	1885-1921	37	N ; T	Scaccini & Sella*
Lybie	Lybie	1925-1929 ; 1945-1982	43	N ; T	Anonyme (1931), Zupanovic <i>et al.</i> (1983)
Maroc	Maroc	1927-1963	36	N	Hamre <i>et al.</i> (1966)
Portugal	Algarve	1797-1816	20	N	Neuparth (1925)
Portugal	Algarve	1896-1970	75	N	Neuparth (1925), Vilela (1960), Hamre <i>et al.</i> (1966, 1968, 1971), Aloncle <i>et al.</i> (1974)
Portugal	Faro	1896-1930	35	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Portimao	1896-1919	24	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Lagos	1896-1926	31	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Tavira	1896-1937	42	N	Scaccini & Sella*
Tunisie	Tunisie	1898-1935 ; 1962-1979	54	N ; T	Roule (1924), Farrugio (1981a), Anonyme (1932, 1933, 1934)

Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues.

Les colonnes représentent la région, le nom de la madrague, le nom de la madrague, la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, B = nombre de barils, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda, *** archives du duché de Medina Sidonia).

Région	Madrague	Période	N obs	Unité	Source
Croatie	Lukuvo Otočko	1892-1940	49	N ; T	Scaccini & Sella*
Croatie	Portore	1908-1926	12	N	Scaccini & Sella*
Croatie	San Giacomo	1908-1930	13	N	Scaccini & Sella*
Espagne	Arroyo Hondo	1914-1934	20	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	(Ensenada de) Barbate	1884-1980	69	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	El Terron	1914-1920	7	N	Buen (1925)
Espagne	Isla Cristina = Nueva Umbria	1916-1965	37	N	Rodriguez-Roda**
Espagne	La Atunara = La linea	1952-1979	27	N	Rodriguez-Roda**
Espagne	La Higuera	1911-1928	18	N	Buen (1925), Scaccini & Sella*
Espagne	Las Cabezas	1920-1928	9	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	Las Torres	1902-1954	34	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	Nuestra Señora de la Cinta	1914-1928	13	N	Buen (1925), Scaccini & Sella*
Portugal	Olhos de agua	1896-1919	24	N	Scaccini & Sella*
Espagne	Reine Regente	1914-1940	26	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	Sancti Petri = Punta de la Isla	1884-1971	57	N	Buen (1925), Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	(Lances de) Tarifa	1923-1971	47	N	Rodriguez-Roda**
Espagne	Torre Atalaja (anciennement Conil)	1914-1934	20	N	Scaccini & Sella*, Rodriguez-Roda**
Espagne	Torre del puerco	1914-1925	6	N	Buen (1925), Scaccini & Sella*
Espagne	Zahara	1804-1980	43	N	Medina Sidonia***, Pavesi (1889), Scaccini & Sella*
France	Gignac	1882-1883	2	N	Pavesi (1889)
France	Niolon	1882-1883	2	N	Pavesi (1889)
France	Canoubiers	1882-1884	3	N	Pavesi (1889)
Italie continentale	Bagno	1896-1932	23	N ; T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Bivona	1879-1930	34	N ; T	Pavesi (1889), Scaccini & Sella*, Anonyme (1931)
Italie continentale	Enfola	1884-1932	47	N ; T	Scaccini & Sella*

Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues (suite).

Les colonnes représentent la région, le nom de la madrague, la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, B = nombre de barils, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda, *** archives du duché de Medina Sidonia).

Région	Madrague	Période	N obs	Unité	Source
Italie continentale	Gallipoli (Brundisi)	1885-1929	44	T	Scaccini & Sella*, Anonyme (1931)
Italie continentale	Mezzapiara	1898-1932	24	N ; T	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Pizzo	1876-1932	52	N	Scaccini & Sella*
Italie continentale	Torre del Pizzo	1928-1929 ; 1955-1957	5	T	Anonyme (1931), Belloc (1961)
Italie continentale	Torre San Isidore	1899-1930	28	T	Scaccini & Sella*
Libye	Bu Fatma	1927-1931	4	N	Heldt (1932)
Libye	Dzeira	1920-1931	9	N	Heldt (1932), Scaccini & Sella*
Libye	Gargaresch	1919-1929	11	N	Heldt (1930), Scaccini & Sella*
Libye	Gebbana Sidi Mahfud	1921-1929	8	N	Heldt (1932)
Libye	Marsa Sabratha	1915-1931	11	N	Heldt (1932), Scaccini & Sella*
Libye	Marsa Zwaga	1921-1935	10	N	Heldt (1932, 1938)
Libye	Mongar El Kebir	1924-1931	8	N	Scaccini & Sella*
Libye	Ras Lahmar	1919-1929	11	N	Heldt (1932), Scaccini & Sella*
Libye	Sidi Abdul Gelil	1920-1930	10	N	Heldt (1932), Scaccini & Sella*
Libye	Sidishah Laman	1923-1935	10	N	Heldt (1932, 1938)
Libye	Zliten	1925-1935	10	N	Heldt (1938), Scaccini & Sella*
Maroc	Aguas de Ceuta	1916-1922 ; 1940-1973	41	N	Buen (1925), Rodriguez-Roda**
Maroc	Cabo Negro	1957-1959	3	T	Hamre <i>et al.</i> (1966)
Maroc	Cap Spartel	1957-1973	11	N ; T	Rodriguez-Roda**, Hamre <i>et al.</i> (1966)
Maroc	Cenizosos	1940-1972	21	N	Rodriguez-Roda**
Maroc	El Cascajal	1962-1963	2	N	Rodriguez-Roda**
Maroc	Garifa	1927-1973	36	N	Rodriguez-Roda**
Maroc	Kenitra	1956-1959	4	T	Hamre <i>et al.</i> (1966)
Maroc	Numéro 1	1962-1966	4	N	Rodriguez-Roda**
Maroc	Principe	1940-1972	32	N	Rodriguez-Roda**
Maroc	Punta Negra	1936-1971	34	N	Rodriguez-Roda**

Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues (suite).

Les colonnes représentent la région, le nom de la madrague, la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, B = nombre de barils, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda, *** archives du duché de Medina Sidonia).

Région	Madrague	Période	N obs	Unité	Source
Portugal	Abobora	1885-1933	49	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Barril	1867-1933	38	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Bias	1896-1921	21	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Cabeço	1897-1898	2	N	Bragança (1899)
Portugal	Cabo Santa Maria	1896-1933	38	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Forto Novo	1896-1920	25	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Galé	1896-1902	7	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Livramento	1876-1933	58	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Medo das Casas	1797-1933	112	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Pharrol	1898-1914	13	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Ramalhete	1896-1930	35	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Senhora da Rocha	1897-1919	23	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Sol da Ponta	1897-1911	15	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Sul da Ponta da Baleeira	1902-1926	25	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Sul do Cabo	1896-1917	21	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Torre Alta	1896-1904	9	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Torre Alinha	1896-1909	14	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Torre de Barra	1897-1917	21	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Vau	1896-1899	3	N	Scaccini & Sella*
Portugal	Zuvial	1897-1898	2	N	Bragança (1899)
Sardaigne	Cala Agostina	1618-1631	14	B	Scaccini & Sella*
Sardaigne	Flummentorgiu	1787 ; 1793 ; 1806 ; 1829-1849 ; 1863-1914 ; 1929-1933	69	N	Heldt (1930, 1931, 1932, 1937), Pavese (1889), Scaccini & Sella*
Sardaigne	Isola Piana	1787 ; 1793 ; 1808 ; 1825-1930	155	N	Pavese (1889), Conte (1985)

Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues (suite).

Les colonnes représentent la région, le nom de la madrague, la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, B = nombre de barils, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda, *** archives du duché de Medina Sidonia).

Région	Madrague	Période	N obs	Unité	Source
Sardaigne	Porto Paglia	1629-1638	9	B	Rubino (1995)
	Porto Paglia	1787 ; 1825-1973	143	N	Pavesi (1889), Conte (1985)
Sardaigne	Porto Scuso	1629-1638	9	B	Rubino (1995)
	Porto Scuso	1787 ; 1793 ; 1825-1976	153	N	Pavesi (1889), Conte (1985)
Sardaigne	Saline	1618-1629	10	B	Rubino (1995)
	Saline	1788 ; 1829-1964	116	N	Pavesi (1889), Scaccini & Sella*, Rubino (1995)
Sicile	Formica	1599-1818; 1840-1855	206	B, N	Candila (1972), Doumenge (<i>com. pers.</i>)
Sicile	Formica	1878-1978	96	N	Scaccini & Sella*, Doumenge (<i>com. pers.</i>)
Sicile	Favignana	1599-1817 ; 1842-1855 ; 1859 ; 1865	202	B, N	Candila (1972), Doumenge (<i>com. pers.</i>)
Sicile	Favignana	1878-1997	115	N	Scaccini & Sella*, Doumenge (<i>com. pers.</i>)
Sicile	San Giuliano	1600-1604 ; 1657-1666 ; 1672 ; 1701-1806	100	B, N	Candila (1972),
Sicile	San Giuliano	1885-1934	33	N ; T	Scaccini & Sella*, Heldt (1931,1937)
Sicile	Asinelli	1904-1929	26	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	San Cusumano	1896-1964	63	N ; T	Sara (1980), Scaccini et Paccagnella (1965a), Hamre <i>et al.</i> (1966)
Sicile	Bonagia	1599-1823	170	B, N	Candila (1972)
Sicile	Bonagia	1879-1934	56	N	Scaccini & Sella*, Pavesi (1899), Heldt (1930, 1931, 1932)
Sicile	Bonagia	1950-1964	15	N	Hamre <i>et al.</i> (1966)
Sicile	Secco	1872-1933 ; 1955-1964	68	N ; T	Pavesi (1899), Scaccini et Paccagnella (1965a), Scaccini & Sella*, Hamre <i>et al.</i> (1966), Belloc (1961)
Sicile	Scopello	1885-1933 ; 1955-1967	59	N ; T	Scaccini & Sella*, Scaccini et Paccagnella (1965b), Hamre <i>et al.</i> (1966, 1971)
Sicile	San Giorgio	1880-1963	76	N ; T	Scaccini & Sella*, Scaccini et Paccagnella (1965b), Gamberini (<i>com. pers.</i>)
Sicile	San Ella	1885-1925	35	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	Solanto	1885-1925	38	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	San Nicola	1885-1925	38	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	Trabia	1885-1925	38	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	Castellamare	1885-1931 ; 1955-1959	49	N ; T	Scaccini & Sella*, Heldt (1930, 1931, 1932), Belloc (1961)

Tab. 1. 6 : Séries individuelles de captures de thon rouge par les madragues (suite).

Les colonnes représentent la région, le nom de la madrague, la période concernée (incluant éventuellement des données manquantes), le nombre d'observations disponibles sur cette période (N obs), leur unité (N = nombre d'individu, B = nombre de barils, T = poids en tonnes) et la source des données (* archives personnelles de Scaccini et Sella, ** archives personnelles Rodriguez-Roda, *** archives du duché de Medina Sidonia).

Région	Madrague	Période	N obs	Unité	Source
Sicile	Magazzinazzi	1892-1961	60	N ; T	Scaccini & Sella*, Scaccini et Paccagnella (1965a, 1965b)
Sicile	Oliveri	1883-1967	83	N ; T	Scaccini & Sella*, Scaccini et Paccagnella (1965a, 1965b), Hamre <i>et al.</i> (1966, 1971)
Sicile	Tonno	1885-1963	78	N ; T	Scaccini & Sella*, Scaccini et Paccagnella (1965a, 1965b), Piccinetti et Omiccioli (1999)
Sicile	Marzamemi	1885-1931	47	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	San Antonino	1879-1887	9	N	Parona (1919)
Sicile	San Panagia	1879-1929	49	N ; T	Parona (1919), Scaccini & Sella*
Sicile	Avola	1897-1929	31	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	Capo Passero (2 madragues)	1875-1929	53	N ; T	Scaccini & Sella*
Sicile	Vergina Maria	1885-1911	27	T	Scaccini & Sella*
Tunisie	Sidi Daoud	1863-1997	130	N ; T	Scaccini & Sella*, Hattour (<i>com. pers.</i>), Mather <i>et al.</i> (1995)
Tunisie	Ras El Ahmar	1905-1941	35	N ; T	Scaccini & Sella*, Hattour (<i>com. pers.</i>)
Tunisie	Monastir/Kuriat	1894-1938	37	N	Scaccini & Sella*, Hattour (<i>com. pers.</i>)
Tunisie	Conigliera	1897-1937	33	N	Piccinetti et Omiccioli (1999)
Tunisie	Bordj Khadidja	1903-1929	23	N ; T	Hattour (<i>com. pers.</i>), Piccinetti et Omiccioli (1999)
Tunisie	El Aouaria	1907-1939 ; 1955	24	N ; T	Hattour (<i>com. pers.</i>), Piccinetti et Omiccioli (1999), Postel (1962)
Tunisie	Ras Zebib	1923-1939	14	N ; T	Hattour (<i>com. pers.</i>), Piccinetti et Omiccioli (1999)
Tunisie	Ras el Mihr	1908-1911	3	N	Scaccini & Sella*
Tunisie	Ras Marsa	1907-1918	6	N	Scaccini & Sella*

III.2. Constitution d'une base de données homogènes

Pour pouvoir procéder à l'analyse des séries, plusieurs problèmes ont dû être résolus : le choix des séries et des classes de poids à considérer, les unités hétérogènes, les données manquantes. La méthodologie mise en place pour traiter ces questions le plus systématiquement possible est détaillée ici.

III.2.1 Tri sélectif de s données

- Sources

Pour la même madrague à la même période, plusieurs séries de captures provenant de sources diverses (propriétaire, capitainerie du port, statistiques officielles) sont parfois disponibles. Or ces séries diffèrent sensiblement. Ceci peut avoir plusieurs explications : déclarations plus ou moins exactes des propriétaires aux différentes administrations ou aux autorités religieuses (paiement de la dîme), ou, plus problématique, la prise en compte d'un plus ou moins grand nombre de classes de tailles (certaines séries ne considèrent que les gros individus (> 45-50 kg) alors que d'autres comptabilisent également les individus de classes de poids inférieurs). Par comparaison et recoupement entre les séries et les informations disponibles sur leurs origines et leurs contenus, la série susceptible d'être la plus exacte sera finalement retenue.

- Sites

Une grande majorité des madragues capturent de grands thons (> 60 kg), *i.e.* des adultes au cours de leur migration de reproduction (Pavesi, 1889 ; Sella, 1929b ; Rodriguez-Roda, 1964b ; Farrugio, 1981b). Cependant, quelques-unes d'entre elles capturent de petits thons (< 35 kg), qui, à la différence des reproducteurs, ne réaliseraient pas de migrations récurrentes à la période intéressant les madragues (I.2.2). Ces madragues sont notamment celles des côtes italiennes continentales (sauf Pizzo), adriatiques (Italie et Croatie), lybiennes et françaises. Pour être cohérent, seule les madragues capturant des reproducteurs ont été retenues.

- Nature des séries

La littérature distingue parfois les prises de thons d'"aller", *i.e.* les poissons capturés lors de leur entrée en Méditerranée au printemps, de celles de thons de "retour", capturés lors de leur voyage de retour à l'automne. Ces séries d'aller et de retour évoluent généralement de manière similaire, avec une pêche d'aller généralement supérieure à la pêche de retour, mais des variations inter-annuelles sont notables (Fig. 1. 18). Ces variations pourraient être attribuées à des changements d'ordre hydro-climatiques et/ou comportementaux pouvant influencer les captures d'une saison sur l'autre. Pour cette étude, qui s'intéresse à des évolutions pluri-annuelles, les deux séries d'aller et de retour sont sommées pour disposer d'une série de capture annuelle par madrague.

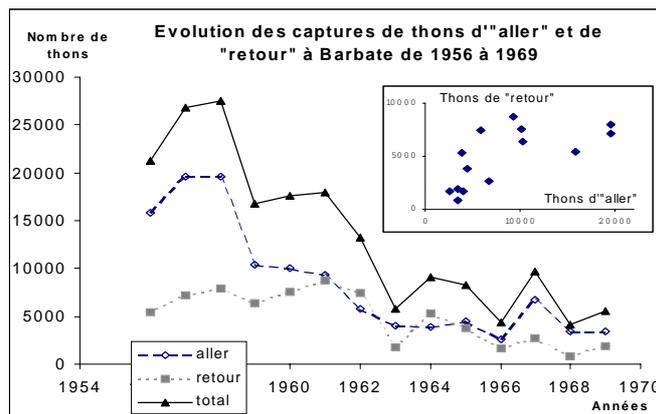


Fig. 1. 18 : Captures de thon d'aller et de retour capturés à Barbate de 1956 à 1969.

Encart : Nombre de thons de retour en fonction du nombre de thons d'aller.

D'après les données publiées par Rodriguez-Roda (1964c, 1966a, 1966b, 1967b, 1969, 1970a, 1970b).

Deux madragues tunisiennes du même golfe (Monastir et Kuriat) étaient calées alternativement. Leurs captures sont sommées pour obtenir une série complète.

Enfin, 38 séries ne concernent pas des madragues individuelles mais des productions globales par quartier maritime (France (Bouches du Rhône, Var, Alpes Maritimes), Algérie, Libye, Espagne (Levante, Tramontana, Baléares), Tab. 1. 5). Pour rester homogène, ces séries régionales ne sont pas prises en compte dans la base de données ; elles sont simplement conservées à titre informatif.

- Classes de poids

Un certain nombre de séries de captures détaillent les prises en trois ou quatre classes de poids (*atunes*, *atuarros*, *albacoras* et *catchorretas* en Espagne et au Portugal, *atunes*, *atuarros*, *catchorretas* et *atunillos* au Maroc, *tonno*, *scamali* et *innocentuli* en Italie). La plupart des séries cependant ne fournissent que le nombre de gros individus (première ou deux premières classes de poids). Un compromis a donc été établi entre qualité (détail des prises) et quantité (nombre de séries) d'informations, pour ne conserver finalement pour les analyses que des séries homogènes. Il est à noter que les dénominations ne correspondent pas aux mêmes classes de poids selon les endroits et les auteurs (Tab. 1. 7). De plus, les attributions des poissons à telle ou telle catégorie de poids étant faite par les pêcheurs de manière empirique, cette ventilation n'est pas exempte d'erreurs.

Pour des raisons biologiques, nous avons finalement choisi de considérer, quand cela était possible, tous les reproducteurs (*i.e.* individus de poids supérieur à 30 kg) soit :

- les *atuns*, les *atuarros* et les *albacorras* au Portugal,
- les *atuns* et les *atuarros* en Espagne et au Maroc, où la dénomination *albacorras* correspond à des juvéniles,
- les *tonno* en Italie.

Tab. 1. 7 : Catégories d'individus et poids correspondants (kg) utilisés dans les différentes régions.

	Portugal		Espagne		
	Vilela (1960)	Tiewes (1962)	Buen (1925)		Rodriguez-Roda (1964b)
			aller	retour	
<i>atuns</i>	> 90	> 100	120	100	> 50
<i>atuarros</i>	50-89	50 - 100	50	45	45-50
<i>albacorras</i>	30-49	25 - 50		10-12	10-12
<i>catchorretas</i>	< 30	< 25		5-6	5-6

	Maroc	Italie
	Rodriguez-Roda (com. pers.)	Scaccini et Sella (com pers.)
<i>atuns</i>	> 50	<i>tonno</i> > 70
<i>atuarros</i>	45-50	<i>scamali</i> 13,3-19
<i>catchorretas</i>	10-12	<i>innocentuli</i> < 10
<i>atunillos</i>	5-6	

Cependant, il arrive parfois que seules des séries de gros reproducteurs (*atuns*) soient disponibles. Une analyse de sensibilité a été conduite pour évaluer si la prise en compte de cette seule classe de taille pouvait biaiser les analyses. Pour chaque région concernée (Maroc, Espagne, Portugal), l'analyse est menée sur 2 séries dont toutes les classes de taille sont disponibles. Un test de corrélation de rang non paramétrique de Spearman croisant ces différentes classes (*atuns* X *atuns*, *atuns* X *atuns+atuarros*, *atuns+atuarros* X *atuns+atuarros*) est conduit. 16 des 17 corrélations s'avèrent significatives au seuil de 5% (Tab. 1. 8). Le fait de comparer des séries d'*atuns* seuls ou des séries regroupant tous les reproducteurs n'apparaît donc pas susceptible de fausser les conclusions des analyses de corrélation.

Tab. 1. 8 : Sensibilité à la classe de reproducteur considérée.

Résultats des test de corrélation croisant différentes classes de taille de Aguas de Ceuta (Aguas) et Principe pour le Maroc, Sancti Petri (Petri) et Lances de Tarifa (Tarifa) pour l'Espagne, Medo das Casas (Medo) et Ramalhete pour le Portugal. N est le nombre d'années concernées, ρ le coefficient de corrélation de Spearman.

Corrélation	N	ρ	probabilité
M Aguas. <i>atuns</i> X Principe. <i>atuns</i>	32	0,46	0,0096
A Aguas. <i>atuns</i> X Principe. <i>atuns+atuarros</i>		0,41	0,02
R Aguas. <i>atuns+atuarros</i> X Principe. <i>atuns</i>		0,45	0,0118
C Aguas. <i>atuns+atuarros</i> X Principe. <i>atuns+atuarros</i>		0,46	0,0101
E			
S Petri. <i>atuns</i> X Tarifa. <i>atuns</i>	43	0,77	0
P Petri. <i>atuns</i> X Tarifa. <i>atuns+atuarros</i>		0,79	0
A Petri. <i>atuns+atuarros</i> X Tarifa. <i>atuns</i>		0,78	0
G Petri. <i>atuns+atuarros</i> X Tarifa. <i>atuns+atuarros</i>		0,79	0
N			
E			
Medo. <i>atuns</i> X Ramalhete. <i>atuns</i>	35	0,39	0,0219
P Medo. <i>atuns</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros</i>		0,40	0,0211
O Medo. <i>atuns</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros+albacorras</i>		0,43	0,0128
R Medo. <i>atuns+atuarros</i> X Ramalhete. <i>atuns</i>		0,35	0,0409
T Medo. <i>atuns+atuarros</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros</i>		0,36	0,0378
U Medo. <i>atuns+atuarros</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros+albacorras</i>		0,39	0,0227
G Medo. <i>atuns+atuarros</i> X Ramalhete. <i>atuns</i>		0,33	0,0522
A Medo. <i>atuns+atuarros</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros</i>		0,34	0,0467
L Medo. <i>atuns+atuarros+albacorras</i> X Ramalhete. <i>atuns+atuarros+albacorras</i>		0,38	0,0288

- Période

Les séries les plus anciennes, retraçant les captures à Zahara et Conil, commencent en 1525 (avec une donnée en 1503, Tab. 1. 4). Ces captures proviennent de sennes de plages et non de madragues ; elles ne sont donc pas retenues dans les analyses. Elles présentent néanmoins un intérêt historique évident et sont présentées à titre informatif (Fig. 1. 19). Ces données proviennent d'une source très ancienne (Duché de Medina Sidonia (nos recherches), et Sarmiento, 1757), qui ne détaille pas la nature des prises. On ne peut donc pas exclure que les productions très élevées de la moitié du XVI^{ème} siècle (plus de 73 000 individus en 1568) incluent des juvéniles de thon rouge ou même d'autres espèces de pélagiques. D'ailleurs Buen (1925) note que des individus d'*espadines*, i.e. *Clupea sprattus* L., qui « étaient très abondants à cette époque », auraient pu être comptabilisés avec les thons rouges. Cet auteur note cependant qu'il ne s'agit que d'un nombre limité d'erreurs de la sorte.

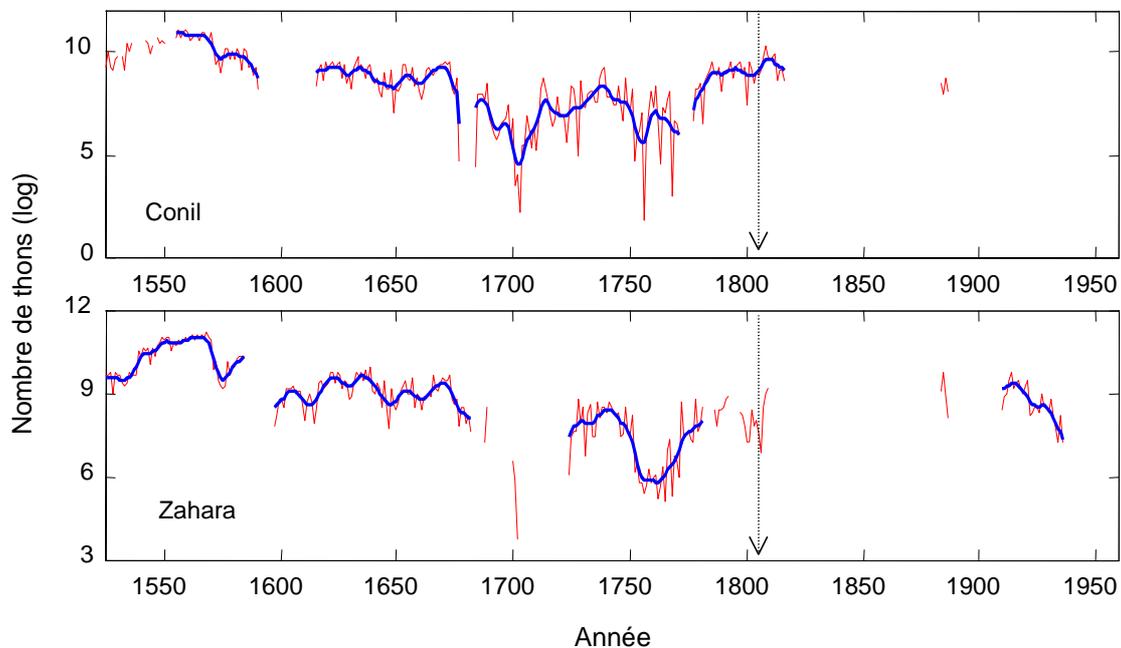


Fig. 1. 19 : Séries temporelles de captures à Conil et Zahara

L'année de changement d'engins de la senne de plage à la madrague est indiquée par une flèche (1804 pour Zahara et 1806–1809 pour Conil). Les lignes fines représentent les données log transformées ; les lignes épaisses, les données lissées. Pour les segments de série supérieurs à 20 ans, la tendance est estimée par EVF (voir seconde partie, I.2), dans les autres cas par une médiane mobile.

L'analyse des différentes séries de production par les madragues au cours du XX^{ème} siècle montre que les captures chutent très nettement après 1960 (Fig. 1. 20). La deuxième moitié du XX^{ème} siècle voit se développer les techniques de pêche hauturière du thon rouge en Méditerranée et sur le proche Atlantique (senne tournante, palangre, canne... Bard et Cort, 1976, 1980) ; la part relative de leurs productions s'accroît clairement à partir de 1960 (Fig. 1. 21, Fig. 1. 22). Nous bornerons donc l'étude à 1960 pour ne considérer que des captures relatives à un contexte d'exploitation homogène.

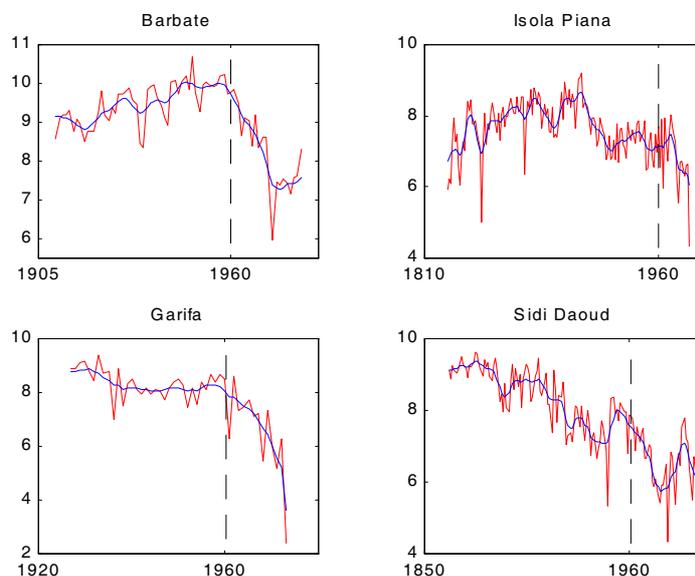


Fig. 1. 20 : Production de quatre madragues au cours du XIX^{ème} et/ou XX^{ème} siècle, dans quatre régions de Méditerranée et du proche Atlantique : Espagne (Barbate), Sardaigne (Isola Piana), Maroc atlantique (Garifa), Tunisie (Sidi Daoud).

Les données log transformées (ligne claire) sont lissées par un EVF d'ordre 5 (ligne foncée, voir seconde partie).

La chute des captures est remarquable après 1960.

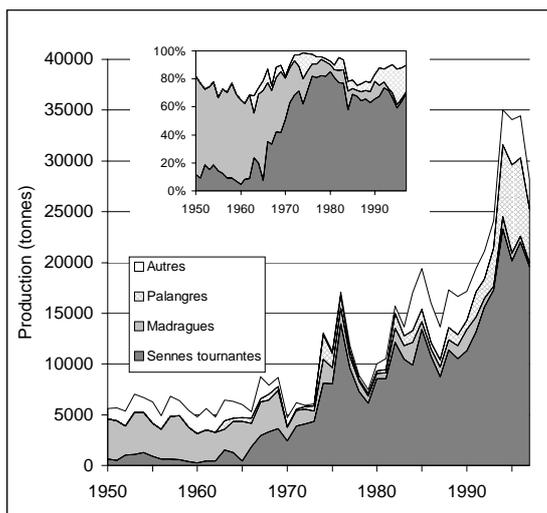


Fig. 1. 21 : Production de thon rouge par engin de pêche de 1950 à 1997 en Méditerranée (ICCAT, 1999).

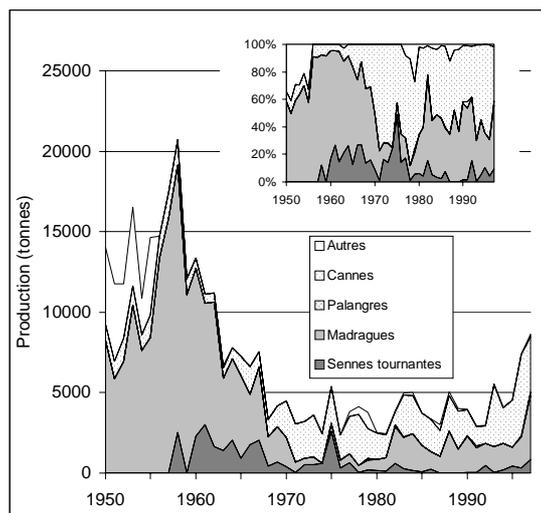


Fig. 1. 22 : Production de thon rouge par engin de pêche de 1950 à 1997 sur le proche Atlantique (Espagne, Portugal, Maroc, ICCAT, 1999).

La part relative des productions par les techniques de pêche hauturière s'accroît nettement à partir de 1960.

III.2.2 Homogénéisation des unités

Les unités des séries collectées varient selon les auteurs, les lieux et les époques. La plupart des séries (95 %) sont exprimées en nombres d'individus. Certaines d'entre elles néanmoins sont publiées en barils (production des madragues siciliennes du XVII^{ème}, XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles en Sicile), en tonnes (publications de Belloc, 1961) ou en "Qli" (Anonyme, 1931). Pour travailler sur des séries homogènes, ces dernières doivent être converties en nombre de thons, en gardant à l'esprit que les unités "barils" et "quintaux" varient selon les époques et les endroits.

Lorsque les séries en nombre de thons et en barils/tonnes/quintaux présentent des périodes communes suffisamment longues, des modèles linéaires ont été calibré et utilisé pour les transformations : des régressions linéaires simples lorsque les variables dépendantes (nombre de thons) sont distribuées normalement, un modèle linéaire généralisé (GLM, McCullagh et Nelder, 1989) dans le cas d'une série (Sidi Daoud, Tunisie) suivant une distribution Gamma. L'ajustement des régressions est satisfaisant avec un R² variant de 0,56 à 0,97 et une probabilité inférieure à 0,004 (Tab. 1. 9).

Lorsque la période commune aux deux séries exprimées en unités différentes n'est pas assez longue (cas de 7 séries siciliennes), les séries en tonnes ne sont pas transformées et sont conservées telles quelles à titre d'information.

Tab. 1. 9 : Régressions utilisées pour la conversion des séries en nombre de thons.

Les colonnes donnent le nom de la madrague concernée, l'unité de la variable indépendante (Baril (B), Tonnes (T)), la période sur laquelle des données sont estimées, le nombre de données utilisées, le nombre de données estimées, le nombre de valeurs exclues de la régression (*outlier*), le coefficient de régression et la probabilité.

Madrague	Unité de départ	Période d'estimation	N utilisées	N estimées	N <i>outlier</i>	r ²	probabilité
Sidi Daoud	T	1938-1953	73	13			
Ras el Ahmar	T	1938-1941	27	3	1	0,82	0,0000
El Aouaria	T	1938, 1939	22	2	0	0,91	0,0000
Monastir	T	1938	29	1	0	0,94	0,0000
Bordj Khadidja	T	1903, 1906	21	2	0	0,97	0,0000
Formica	B	1599-1855	131	72	0	0,90	0,0000
Favignana	B	1599-1855	132	68	0	0,83	0,0000
San Giuliano 1	B	1600-1714	83	17	0	0,95	0,0000
San Giuliano 2	T	1885-1910	19	9	0	0,87	0,0000
Asinelli	T	1904-1908	21	5	0	0,81	0,0000
San Cusumano	T	1896, 1903	15	2	1	0,83	0,0040
Bonagia 1	B	1599-1719	117	50	3	0,87	0,0000
Bonagia 2	T	1888-1897	22	10	0	0,75	0,0000
Cofano	B	1660-1719	63	11	0	0,85	0,0000
San Giorgio	T	1899-1926	22	16	1	0,89	0,0000
Magazzinazzi	T	1892-1895	19	4	0	0,56	0,0002
Tonno	T	1885-1894	19	10	1	0,87	0,0000
Marzamemi	T	1888-1899	19	12	0	0,88	0,0000

III.2.3 Estimation des données manquantes

Les données manquantes sont un problème récurrent dans les séries temporelles et les séries de captures par les madragues n'y font pas exception.

Les données manquantes peuvent avoir ici plusieurs origines : la madrague n'a pas été calée pour des raisons sociales (épidémie, guerre), environnementales ou économiques (nécessité de faire l'avance des frais d'exploitation), ou les données n'ont pas encore été retrouvées ou sont définitivement perdues (e.g. les captures du milieu du XIX^{ème} siècle à Favignana et Formica qui auraient brûlé dans un incendie, Guarrasi, *com. pers.*). Dans ce dernier cas, ce sont souvent des périodes entières qui manquent, à l'évidence trop longues pour pouvoir être comblées par des méthodes d'analyse numérique. En revanche, la plupart des méthodes d'analyse spatiale et temporelle requérant la contiguïté, estimer les valeurs manquantes de quelques années pour combler les séries est un inévitable préalable à leur étude (Legendre et Legendre, 1998). Nous nous sommes donc attachés à déterminer quels étaient les meilleurs moyens d'estimer les données manquantes dans ces séries hautement variables.

Le moyen le plus pertinent pour combler une série consiste à utiliser une information sur la donnée manquante. Par exemple, pour combler une série de "nombre de thons", une telle information peut être obtenue d'une série parallèle donnant la production en barils ou en tonnes. Nous estimerons alors, par régression, la valeur manquante en nombre d'individus à partir du nombre de barils ou de tonnes. Quand aucune information sur la donnée manquante n'est disponible, la série doit être comblée par une autre méthode. Nous avons conduit une étude empirique pour déterminer quelle était, parmi les méthodes numériques classiquement utilisées pour combler les séries temporelles, celle la plus à même d'estimer la valeur manquante dans le cas de nos séries hautement variables, tout en faussant le moins possible les relations sous-jacentes dans les données. L'étude s'est également attachée à déterminer le nombre de données manquantes consécutives qui pouvaient être raisonnablement estimées par ces méthodes. Les performances de différentes méthodes de lissage (médiane mobile, kernel et splines, Watson, 1966) et de modèles autorégressifs (ARIMA, Box et Jenkins, 1976) ont ainsi été comparées (Annexe A). Jugeant l'erreur entre valeurs originales et valeurs estimées, nous avons finalement retenu un modèle ARIMA lorsque son ajustement était satisfaisant, un filtre de kernel dans les autres cas (bien que la médiane mobile donne parfois de meilleures estimations que le filtre de kernel, elle n'apparaît pas suffisamment fiable car les estimations sont très dépendantes du voisinage). Parce qu'il est apparu que les estimations étaient fiables jusqu'à trois valeurs manquantes contiguës, nous avons restreint le comblement à une, deux ou trois valeurs manquantes adjacentes.

Enfin, pour que l'opération de complétion reste raisonnable, seules les séries dont le pourcentage de données manquantes est inférieur à 15% sont conservées.

Enfin, quatre catégories de séries sont considérées : les séries exprimées en nombre de thons (originales ou qui ont pu être transformées), les séries exprimées en tonnes, les séries régionales, les séries de thons juvéniles. Ces trois dernières catégories sont conservées uniquement à titre informatif.

La base de données est constituée d'une sélection de séries de la première catégorie. Les critères sont stricts : série provenant d'une madrague bien identifiée sur le trajet de thons matures, d'au moins 20 ans consécutifs sans données manquantes ≥ 3 ans, contenant moins de 15 % de données manquantes.

Tab. 1. 10 : Classification géographique et présentation des séries de captures par les madragues retenues pour l'étude.

A gauche, regroupement résultant de la classification sur la matrice de distance (en km). Les colonnes représentent l'indice des séries, la région, le nom de la madrague, la période (années respectives de la première et de la dernière donnée disponible), le nombre total d'observations (Nb obs), le nombre de données manquantes estimées (Nb NA) et le pourcentage qu'elles représentent, la valeur moyenne de la série.

Indice de distance géographique				N°	Région	Madrague	Période	Nb obs	Nb NA	% NA	Moyenne
				1	Port	Sul do Cabo	1896-1917	21	1	4,55	1550
				2	Port	Senohra da Rocha	1897-1919	23	0	0,00	1739
				3	Port	Olhos de Agua	1896-1919	24	0	0,00	1379
				4	Port	Forto Novo	1896-1920	25	0	0,00	1437
				5	Port	Ramalhete	1896-1930	35	0	0,00	1641
				6	Port	Cabo Santa Maria	1896-1933	38	0	0,00	2180
				7	Port	Livramento	1876-1933	58	0	0,00	8299
				8	Port	Barril	1867-1933	67	0	0,00	11080
				9	Port	Medo das Casas	1797-1933	112	0	0,00	10588
				10	Port	Abobora	1885-1933	49	0	0,00	3914
				11	Port	Sul da Ponta	1902-1926	25	0	0,00	5921
				12	Port	Torre de Barra	1897-1917	21	0	0,00	1468
				13	Sp	Reine Regente	1914-1940	26	2	7,14	7274
				14	Sp	Isla Cristina	1929-1960	32	0	0,00	8404
				15	Sp	Las Torres	1902-1936	34	1	4,55	3754
				16	Sp	Arroyo Hondo	1914-1934	20	1	4,76	7369
				17	Sp	Sancti Petri	1884-1960	46	2	4,55	13529
				18	Sp	Torre Atalaja	1914-1934	20	1	4,76	5598
				19	Sp	Barbate	1884-1960	50	5	9,80	15456
				20	Sp	Zahara	1804-1936	38	0	0,00	6843
				21	Sp	Tarifa	1914-1960	35	0	0,00	3845
				22	Mc	Punta Negra	1936-1960	24	1	4,00	5030
				23	Mc	Aguas de Ceuta	1940-1960	21	0	0,00	801
				24	Mc	Principe	1940-1960	21	0	0,00	466
				25	Tun	Sidi Daoud	1863-1960	93	5	5,10	5976
				26	Tun	Ras El Ahmar	1905-1941	35	2	5,41	2277
				27	Tun	Monastir	1894-1938	35	1	3,03	2085
				28	Tun	Conigliera	1897-1937	33	1	3,03	2444
				29	Tun	Bordj Khadidja	1903-1929	23	4	14,81	1890
				30	Sic	Formica	1599-1960	287	15	5,23	2424
				31	Sic	Favignana	1599-1960	284	15	5,28	2712
				32	Sic	San Giuliano	1600-1914	133	14	10,53	1031
				33	Sic	Asinelli	1904-1929	26	0	0,00	938
				34	Sic	San Cusumano	1896-1960	59	0	0,00	708
				35	Sic	Bonagia	1599-1934	237	15	6,33	1198
				36	Sic	Cofano	1657-1798	74	2	7,41	580
				37	Sic	Secco	1874-1960	62	1	1,67	579
				38	Sic	Scopello	1909-1960	31	0	0,00	469
				39	Sic	San Giorgio	1880-1960	75	0	0,00	573
				40	Sic	San Elia	1909-1929	19	2	9,52	411
				41	Sic	Solanto	1909-1929	19	2	9,52	615
				42	Sic	San Nicola	1909-1929	19	2	9,52	383
				43	Sic	Trabia	1909-1929	19	2	9,52	615
				44	Sic	Castellamare	1909-1931	21	2	8,70	378
				45	Sic	Magazzinazzi	1892-1960	59	0	0,00	851
				46	Sic	Oliveri	1904-1960	57	0	0,00	840
				47	Sic	Tonno	1885-1960	74	2	2,63	1058
				48	Sic	Marzamemi	1830-1931	58	0	0,00	2119
				49	Ital	Pizzo	1876-1932	52	5	8,77	2105
				50	Sard	Saline	1788-1960	113	1	0,88	2623
				51	Sard	Flummentorgiu	1787-1932	68	7	10,29	1478
				52	Sard	Porto Paglia	1787-1960	131	7	5,15	2082
				53	Sard	Porto Scuso	1787-1960	138	1	0,74	3225
				54	Sard	Isola Piana	1787-1960	138	1	0,74	2825

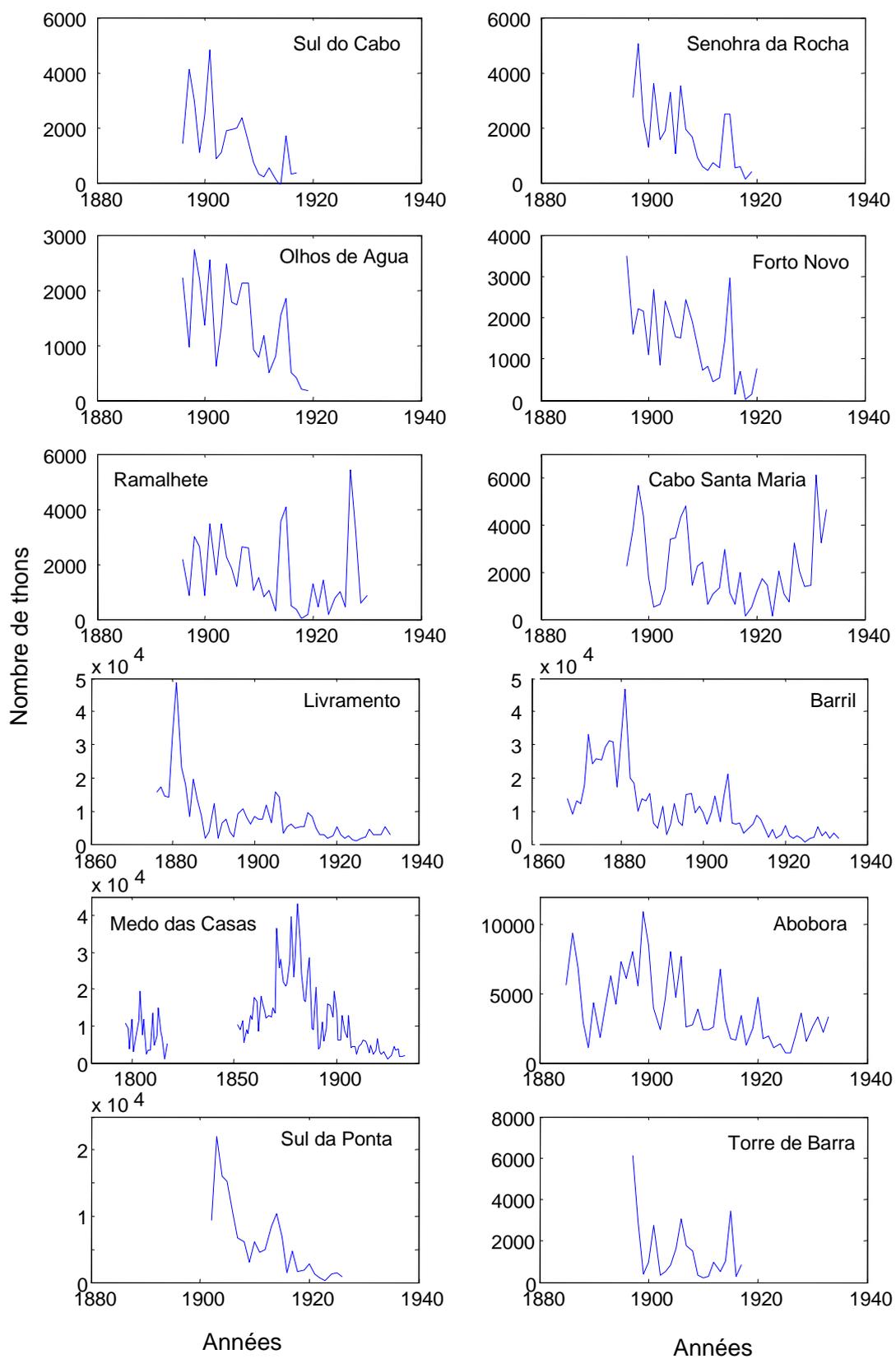


Fig. 1. 23 : Captures historiques des madragues portugaises

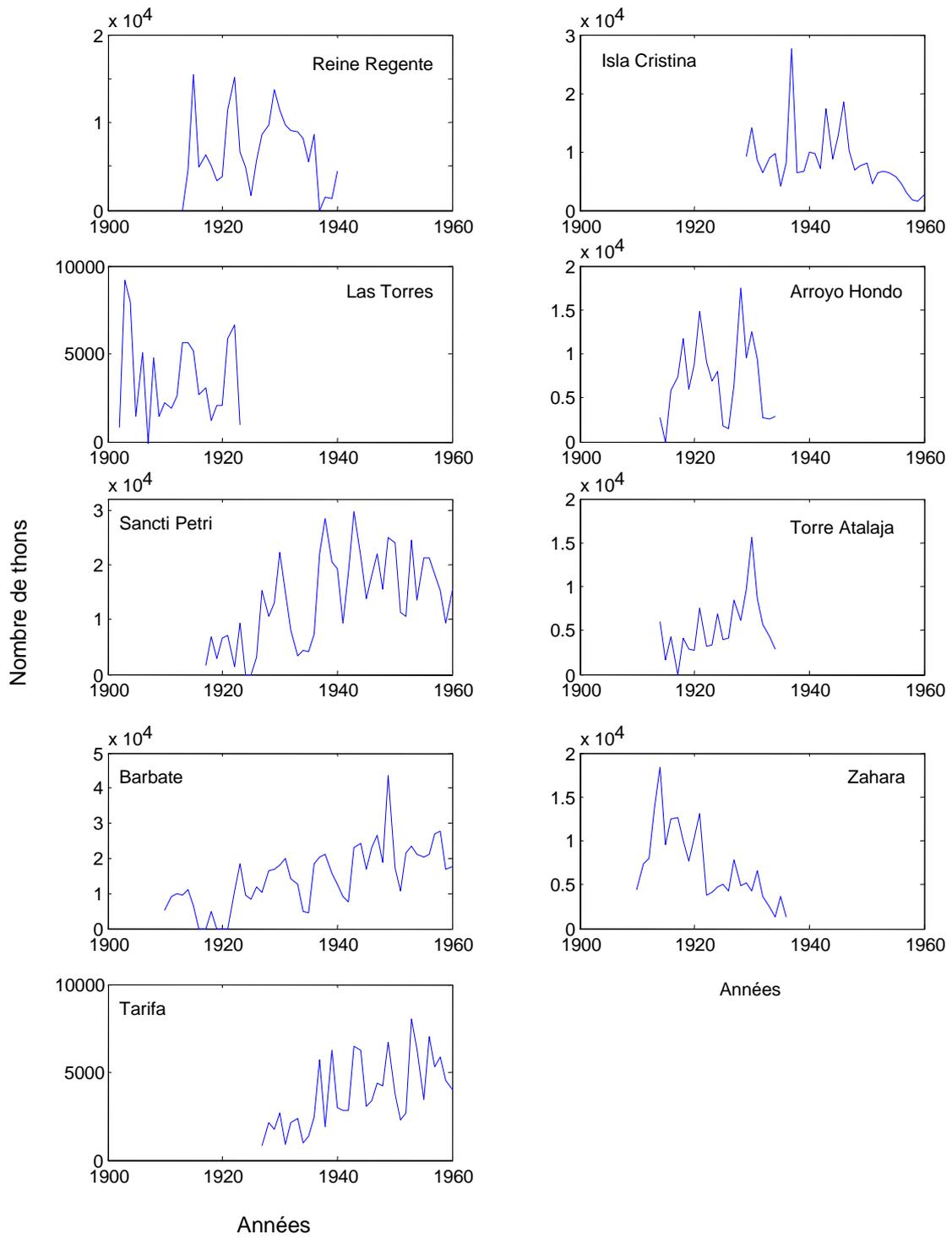


Fig. 1. 24 : Captures historiques des madragues espagnoles

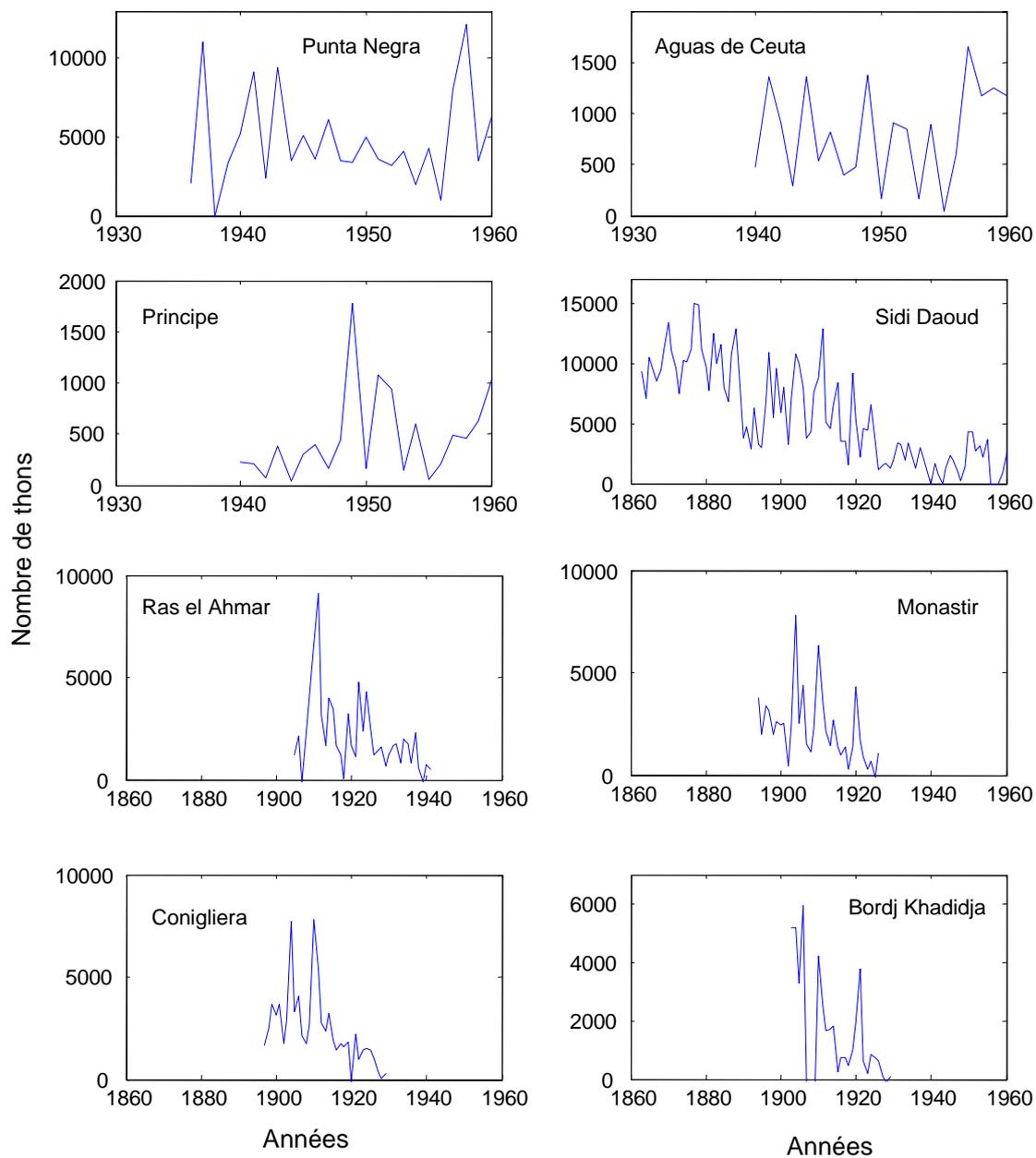


Fig. 1. 25 : Captures historiques des madragues marocaines et tunisiennes

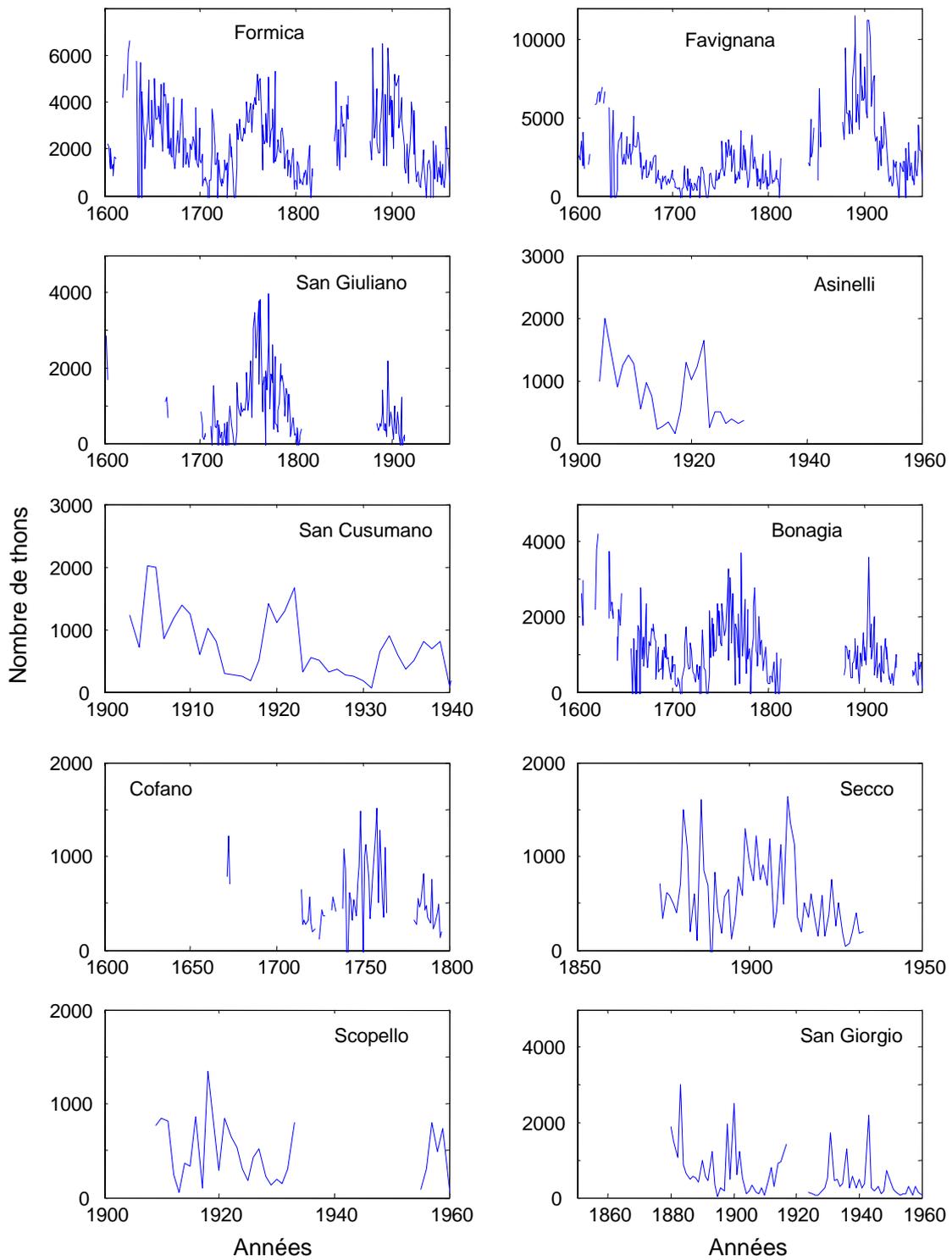


Fig. 1. 26 : Captures historiques des madraques siciliennes

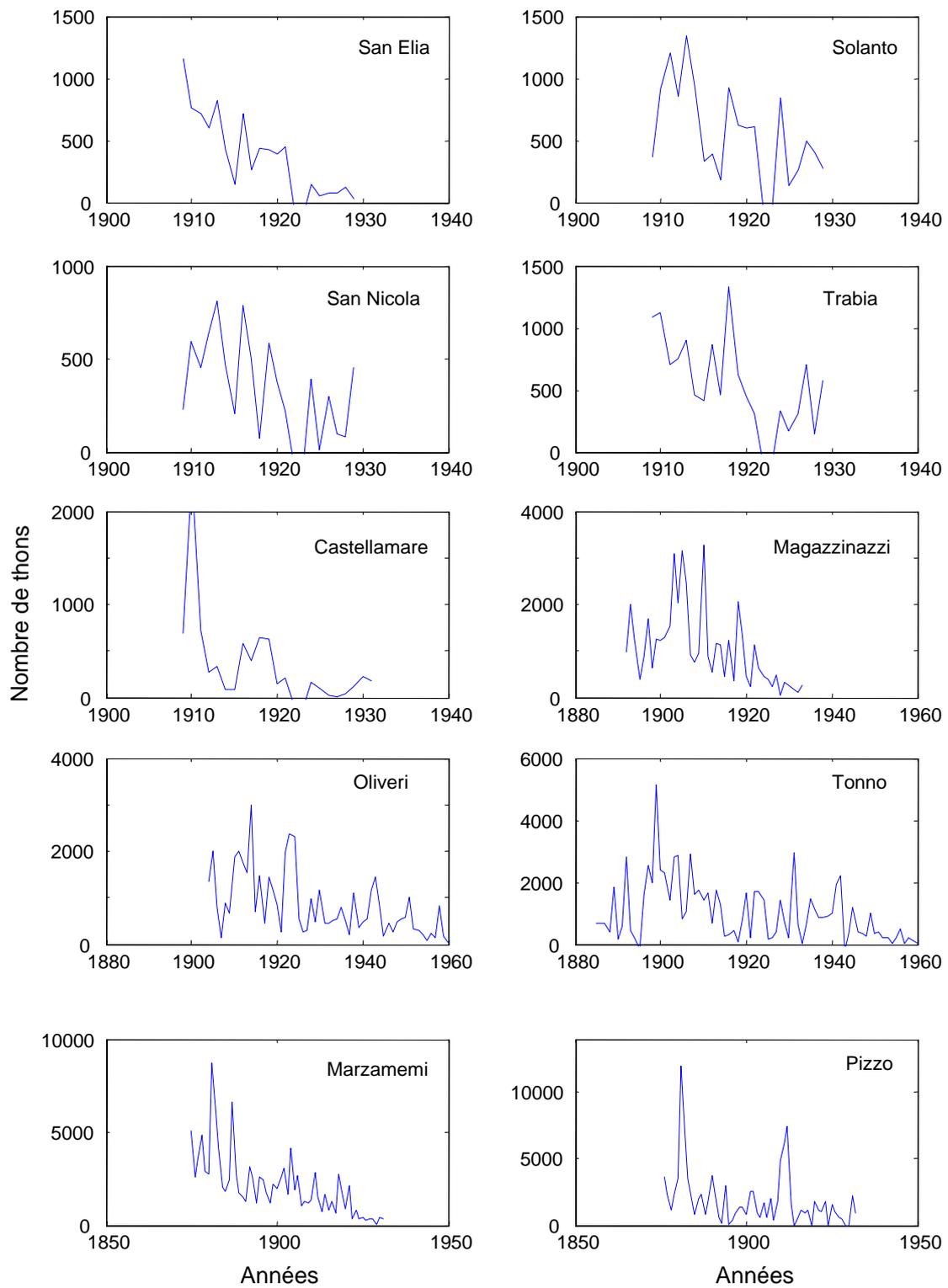


Fig. 1. 26 (suite) : Captures historiques des madragues siciliennes

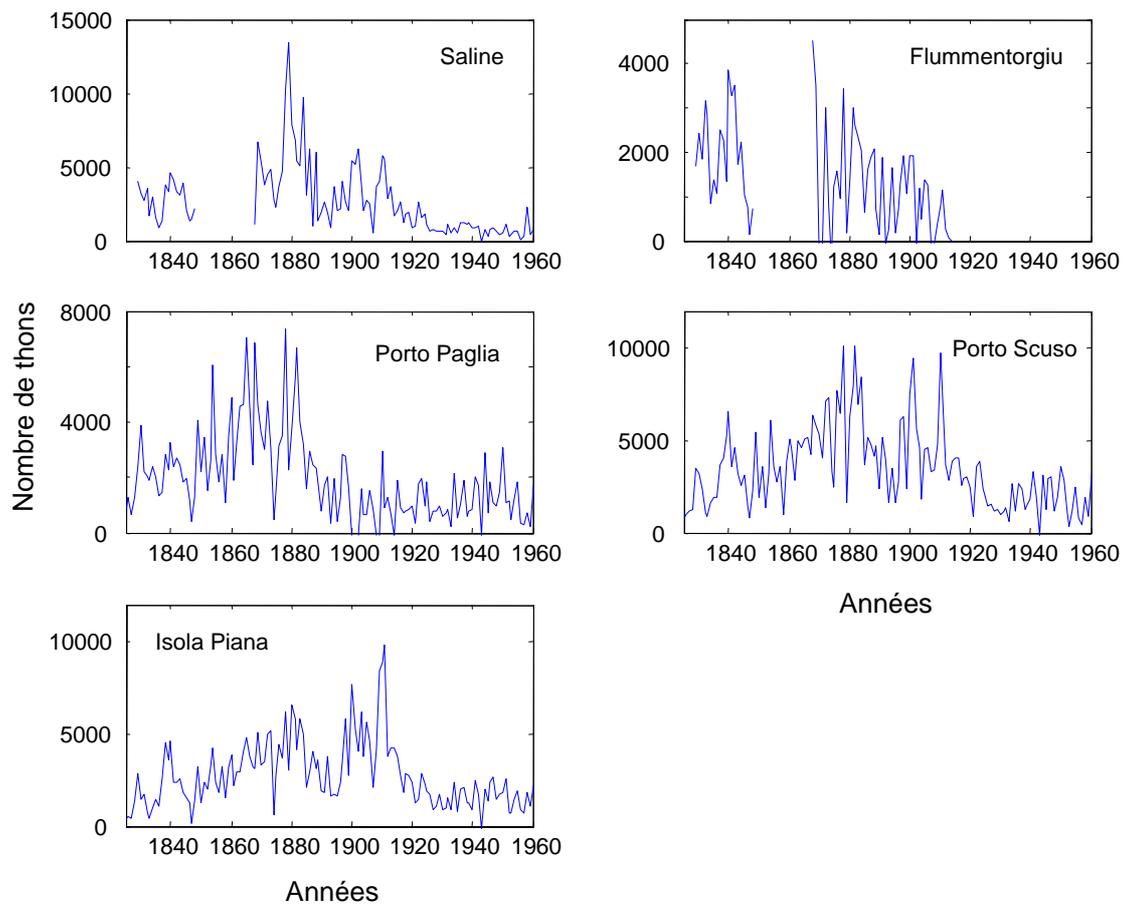


Fig. 1. 27 : Captures historiques des madragues sardes

III.3. Description de la base de données

Finalement, une base de données de 54 séries de captures est constituée (Tab. 1. 10, Fig. 1. 23 à Fig. 1. 27). Trois caractéristiques émergent rapidement à l'examen du jeu de données : les séries sont regroupées en pôles géographiques, elles sont de longueurs variables et couvrent des périodes différentes. Cette particularité du tableau, qui a des implications importantes en termes méthodologiques, est détaillée ici.

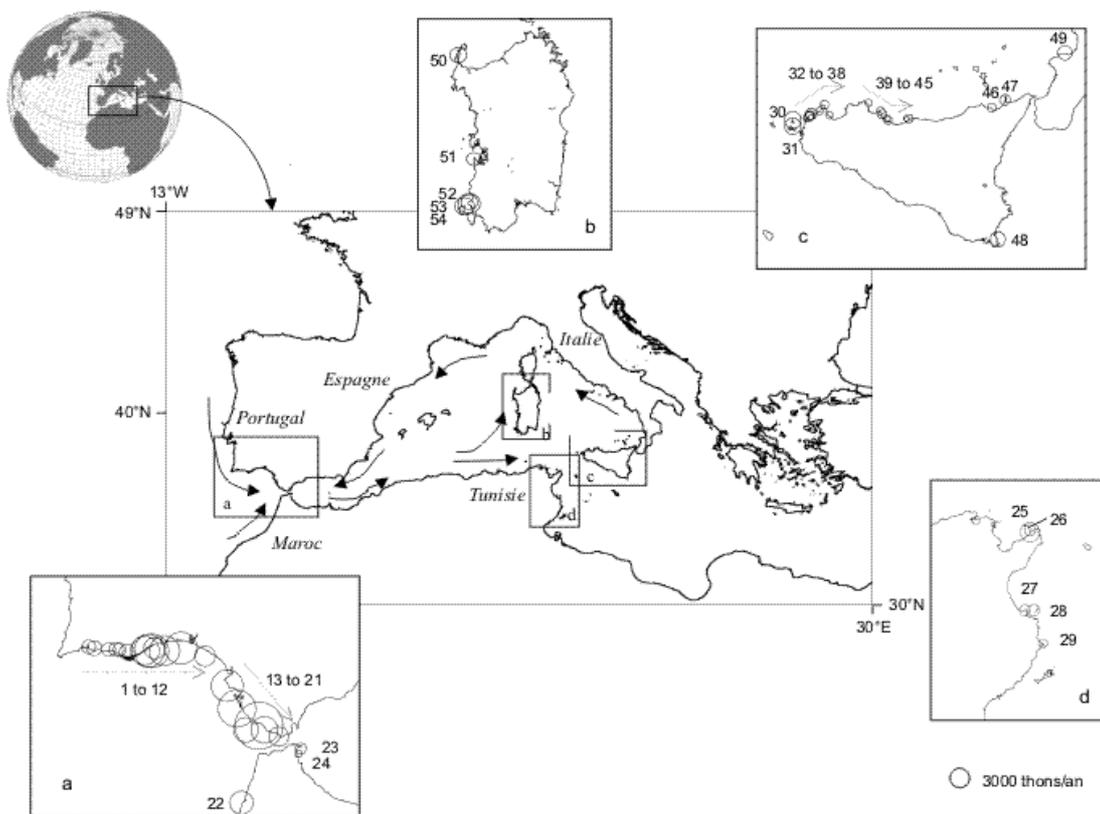


Fig. 1. 28 : Localisation des madragues d'intérêt.

Les encarts montrent la localisation des madragues autour (a) du Portugal, de l'Espagne et du Maroc, (b) de la Sardaigne, (c) de la Sicile et des côtes sud de l'Italie et (d) de la Tunisie. Les numéros se réfèrent aux indices des madragues de la base de données (Tab. 1. 10). Le diamètre des cercles est proportionnel à la production médiane des madragues. Les flèches indiquent les trajets migratoires des reproducteurs en Méditerranée et sur le proche Atlantique Est.

- Deux pôles géographiques

La base de données est constituée de séries provenant des côtes atlantiques proches du détroit de Gibraltar (Portugal, Espagne, Maroc) et du bassin méditerranéen occidental (Espagne, Maroc, Tunisie, Sicile, Sardaigne, Italie continentale, Fig. 1. 28). Pour déterminer des régions géographiques homogènes, une classification sur une matrice de distance géographique entre madragues (ligne directe, en km) est conduite. Une classification hiérarchique avec un lien flexible est utilisée et les madragues sont groupées selon un critère de distance euclidienne (Lance et Williams, 1967).

Les 54 madragues sont groupées en 5 différentes régions : Portugal, Espagne et Maroc, Tunisie, Sardaigne, Sicile et la seule madrague retenue en Italie continentale (Tab. 1. 10). Ces 5 régions se rassemblent en deux pôles principaux : la zone de Gibraltar d'une part, l'est du bassin méditerranéen occidental d'autre part. Comme cela a été souligné plus haut (chapitre II), cette disparité dans la cartographie des sites de calaison des madragues ne résulte pas d'un manque de données mais du type de pêcherie elle-même : les madragues constituaient une importante pêcherie le long des côtes sud du Portugal, des côtes atlantiques de l'Espagne et du Maroc ainsi que sur les côtes

tunisiennes, siciliennes, sardes et ouest de l'Italie continentale, c'est à dire le long des routes de migrations des reproducteurs. Ailleurs, le long des côtes algériennes, françaises et adriatiques notamment, les madragues étaient beaucoup moins nombreuses et ne capturaient que des juvéniles et/ou sporadiquement des adultes et n'ont donc pas été retenues dans cette étude.

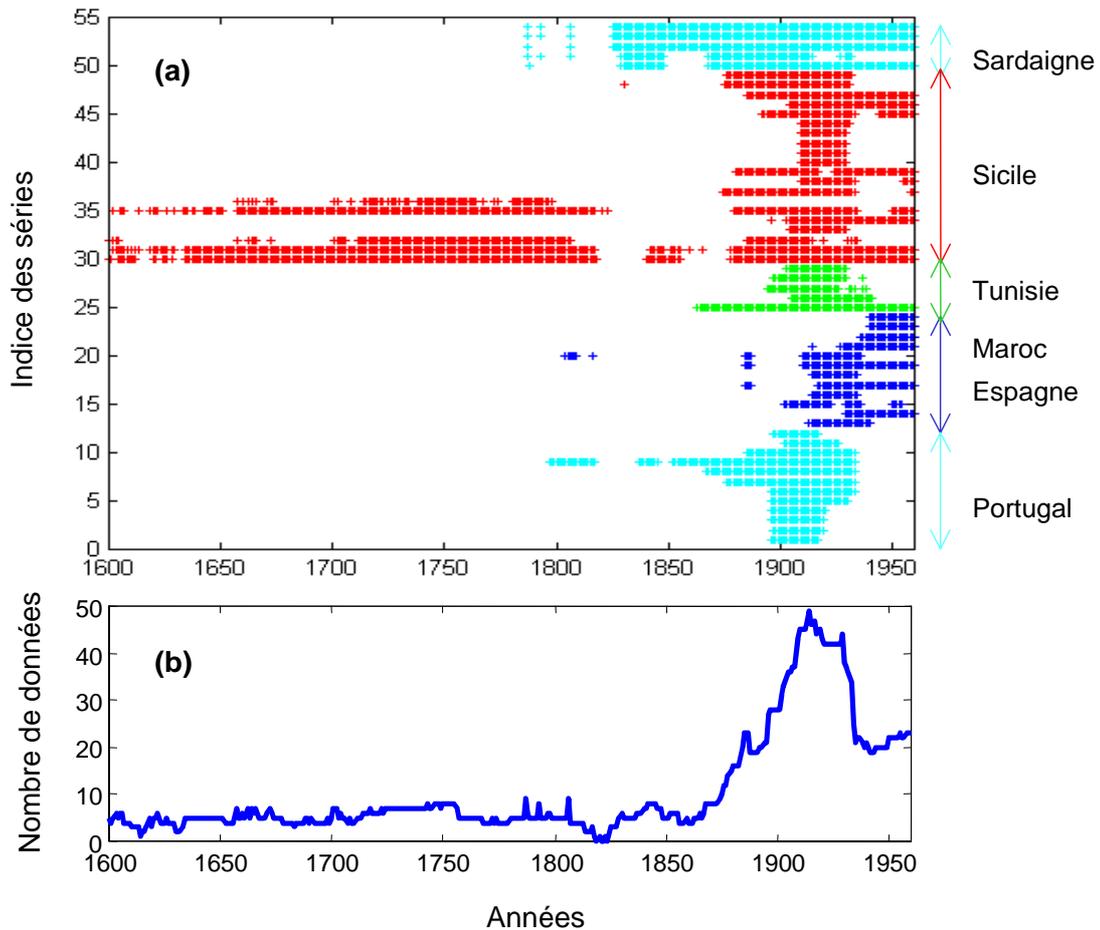


Fig. 1. 29 : Données disponibles de 1600 à 1960.

(a) : présence (+) / absence (blanc) de données pour chacune des 54 séries utilisées dans l'étude (les indices se rapportent au descriptif Tab. 1. 10).

(b) : nombre total cumulé de données disponibles chaque année.

- Des séries de longueurs variables

Les séries du tableau de données ont des longueurs très variables : de 20 ans continus au minimum (critère de sélection) à près de 4 siècles (dont une période manquante d'un demi-siècle) pour les plus longues (Tab. 1. 10, Fig. 1. 29). Neuf séries s'étendent sur plus d'un siècle, 22 (environ 40 %) sur plus de 50 ans. Cependant, 1/3 des séries ne dépassent pas 30 ans (Fig. 1. 30). Cette disparité dans les longueurs des séries signifie que de nombreuses périodes sont non renseignées dans le tableau de données, *i.e.* il ne pourra pas faire l'objet, directement et/ou dans son ensemble, d'analyses temporelles classiques.

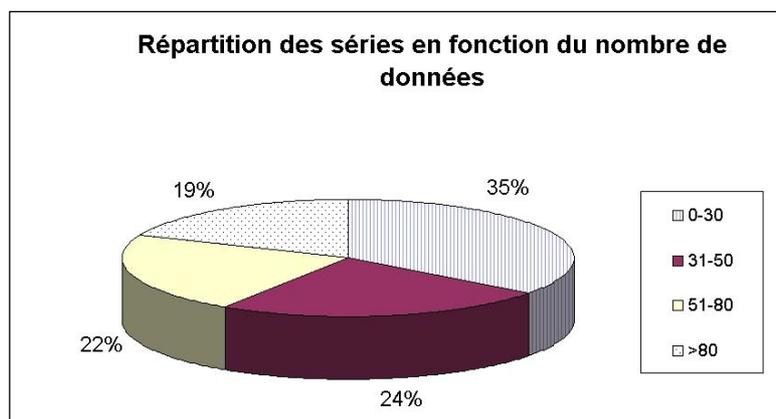


Fig. 1. 30 : Répartition des séries en fonction du nombre de données.

- Un niveau d'information variable dans le temps et dans l'espace

La plupart des séries portugaises, siciliennes, sardes et tunisiennes couvrent la seconde partie du XIX^{ème} siècle et la première partie du XX^{ème} (Fig. 1. 29). Les séries espagnoles et marocaines constituent un cas particulier et problématique dans la mesure où, à la différence des autres, elles couvrent seulement une partie du XX^{ème} siècle, à partir de 1910 ou 1930. Pour cette raison, elles ne recoupent les séries italiennes, tunisiennes et portugaises que sur quelques années.

La base de données de 54 séries de captures présente une importante variabilité spatiale et temporelle du niveau d'information, avec laquelle il faudra composer pour réaliser les analyses numériques traditionnellement destinées à l'étude d'un tableau complet.

III.4. Estimation des productions historiques

Compte-tenu de la nature de la base de données (avec de nombreuses données manquantes et des périodes renseignées différentes selon les régions), le niveau de production moyen des madragues de Méditerranée et de l'Atlantique Est est estimé sur la période 1910-1930, qui correspond à une époque de production moyenne et qui est très largement documentée.

III.4.1 Méthode

Toutes les informations disponibles pendant la période 1910-1930 sont utilisées pour estimer les captures totales réalisées dans chaque région : les séries de captures par madragues (Tab. 1. 10), les séries régionales (Tab. 1. 5) et les informations sur les madragues en activité (chapitre II). Lorsque la totalité des captures des madragues en activité est connue, la série régionale est obtenue par simple somme des productions de madragues individuelles ou de madragues individuelles et de séries déjà agrégées. Lorsque des madragues sont connues pour être actives mais que l'on ne dispose pas de leurs captures

sur la période complète, la série régionale est estimée en sommant les captures disponibles puis pondérées par l'importance relative des informations manquantes.

III.4.2 Résultats

Les estimations (Fig. 1. 31) montrent que captures atlantiques représentent 65 % de la production totale des madragues. Les productions moyennes s'élevaient à 42 700 thons/an pour l'Espagne, 22 900 thons/an pour le Portugal, 16 000 thons/an pour la Sicile, 12100 thons/an pour la Tunisie, 9 300 thons/an pour la Sardaigne, 8 250 thons/an pour le Maroc et 1 300 thons/an pour l'Algérie, soit une production moyenne totale d'environ 110 000 thons/an. Ces productions annuelles sont cependant très variables dans le temps et se distribuent, pour le bassin Méditerranéen et le proche Atlantique, entre 50 000 et 160 000 thons. Considérant les poids moyens de thons capturés par région (175 kg au Portugal, 160 kg en Espagne et au Maroc, 110 kg en Sicile, 100 kg en Sardaigne et 80 kg en Tunisie, Ravier et Fromentin, 2002), les productions moyennes annuelles sont évaluées à environ 15 000 t (minimum et maximum de 7 000 et 25 000 t respectivement).

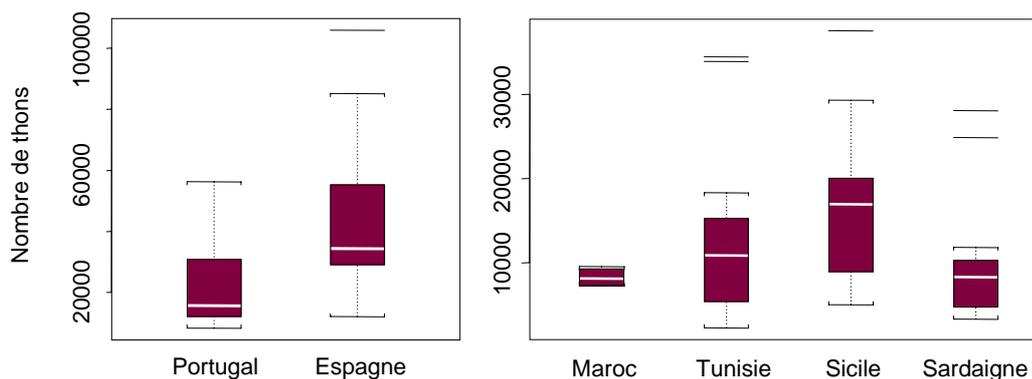


Fig. 1. 31 : Productions régionales estimées (en nombre de thons) pour la période 1910-1930.

Les boîtes à moustache représentent les productions médianes, quart inférieur et quart supérieur.

III.4.3 Discussion

Ces résultats concordent avec les estimations présentées par Doumenge (1998) qui font état, pour la dernière période « euphorique » de 1875 à 1890, de prises moyennes annuelles de 24 000 t pour la Méditerranée et le proche Atlantique. La production annuelle se tient entre 17 000 t environ pour les années 1929-1931 et 11 000 t pour 1932-1934, dont près des 2/3 sont constitués par les prises andalouses.

Pour comparaison, depuis les dix dernières années, les captures de thon rouge déclarées par l'ICCAT pour la Méditerranée et l'Atlantique Est, probablement sous-estimées, varient entre 20 000 et 53 000 t (ICCAT, 2003), soit des niveaux nettement supérieurs aux taux moyens historiques.

Les fluctuations d'abondance du thon rouge en Méditerranée

*“Le temps révèle tout.
C'est un bavard qui parle sans être interrogé.”
Euripide*

Introduction

De nombreux auteurs, dans la littérature plus ou moins ancienne, mentionnent, sur la base d'observations, la présence de fluctuations périodiques dans les captures de thons rouge. En 1919, Parona notait un cycle de cinq ans, en phase ou en opposition selon différents points de la côte. Dix ans plus tard, Sella (1929b) indique des fluctuations périodiques de large amplitude (environ 50 ans) ainsi que de la variabilité à haute fréquence. Des observations similaires sont faites au même moment sur une madrague portugaise (Medo das Casas) par Neuparth (1925), qui postule que les captures varient selon des cycles de 8 et 80 ans. Buen (1925) met en avant des fluctuations séculaires dans les prises de deux madragues espagnoles, Conil et Zahara, alors que Lozano Cabo (1958) et Rodriguez-Roda (1965, 1966a, Fig. 2. 1) estiment que les captures des madragues espagnoles et marocaines varient suivant des périodes de 6 à 8 ans.

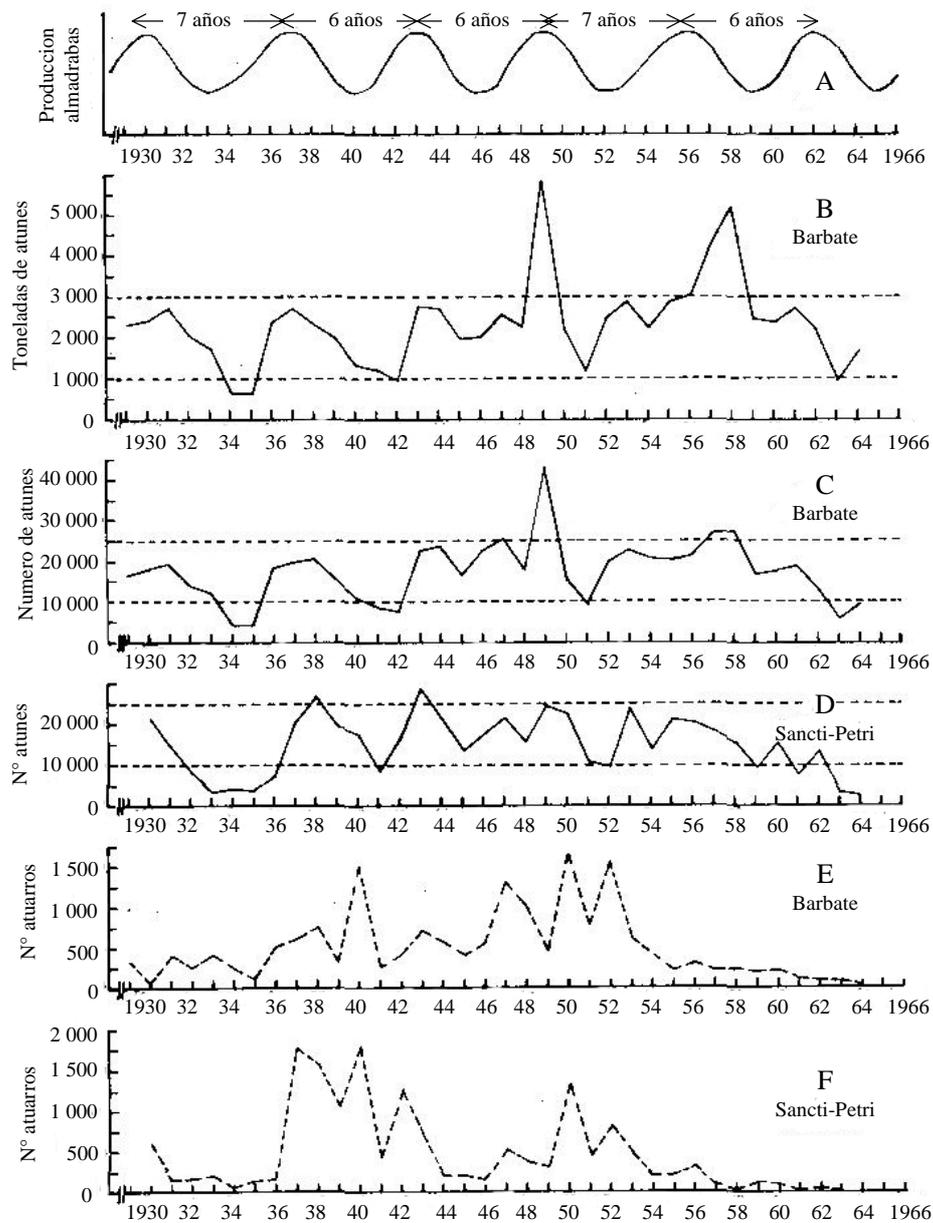


Fig. 2. 1: Etude des fluctuations des captures des madragues espagnoles (en nombre de thons par an). D'après Rodriguez-Roda (1966a), qui y a vu un phénomène cyclique de périodicité 6 ou 7 ans.

Avec comme matériel, un jeu de séries plus fourni, et comme outils des méthodes statistiques en appui des inspections visuelles, cette seconde partie se propose, dans un premier temps, de préciser la structure temporelle des séries de captures par les madragues. Le synchronisme entre les différents sites est ensuite étudié pour finalement répondre à la question centrale de ce document : les fluctuations à long terme des captures de thon rouge par les madragues constituent-elles un bon indice des fluctuations à long terme des abondances ?

I. Variabilité spatio-temporelle des captures

Ce premier chapitre a pour objectif de décrire la variabilité spatiale et temporelle des séries historiques de captures (Fig. 2. 2). La structure temporelle est tout d'abord analysée en identifiant les cycles et les tendances et en quantifiant leur importance relative. La variabilité spatiale et ses échelles de pertinence sont ensuite caractérisées.

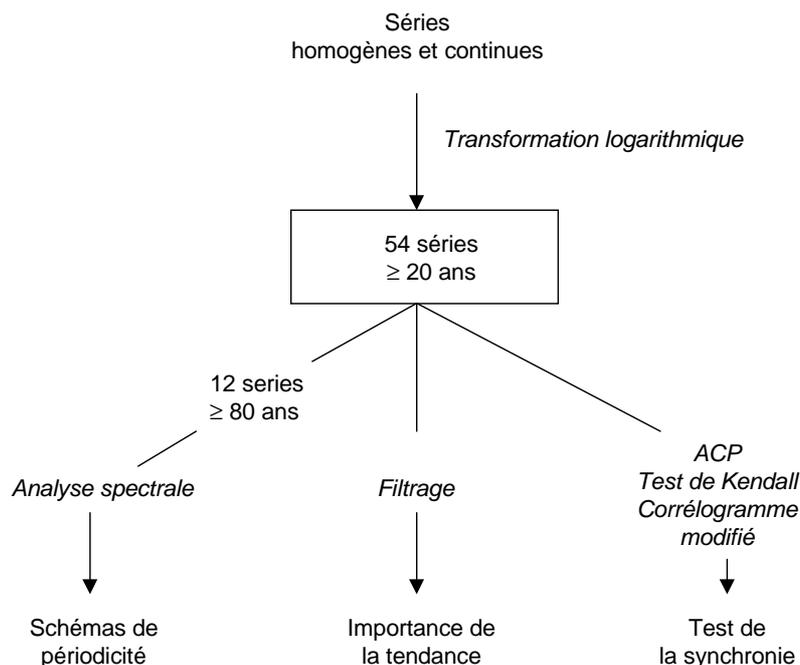


Fig. 2. 2 : Méthodologie suivie pour l'analyse spatio-temporelle des séries.

L'étude est réalisée sur des données log-transformées (logarithme naturel), pour stabiliser la variance (e.g. Sen et Srivastava, 1990). Une telle transformation est raisonnable d'un point de vue biologique puisque les dynamiques de population sont largement gouvernées par des processus multiplicatifs (Williamson, 1972).

I.1. Amplitude des fluctuations

Les captures des madraques présentent de remarquables fluctuations temporelles : les coefficients de variations⁽¹⁾ des 54 séries varient de 0,49 à 1,33 (Tab. 2. 1). Les amplitudes de variation entre les périodes de faibles (1690-1710, 1790-1810, 1930-1940) et de fortes captures (1630-1650, 1750-1770, 1870-1890) sont conséquents avec des facteurs de 2 à 4 pour les séries tunisiennes, sardes et siciliennes, 5 à 7 pour les séries portugaises (Fig. 2. 3 a, b). Les captures de la madraque de Formica par exemple s'élèvent d'une moyenne de 1000 thons/an pendant les périodes de faibles abondances, à plus de 3500 thons/an pendant les périodes profuses.

⁽¹⁾ Coefficient de variation (C.V.) : écart type divisé par la moyenne.

Tab. 2. 1: Principales caractéristiques des séries temporelles de captures par les madragues.

Les colonnes représentent l'indice des séries, la région, le nom de la madrague, la période concernée, le nombre de données (observations + données manquantes estimées, N), les valeurs médianes, minimales (min) et maximales (max), le coefficient de variation (C.V.) et le pourcentage de variation associé à la première composante du filtrage par les vecteurs propres (** significatif au seuil de 1%, * au seuil de 5%, voir chapitre I.3).

N°	Région	Madrague	Période	N	Médiane	min	max	C.V.	% EVF
1	Port	Sul do Cabo	1896-1917	22	1404	115	4813	0,81	56,4**
2	Port	Senohra da Rocha	1897-1919	23	1560	132	5024	0,75	46,6**
3	Port	Olhos de Agua	1896-1919	24	1352	167	2742	0,58	53,2**
4	Port	Forto Novo	1896-1920	25	1435	31	3485	0,65	50,8**
5	Port	Ramalhete	1896-1930	35	1169	39	5435	0,80	36,6**
6	Port	Cabo Santa Maria	1896-1933	38	1730	127	6103	0,72	32,4**
7	Port	Livramento	1876-1933	58	5709	1075	48718	0,99	68,3**
8	Port	Barril	1867-1933	67	7606	655	46825	0,87	81,2**
9	Port	Medo das Casas	1797-1817	21	7000	700	19500	0,60	35,0**
		"	1852-1933	82	9240	764	43131	0,80	82,8**
10	Port	Abobora	1885-1933	49	3258	662	10907	0,64	55,0**
11	Port	Sul da Ponta	1902-1926	25	4739	272	21943	0,93	75,8**
12	Port	Torre de Barra	1897-1917	21	1404	207	6132	1,00	32,7**
13	Sp	Reine Regente	1914-1940	28	6432	1321	15410	0,55	44,5**
14	Sp	Isla Cristina	1929-1960	32	7330	1544	27662	0,62	79,7**
15	Sp	Las Torres	1902-1923	21	2967	1455	27662	0,61	30,9**
16	Sp	Arroyo Hondo	1914-1934	20	7073	1414	17420	0,60	45,5**
17	Sp	Sancti Petri	1917-1960	44	9948	253	29562	0,57	65,7**
18	Sp	Torre Atalaja	1914-1934	51	4317	1620	15603	0,58	45,1**
19	Sp	Barbate	1910-1960	46	16090	3800	43429	0,49	56,9**
20	Sp	Zahara	1910-1936	27	5102	919	18434	0,63	70,0**
21	Sp	Tarifa	1927-1960	34	2686	5	8012	0,53	51,4**
22	Mc	Punta Negra	1936-1960	25	3845	992	12105	0,58	30,1**
23	Mc	Aguas de Ceuta	1940-1960	21	849	45	1858	0,58	32,5**
24	Mc	Principe	1940-1960	21	384	39	1781	0,92	32,3**
25	Tun	Sidi Daoud	1863-1960	98	5071	211	14932	0,65	74,7**
26	Tun	Ras El Ahmar	1905-1941	37	1689	60	9087	0,81	35,8**
27	Tun	Monastir	1894-1926	33	1628	243	7754	0,79	33,8**
28	Tun	Conigliera	1897-1929	33	1894	43	7788	0,73	70,9**
29	Tun	Bordj Khadidja	1903-1929	27	1017	103	5949	0,96	66,0**
30	Sic	Formica	1634-1813	185	2173	275	5763	0,56	71,6**
		"	1878-1960	83	2051	312	6450	0,65	63,4**
31	Sic	Favignana	1634-1813	181	1385	169	5598	0,64	62,1**
		"	1878-1960	83	3549	602	11531	0,67	78,8**
32	Sic	San Giuliano	1711-1806	96	899	38	3990	0,79	69,3**
		"	1885-1914	28	481	47	2195	0,78	31,0**
33	Sic	Asinelli	1904-1929	26	890	143	2870	0,64	48,2**
34	Sic	San Cusumano	1903-1960	58	600	53	2008	0,69	39,8**
35	Sic	Bonagia	1657-1813	156	1040	131	3692	0,62	57,5**
		"	1879-1934	56	793	181	3597	0,63	44,5**
36	Sic	Cofano	1714-1767	27	495	95	1515	0,60	31,2**
37	Sic	Secco	1874-1933	63	500	28	1634	0,70	40,8**
38	Sic	Scopello	1909-1933	25	369	59	1334	0,68	24,7*
39	Sic	San Giorgio	1880-1917	38	543	4	2996	0,89	35,3**
		"	1924-1960	37	257	39	2172	1,22	44,5**
40	Sic	San Elia	1909-1929	21	425	32	1159	0,77	71,0**
41	Sic	Solanto	1909-1929	21	596	133	1339	0,57	31,9**
42	Sic	San Nicola	1909-1929	21	395	9	810	0,62	29,3**
43	Sic	Trabia	1909-1929	21	570	150	1334	0,54	44,1**
44	Sic	Castellamare	1909-1931	23	205	11	2326	1,33	54,0**
45	Sic	Magazzinazzi	1892-1933	42	528	12	3261	0,92	59,6**
46	Sic	Oliveri	1904-1960	57	558	16	2982	0,80	45,0**
47	Sic	Tonno	1885-1960	76	757	1	5125	0,90	45,0**
48	Sic	Marzamemi	1875-1931	57	1706	67	8731	0,79	73,6**
49	Ital	Pizzo	1876-1932	57	1595	46	12037	1,01	40,0**
50	Sard	Saline	1829-1848	20	3015	925	4600	0,40	38,8**
		"	1868-1960	93	1850	101	13467	0,95	75,9**
51	Sard	Flumentorgiu	1829-1848	20	1769	128	3861	0,54	55,0**
		"	1868-1914	49	1283	0	4500	0,74	47,6**
52	Sard	Porto Paglia	1825-1960	136	1826	192	7345	0,72	55,6**
53	Sard	Porto Scuso	1825-1960	136	3155	302	10136	0,63	57,8**
54	Sard	Isola Piana	1828-1960	136	2387	151	9792	0,65	59,6**

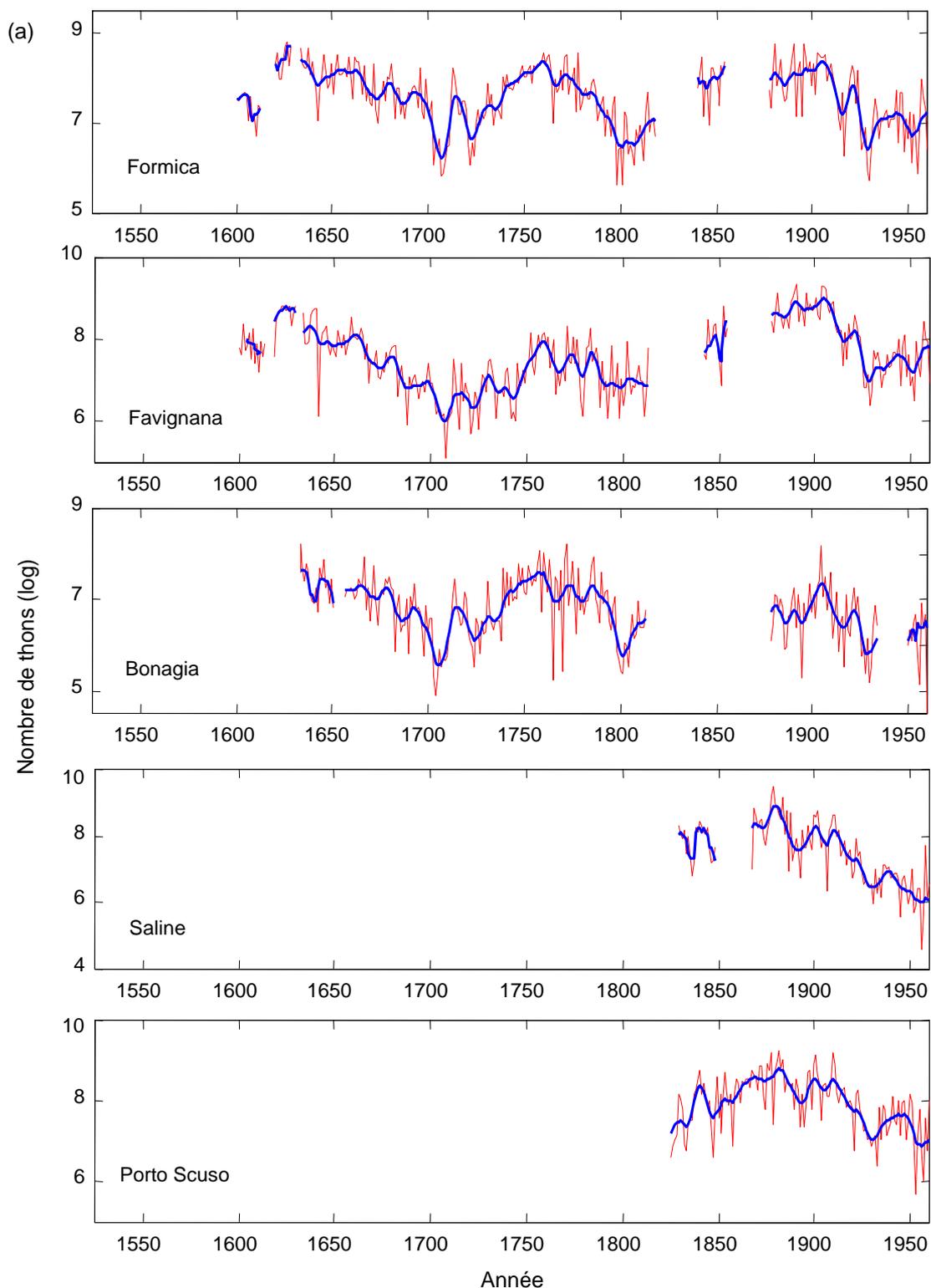


Fig. 2.3 : Exemples de séries temporelles de captures par les madragues

(lignes fines, données log transformées ; lignes épaisses, données lissées).

Données des trois plus longues séries siciliennes (Formica, Favignana, Bonagia) et de deux sardes (Saline et Porto Scuso). Pour les segments de série supérieurs à 20 ans, la tendance est estimée par EVF (voir chapitre I.2), dans les autres cas par une médiane mobile.

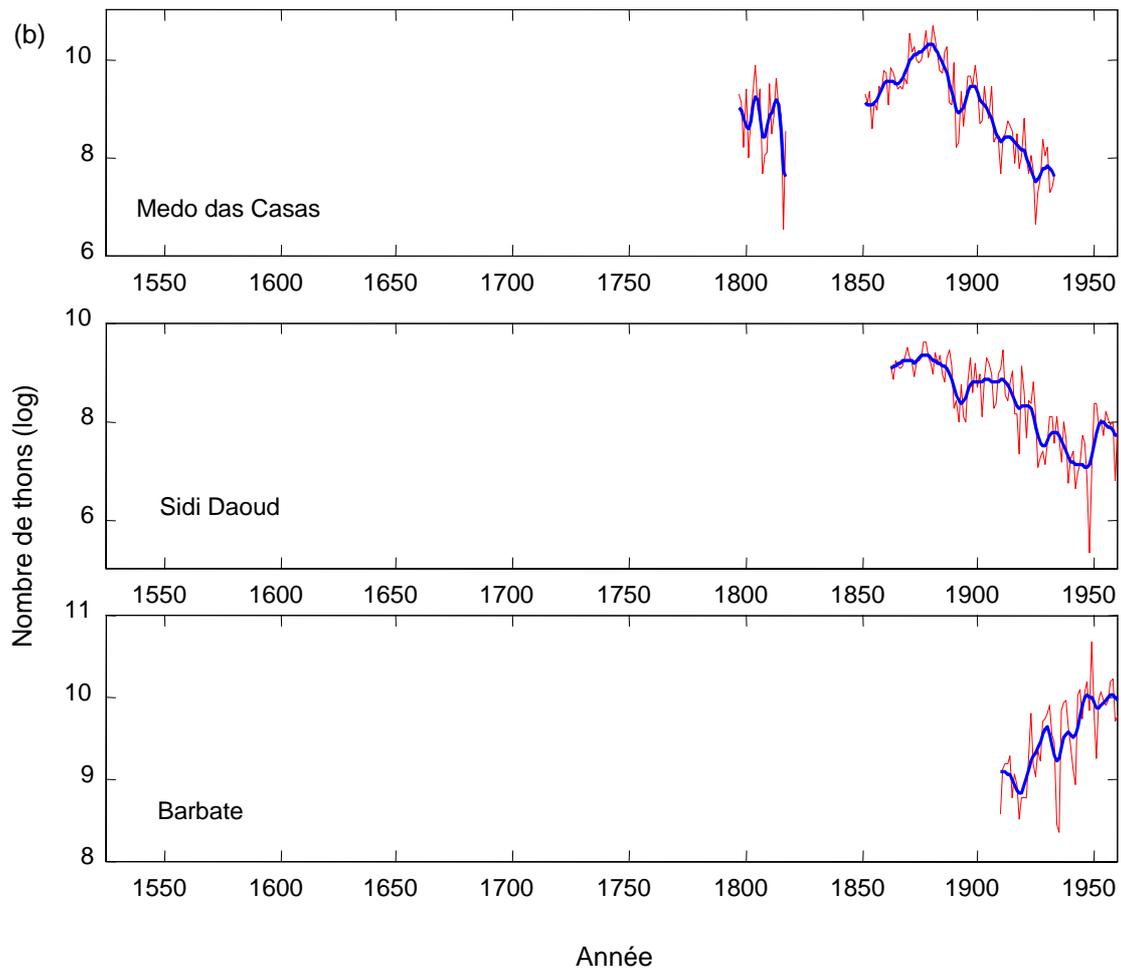


Fig. 2. 3 (suite) : Exemples de séries temporelles de captures par les madragues (lignes fines, données log transformées ; lignes épaisses, données lissées). Captures d'une madrague portugaise (Medo das Casas), d'une tunisienne (Sidi Daoud) et d'une espagnole (Barbate). Pour les segments de série supérieurs à 20 ans, la tendance est estimée par EVF (voir chapitre 1.2), dans les autres cas par une médiane mobile.

1.2. Décomposition du signal temporel

La structure temporelle des 54 séries de captures est analysée en identifiant et en quantifiant les tendances, les cycles et les variations non-cycliques inter-annuelles.

- Fluctuations séculaires

Pour étudier la tendance générale, les différentes séries temporelles sont lissées par la méthode dite du filtrage par les vecteurs propres (en anglais *Eigen Vector Filtering*, EVF, parfois également appelée Analyse en Composantes Principales de Processus, ACP, Colebrook, 1978 ; Ibanez et Dauvin, 1988). Cette méthode consiste à construire, pour chaque série temporelle, une matrice d'autocovariance en décalant les séries de 1 à 5 ans (une fenêtre de lissage de 5 ans permet de retenir les fluctuations moyen à long terme, *i.e.* > à la décennie). Une analyse en composantes principales (ACP, Hotelling, 1933 ;

Jackson, 1986 ; Legendre et Legendre, 1998) est alors conduite sur la matrice d'autocovariance et la première composante fournit le facteur qui résume le maximum de variance, assimilé ici à la tendance de la série.

Une rapide inspection visuelle des séries de captures par les madragues indique clairement des fluctuations périodiques séculaires, soulignées par l'EVF (Fig. 2. 3). Sur les trois plus longues séries (provenant des madragues siciliennes de Formica, Favignana et Bonagia), les périodes de fortes prises (1630-1650, 1750-1770, 1870-1890) alternent avec les périodes de plus faibles captures (1690-1710, 1790-1810, 1930-1940) avec une période de 100-120 ans. Les autres longues séries (Porto Scuso, Isola Piana, Porto Paglia, Medo das Casas) montrent également de telles variations pseudo-cycliques, avec un pic à la fin du XIX^{ème} siècle commun à toutes ces séries.

- Cycles à moyen terme

Une observation plus fine des séries révèle des cycles plus courts d'environ 15 à 25 ans qui se surimposent aux larges fluctuations séculaires (Fig. 2. 3). Pour affiner ces observations et extraire les phénomènes de périodicité secondaire, une analyse dans le domaine des fréquences est conduite.

Des analyses spectrales sont réalisées sur les 12 séries⁽¹⁾ jugées assez longues (> 80 ans) pour pouvoir extraire des fluctuations périodiques de moyen terme. Pour supprimer le signal basse fréquence (*i.e.* les fluctuations séculaires) largement dominant et pouvoir ainsi étudier les signaux de plus hautes fréquences, les séries sont détendencialisées par extraction d'un filtre polynomial d'ordre 5 (Legendre et Legendre, 1998). Les analyses spectrales transforment chaque série temporelle en une somme de fonctions sinus et cosinus de différentes périodes (Wei, 1990). Le périodogramme est l'outil habituel pour résumer cette décomposition. Cependant, il n'est qu'un modeste descripteur statistique de la densité spectrale dans la mesure où il présente une variance importante et qu'il n'est pas consistant (Priestley, 1981). Une fenêtre de lissage de Parzen est donc utilisée (largeur 5). Une ACP est ensuite conduite sur les 12 densités spectrales. Cette technique, uniquement descriptive, permet de mettre en évidence d'éventuels cycles périodiques caractéristiques à travers les 12 séries temporelles (Bjørnstad *et al.*, 1996 ; Fromentin *et al.*, 1997).

Le premier axe de l'ACP représente 66% de la variance totale des 12 spectres : il capture l'essentiel de la variabilité. Ce premier axe montre un pic de variance pour les fréquences de $0,05 \text{ an}^{-1}$ ($0,035$ à $0,07 \text{ an}^{-1}$), soit des périodes d'environ 20 ans (30 à 15 ans, Fig. 2. 4 a). Les 12 spectres sont hautement et positivement corrélés à cet axe (corrélation à l'axe > 0,7), ce qui confirme que ce cycle moyen terme est une caractéristique commune aux 12 séries.

- Variations inter-annuelles

Les deux axes suivants expliquent seulement 13 et 9% respectivement de la variabilité totale et détectent des fluctuations à plus court terme, de périodes différentes selon les séries (Fig. 2. 4 b, c).

⁽¹⁾ Les 2 fractions de séries > 80 ans de Formica et Favignana (voir Tab. 2. 1) comptent chacune pour une série.

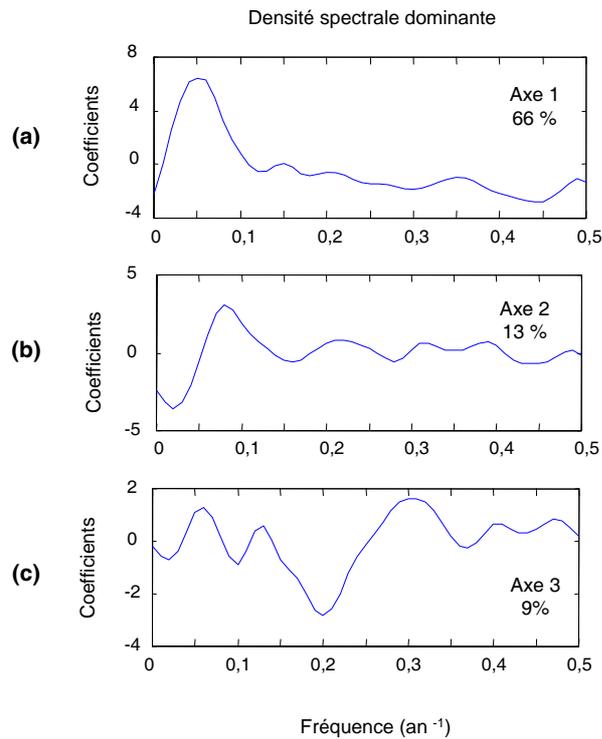


Fig. 2. 4 : Trois premiers axes principaux de l'ACP réalisée sur les densités spectrales des 12 séries de plus de 80 ans.

Le premier axe (a) explique plus de 66% de la variance totale et dessine un pic principal autour de 0,035 à 0,07 an⁻¹, c'est à dire un cycle de 30-15 ans. Les axes suivants (b, c) expliquent seulement 13 et 9% respectivement de la variabilité totale et mettent en évidence des fluctuations à plus court terme.

Ainsi, la variabilité temporelle des séries de captures par les madragues peut se décomposer en trois composantes principales : (i) des fluctuations pseudo-séculaires d'environ 100-120 ans, (ii) des cycles d'environ 20 ans et enfin (iii) des variations inter-annuelles.

I.3. Importance de la tendance

Comme toute méthode de lissage (splines, polynômes, filtre de kernel, LOESS ou moyenne mobile,...), l'EVF permet de faire apparaître la tendance générale d'une série (chapitre I.2). Mais l'EVF permet également d'évaluer quantitativement l'importance de cette tendance, qui est donnée par le pourcentage de variance expliqué par le premier axe de l'ACP. Pour tester la significativité de cette valeur, elle est comparée à celles obtenues par un EVF conduit sur 10 000 séries aléatoires (N(0,1)) de longueur identique.

Le pourcentage de variance expliqué par les fluctuations de moyen et long terme est élevé pour toutes les séries (Tab. 2. 1). La tendance représente en moyenne 51 % de la variance totale des séries, et environ 68 % quand les séries dépassent 80 ans. Pour comparaison, un EVF sur une série aléatoire explique 20 à 25 % de la variabilité ; toutes les tendances apparaissent ici

significatives au seuil de 5 % (Tab. 2. 1). Le pourcentage de variance expliqué par la première composante EVF est évidemment dépendant de la fenêtre de lissage. Celle-ci est choisie égale à 5 ans pour retenir les fluctuations de moyen à long terme. Pour comparaison, une fenêtre de 4 ans conduit à des premières composantes EVF capturant de 1 à 9 % de variance de plus que la fenêtre de 5 ans, une fenêtre de 6 ans de 2 à 8 % de moins. Comme attendu, le pourcentage de variance dû au signal basse fréquence est lié à la longueur de la série ; plus la série est longue, plus ce pourcentage est élevé (Tab. 2. 1, Fig. 2. 5). Mais même si les fluctuations inter-annuelles apparaissent être non négligeables (Fig. 2. 3 a, b), elles restent toujours secondaires en comparaison de la tendance.

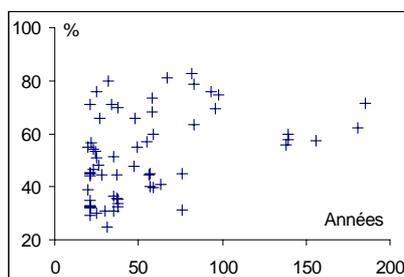


Fig. 2. 5 : Pourcentage de variance expliquée par la première composante EVF en fonction de la longueur de la série.

Ainsi, la décomposition de la variance des séries montre que le signal moyen et long terme compte pour une large part dans la variabilité totale des séries (entre 45 et 80%).

Une telle caractéristique est rarement rapportée, tant en écologie marine qu'en écologie terrestre, probablement simplement à cause d'un manque de séries temporelles de cette longueur (Hjort, 1914 ; Cushing, 1975 ; Hassell *et al.*, 1989). Ceci souligne la nécessité de collecter, d'entretenir et de suivre des séries temporelles d'abondances de populations (ou d'indice d'abondance) sur de longues périodes pour être à même de détecter et de décrire les principales sources de variabilité (Fromentin *et al.*, 1998 ; Bjørnstad *et al.*, 1999).

I.4. Synchronie et échelles spatiales de pertinence

I.4.1 Mise en évidence graphique de tendances parallèles

Les séries étudiées présentent ainsi des fluctuations à long et moyen terme de périodes similaires (100-120 ans et 15-30 ans). Le parallélisme de ces fluctuations est étudié graphiquement pour fournir une première évaluation de la synchronie des fluctuations à l'échelle du bassin méditerranéen. De 1620 à 1700, les 3 séries siciliennes montrent un déclin parallèle, suivi d'un accroissement jusqu'en 1750 et d'un nouveau déclin jusqu'en 1800 (Fig. 2. 3 a). Les séries temporelles couvrant les XIX^{ème} et XX^{ème} siècles montrent également un clair parallélisme, avec des captures faibles au début du XIX^{ème} siècle puis

une tendance croissante de 1850 à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle. S'ensuivent un rapide déclin et un plateau depuis les années 30 jusqu'aux années 50 (Fig. 2. 3 a). Cependant, il n'en est pas de même pour 3 madragues espagnoles, e.g. Barbate (Fig. 2. 3 b, Fig. 1. 24), qui fournissent des captures croissantes de 1920 à 1960.

À l'exception de quelques madragues espagnoles (qui ne couvrent que le XX^{ème} siècle), cette inspection graphique met en évidence des tendances globalement parallèles, indicatives que les fluctuations long terme pourraient être synchrones entre les madragues.

1.4.2 Test de la synchronie

Pour tester la synchronie, des analyses plus fines sont mises en œuvre. A cause de la structure particulière de la base de données (séries de longueur inégale qui ne se recoupent pas forcément), un test global de similarité entre toutes les séries temporelles ne peut être réalisé. Les relations entre les séries sont donc étudiées en trois temps. Une analyse descriptive est tout d'abord conduite, utilisant une ACP, pour résumer le maximum de l'information du tableau de données. Dans un deuxième temps, un test global de concordance est réalisé sur une période bien renseignée (XIX-XX^{ème} siècles) pour gagner une inférence statistique. Enfin, une méthode empruntée aux statistiques spatiales, le corrélogramme modifié de Koenig et Knops, est mise en œuvre pour évaluer les échelles spatiales de la synchronie.

- Analyses en composantes principales

L'ACP résume en quelques dimensions (*i.e.* les axes principaux) le maximum de la variabilité d'un grand nombre de descripteurs et fournit la variance expliquée par chaque axe principal (e.g. Hotelling, 1933 ; Jackson, 1986 ; Legendre et Legendre, 1998). Les ACP sont conduites directement sur les matrices de corrélation, en utilisant le coefficient de corrélation non-paramétrique de Spearman (Zar, 1984) à cause de la non-normalité de certaines séries. Les ACP sont conduites successivement sur les séries log et sur les séries log-détendancialisées (*i.e.* les séries log moins la tendance estimée par EVF), pour tester si la synchronie est due aux tendances seules ou aux tendances et aux fluctuations inter-annuelles. Comme la longueur des séries peut affecter la chance de détecter une synchronie (*i.e.* plus longues sont les séries, meilleur est le diagnostic), les analyses sont d'abord réalisées sur les séries ayant au moins 15 ans en commun puis sur les séries ayant au moins 50 ans en commun. Le premier test permet de comparer un grand nombre de séries, le second de comparer des séries longues.

Une première ACP est réalisée sur la matrice de corrélation des séries se croisant sur au moins 15 ans (Fig. 2. 6 a). Le premier axe de cette ACP capture 38% de la variance totale. 34 des 39 séries sont positivement corrélées avec cet axe. Les séries tunisiennes, siciliennes et sardes sont particulièrement hautement corrélées avec lui (corrélations à l'axe (CA) moyenne $\in [0,32 ; 0,87]$). Les séries portugaises sont également bien corrélées avec ce premier axe, 4 des 6 séries présentant des corrélations $> 0,5$. La plupart des séries espagnoles cependant, sont peu ou sensiblement négativement corrélées avec le premier

axe, Torre Atalaja et Barbate étant les plus extrêmes ($CA = -0,40$ et $-0,51$ respectivement) ; Zahara cependant est clairement positivement corrélée au premier axe ($CA = 0,36$). Il est à noter que les 7 séries mal représentées ou négativement corrélées avec le premier axe ($CA < 0,2$) ne recourent les autres que sur le XX^{ème} siècle et sur une courte période (Fig. 1. 29).

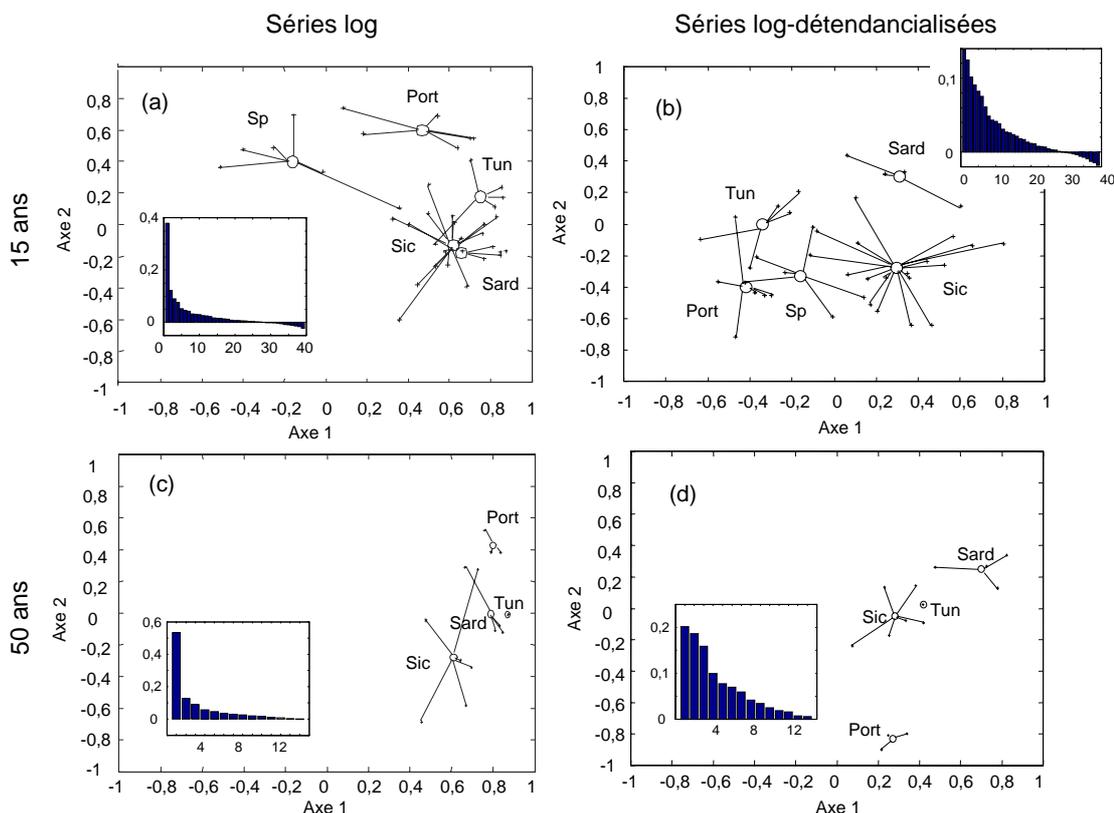


Fig. 2. 6 : Distribution des séries sur les axes 1 et 2 des ACP réalisées sur les matrices de corrélation (i) des 39 séries se recoupant sur au moins 15 ans (a,b) et (ii) des 14 séries se recoupant sur au moins 50 ans (c,d).

Les ACP sont réalisées sur les séries log (a,c) et les séries log-détendancialisées (b,d). Les encarts présentent la part de variance attribuée à chacun des 39 (a,b) et des 14 axes (c,d). Chaque madrague (+) est reliée graphiquement par des lignes au point moyen régional (o), noté 'Sp' pour l'Espagne, 'Port' pour le Portugal, 'Tun' pour la Tunisie, 'Sic' pour la Sicile et 'Sard' pour la Sardaigne.

La seconde ACP est réalisée sur la matrice de corrélation entre séries détendancialisées se recoupant sur au moins 15 ans (Fig. 2. 6 b). Les deux premiers axes expliquent respectivement 14 et 12 % de la variance totale.

Autrement dit, retirer la tendance conduit à une diminution nette du pourcentage de variance expliquée par le premier axe de l'ACP, ce qui semble indiquer que la tendance moyen et long terme est une caractéristique commune à toutes les séries.

Les séries sont organisées sur un plan selon leur origine géographique. L'axe 1 oppose principalement les séries espagnoles, portugaises et tunisiennes aux sardes et aux siciliennes alors que l'axe 2 sépare les séries sardes et tunisiennes des autres.

Les séries marocaines n'apparaissent pas dans ces analyses parce qu'elles ne recoupent les séries portugaises qu'au plus sur 5 ans. Une ACP a cependant été réalisée en croisant 3 séries marocaines, une atlantique et deux méditerranéennes, avec 4 espagnoles, une tunisienne, 6 siciliennes et 4 sardes (résultats non présentés). Les résultats sont très similaires aux précédents, avec les séries marocaines très corrélées aux espagnoles.

Les ACP sur les séries se croisant sur au moins 15 ans permettent de considérer un maximum de séries mais cette échelle de temps est probablement trop courte pour réellement décrire la synchronie entre les fluctuations à long terme. Les mêmes analyses sont donc conduites sur les séries se croisant sur au moins 50 ans (*i.e.* 14 séries). Le premier axe de l'ACP réalisée sur les séries log explique 53 % de la variance totale. Toutes les séries sont clairement positivement corrélées avec lui, les corrélations à l'axe variant de 0,46 pour Bonagia à 0,87 pour Sidi Daoud (Fig. 2. 6 c). Les séries siciliennes, sardes, portugaises et tunisiennes présentent des corrélations à l'axe moyennes de 0,61, 0,79, 0,80 et 0,87 respectivement avec le premier axe. L'ACP réalisée sur les séries détendancialisées ayant au moins 50 ans en commun capture une bien plus faible part de variance (20 et 19 % de la variance totale pour les deux premiers axes respectivement), mais sépare les séries selon leur origine géographique (Fig. 2. 6 d).

Ainsi, les ACP analysant des séries se croisant sur le long terme confirment les premières analyses et supportent l'hypothèse de tendances long terme parallèles.

- Test de Kendall

L'utilisation de l'ACP est appropriée pour décrire graphiquement, sur un jeu de données le plus large possible, les ressemblances/dissemblances entre les séries de captures provenant du pourtour du bassin méditerranéen occidental et du proche Atlantique, mais l'ACP ne fournit aucune inférence statistique. Un test global d'hypothèse est donc conduit pour mesurer la ressemblance (*i.e.* la synchronie) entre séries se recoupant sur une période suffisamment longue (> 50 ans). Comme toutes les séries ne sont pas distribuées normalement, le coefficient non-paramétrique de concordance de Kendall W est utilisé (Kendall, 1948). Le coefficient de concordance de Kendall est une simple transformation des statistiques de Friedman de χ^2 (Friedman, 1937), qui mesure les relations entre k variables ordonnées par rang (*i.e.* les captures des madragues) pour n objets (*i.e.* les nombre d'années disponibles). Le coefficient W varie entre 0 (aucune concordance) et 1 (concordance maximale). Sa significativité est testée en comparant χ^2 à la valeur de χ^2_α pour $\nu = n-1$ degrés de liberté (Sokal et Rohlf, 1995 ; Legendre et Legendre, 1998). L'hypothèse nulle (H_0) est : les sommes des lignes sont égales, ou, en d'autres mots, les k jeux de rang sont indépendants les uns des autres. Etant donnée la structure particulière du jeu de données, le test est réalisé sur 14 séries temporelles qui se recoupent sur plus de 50 ans pendant les XIX^{ème} et XX^{ème} siècles (1879-1931, soit 53 ans sans périodes manquantes). Il considère trois séries portugaises (Medo das Casas, Livramento et Barril), une tunisienne (Sidi Daoud), six siciliennes dont Formica et Favignana ainsi que les quatre séries sardes Saline, Porto Scuso, Porto Paglia et Isola Piana et permet ainsi de comparer les pôles est (Tunisie, Sicile et Sardaigne) et ouest (Portugal).

Considérant le test sur les séries log, l'hypothèse nulle est rejetée au seuil 1% ($W = 0,37$, $p < 0,01$) : toutes les séries testées sont significativement corrélées. En revanche, le test sur les séries log-détendancialisées ne permet pas de rejeter l'hypothèse nulle ($W = 0,07$, $p > 0,05$).

Ainsi, les tendances long terme des captures des madraques sont, sur la période fin XIX^{ème} – début XX^{ème} siècle, significativement corrélées à l'échelle du bassin méditerranéen occidental alors que les fluctuations inter-annuelles ne le sont pas cette échelle.

- Corrélogrammes modifiés de Koenig et Knops

Les ACP faites sur les séries détendancialisées mettent cependant en évidence des groupes géographiques pertinents, *i.e.* les séries d'une même région sont plus corrélées entre elles qu'avec celles de séries de régions différentes. Ces résultats peuvent donc traduire la présence d'une structuration spatiale régionale de la variabilité à court terme, qui est explorée *via* le corrélogramme modifié de Koenig et Knops (1998).

Cette technique fournit un test statistique qui mesure si les changements temporels entre sites éloignés d'une distance donnée tendent à varier de manière synchrone, *i.e.* présentent un coefficient de corrélation (r) moyen plus grand que zéro. Cette technique dérive des statistiques de Mantel mais à la différence du corrélogramme de Mantel (Sokal, 1986 ; Legendre et Fortin, 1989), qui teste les corrélations entre sites d'une classe de distance par rapport au degré de corrélation moyen de l'ensemble des sites, ce "corrélogramme modifié" permet d'évaluer l'extension géographique de l'autocorrélation spatiale et la signification statistique de l'autocorrélation entre sites éloignés d'une distance donnée.

Pour réaliser les corrélogrammes modifiés, les corrélations (r) sont tout d'abord calculées entre chaque paire de sites, en utilisant le coefficient de corrélation de Spearman. Les corrélations sont alors divisées en classes de distance appropriées selon la distance géographique (ligne directe) entre les sites. Entre chaque catégorie, les corrélations sont testées en réalisant des tirages dans lesquels les jeux de corrélations sont choisis au hasard dans un parc entier de telle manière que chaque site ne soit utilisé qu'une seule fois. Par exemple, si la corrélation entre A et B est choisie, toutes les autres combinaisons impliquant soit A soit B (*i.e.*, pas seulement la corrélation entre A et B mais aussi entre A et C, A et D, B et C, *etc.*) sont éliminées du parc restant de valeurs disponibles. Cette procédure est poursuivie jusqu'à ce que toutes les combinaisons soient conduites et la corrélation moyenne est alors calculée. Après 1000 tirages, l'inférence statistique est déterminée en utilisant la valeur z standard.

Comme les tests ont été réalisés sur plus d'une catégorie de distance, une correction pour comparaison multiple doit être appliquée. En effet, lorsque des tests sont répétés plusieurs fois et indépendamment entre 2 échantillons (corrélations, régressions,...), le risque $\alpha^{(1)}$ devient supérieur au risque théorique.

⁽¹⁾ Le niveau de significativité, ou valeur α , établi *a priori*, est la probabilité de commettre l'erreur de type I, *i.e.* de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie. En d'autres termes, lorsque le seuil de significativité de 0,05 est choisi, 5 comparaisons sur 100 valeurs peuvent être significatives du seul fait du hasard, *i.e.* être considérées significatives alors qu'en réalité (*i.e.* dans la population), elles ne le sont pas.

Le seuil α retenu pour un test unique n'est donc plus valable lorsqu'un test multiple est conduit. Plusieurs méthodes existent pour corriger ce seuil (Legendre et Legendre, 1998 ; Peres-Neto, 1999). La méthode la plus directe et la plus simple est la correction de Bonferroni, pour k tests indépendants. Elle consiste à remplacer le seuil de significativité α par un seuil ajusté $\alpha' = \alpha/k$ et à comparer les p_i probabilités à α' . Malheureusement, en utilisant un si petit α , la gamme d'acceptation devient trop large et un grand nombre d'erreurs de type II (*i.e.* accepter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fautive) peuvent être commises (Legendre et Legendre, 1998). La méthode séquentielle de Bonferroni (Peres-Neto, 1999) pour les tests non-indépendants est donc utilisée⁽¹⁾. Cette méthode procède en ordonnant les k probabilités obtenues ($p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_i \dots \leq p_k$) puis en les comparant avec l'inégalité $p_i \leq \alpha/(1+k-i)$. Lorsque l'inégalité est fautive, alors la valeur n'est pas considérée significative au seuil de 5 %.

Pour tester si la synchronie est due uniquement aux tendances ou à la fois aux tendances et fluctuations inter-annuelles, les analyses sont réalisées successivement sur les séries log et les séries log-détendancialisées. Comme pour l'ACP, les analyses sont d'abord réalisées sur les séries ayant 15 ans en commun, puis sur les séries ayant au moins 50 ans en commun. Le premier jeu d'analyses permet de comparer un plus grand nombre de séries, tandis que le second permet de comparer les plus longues séries temporelles.

Le premier corrélogramme, réalisé sur les séries log se recoupant sur au moins 15 ans, met en évidence que quelles que soient les distances entre madragues, toutes les séries sont positivement corrélées entre elles (Fig. 2. 7 a, b). Les séries de madragues distantes de moins de 750 km, *i.e.* à l'intérieur du groupe sarde-sicilien-tunisien d'une part, du groupe Gibraltar d'autre part, sont particulièrement et significativement, positivement corrélées (r moyen = 0,4, $p < 0,01$, Fig. 2. 7 a). Les corrélations moyennes entre séries temporelles des deux groupes sont, cependant, faibles et non significatives (r moyen $\in [0,06 ; 0,11]$). Un second corrélogramme est alors réalisé entre séries détendancialisées se recoupant sur au moins 15 ans (Fig. 2. 7 b). Les séries apparaissent significativement corrélées seulement jusqu'à 200 km de distance (r moyen = 0,21), les séries distantes de 700 km étant faiblement ou pas corrélées (r moyen $\in [-0,14 ; 0,05]$). Retirer la tendance conduit donc à une chute significative de l'autocorrélation spatiale, ce qui indique que la tendance long terme est la caractéristique commune à toutes les séries. Cependant les résultats mettent en évidence une structure régionale de la variabilité à court terme : les fluctuations inter-annuelles (< 15 ans) apparaissent synchrones à une échelle locale (< 200 km), *i.e.* à l'intérieur de chaque zone mise en évidence par la classification (Portugal, Espagne-Maroc, Tunisie, Sicile, Sardaigne, voir première partie, chapitre III.3).

⁽¹⁾ La méthode séquentielle de Bonferroni est également connue sous le nom de procédure de Holm (1979), lorsqu'elle est formulée en terme d'ajustements successifs des probabilités individuelles plutôt que de corrections du seuil de significativité α .

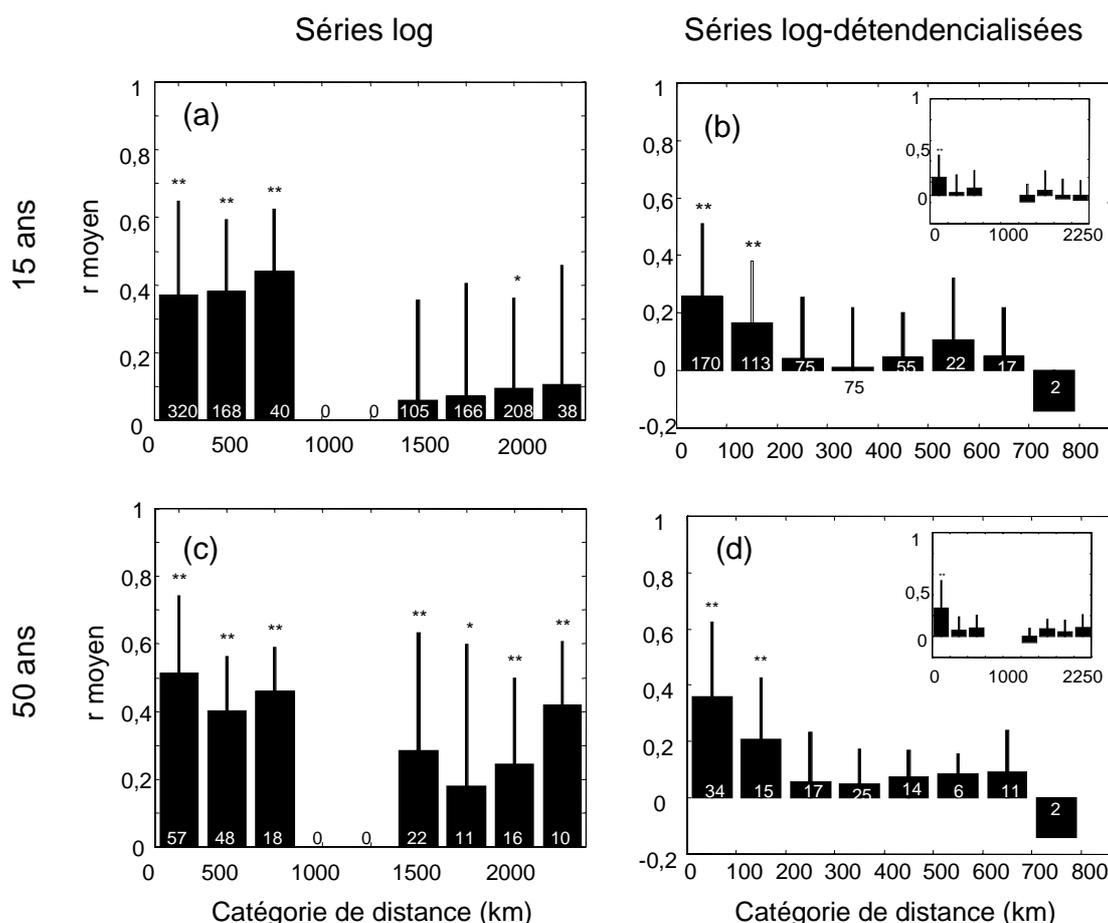


Fig. 2. 7 : Corrélogrammes modifiés de Koenig et Knops

réalisés sur les séries log (a, c) et les séries log-détendancialisées (b, d), se recoupant sur au moins 15 ans (a, b) ou 50 ans (c, d), *i.e.* 1045 et 182 comparaisons respectivement. Les comparaisons sont divisées en catégories de distance de 250 km pour a, c et les encarts de b et d, et en catégories de 100 km pour b et d. Le nombre de comparaisons est indiqué pour chaque catégorie de distance. Les corrélations moyennes (+ l'écart type) sont figurés. La significativité est indiquée * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$. Les séries non détendancialisées sont significativement corrélées sur l'ensemble du bassin méditerranéen occidental, alors que les séries détendancialisées ne le sont que pour les distances < 200 km.

Les analyses entre séries ayant au moins 15 ans en commun permettent de prendre en compte un maximum de séries mais 15 ans sont trop courts pour décrire la synchronie entre fluctuations à long terme. Les corrélogrammes sont donc réalisés entre séries ayant au moins 50 ans en commun (Fig. 2. 7 c, d). Les séries log montrent une autocorrélation spatiale significative à travers toute la zone étudiée. Quelle que soit la distance géographique entre elles, les séries sont significativement positivement corrélées, avec un r moyen $\in [0,41 ; 0,50]$, au sein des groupes (*i.e.*, madragues de la zone est méditerranéenne, et madragues de la zone ouest-Méditerranée/proche Atlantique), et un r moyen $\in [0,18 ; 0,42]$ entre groupes (madragues du groupe sarde-sicilien-tunisien contre les madragues de la zone Gibraltar). Le corrélogramme sur les séries

détendancialisées montre qu'elles sont toutes positivement corrélées jusqu'à 200 km de distance. Ainsi, les corrélogrammes sur les séries long terme mettent en évidence une synchronie entre tendances à long terme et confirment que la variabilité à court terme est simplement structurée à une échelle < 200 km.

En conclusion, les fluctuations à long et moyen terme s'avèrent bel et bien synchrones à l'échelle du bassin méditerranéen occidental et du proche Atlantique, alors que celles à court terme ne le sont que dans un rayon de 200 à 250 km (Fig. 2. 7).

Les résultats de toutes les analyses, empruntées à différents groupes statistiques (statistiques descriptives, inférentielles, spatiales), concordent et permettent de valider l'hypothèse de synchronie : les fluctuations à long et moyen terme sont synchrones à l'échelle du bassin méditerranéen et du proche Atlantique ; les variations à court terme, en revanche, ne le sont qu'à une échelle locale.

II. Les fluctuations des captures : *de bons indicateurs des fluctuations d'abondance ?*

Les séries à long terme de captures par les madragues pourraient apporter de précieux renseignements sur la dynamique de population du thon rouge... s'il s'avérait que ces fluctuations de captures constituent de bons indicateurs des fluctuations à long terme des abondances de thon rouge migrant sur le proche Atlantique et la Méditerranée.

Ce chapitre explore la question en deux temps. Dans un cadre théorique donné, la capture étant supposée reliée à la biomasse du stock par la relation $C = qEB$ (où B est la biomasse du stock, E l'effort de pêche et q la capturabilité, Hilborn et Walters, 1992), les variations des paramètres d'effort et de capturabilité peuvent potentiellement jouer un rôle dans les fluctuations. Ces paramètres sont donc examinés dans un premier temps. Ensuite, la question est testée en utilisant le jeu de données pour vérifier le postulat suivant : si les fluctuations des captures sont représentatives des fluctuations d'abondance, elles doivent évoluer de la même façon tout autour du bassin méditerranéen et du Proche Atlantique. En effet, si les fluctuations reflétaient des événements extérieurs à la population (variations locales de l'environnement, de changements de capturabilité...), elles n'auraient *a priori* aucune raison d'être synchrones à plus de 2 000 km de distance.

II.1. Arguments liés à la nature des données

Plusieurs indices, liés au développement et à la nature passive du système d'exploitation par les madragues, laissent supposer que les captures sont reliées à la biomasse du stock par un facteur relativement constant sur le long terme.

II.1.1 Variations de l'effort de pêche

Deux paramètres principaux peuvent être à l'origine de variations de l'effort de pêche du système atlanto-méditerranéen de la madrague : une évolution technologique des engins de pêche et/ou un développement de la pêcherie (évolution du nombre de madragues en activité).

Comme nous l'avons montré dans la première partie (chapitre II), la madrague est un engin passif dont la technologie a très peu évolué depuis le Moyen-âge jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. Sa nature même d'installation fixe conditionne ses dimensions et les limites de son rendement et sa conception relativement simple (ensemble de filets, de flotteurs, de cordages et d'ancres) n'a permis que très peu d'innovations techniques au cours des siècles (passage de filet en chanvre à des filets de nylon, optimisation de la taille des mailles et de l'installation,...) qui n'ont en rien révolutionné la pêcherie. Nous pouvons supposer de plus qu'une évolution technologique conduisant à une

augmentation de la productivité n'aurait pas vu de retour en arrière et est donc peu susceptible d'expliquer à elle seule des fluctuations dans les captures de l'ampleur de celles qui sont observées. Doumenge (1998) souligne par ailleurs que l'adoption de chaloupes à vapeur dès 1870 aurait permis d'augmenter le nombre de *mattanzas* et d'évacuer des prises plus importantes. Si ce progrès technique a certainement facilité les manœuvres, son effet sur la productivité est sans doute resté limité, le nombre de *mattanzas* et l'évacuation des prises étant des facteurs bien moins limitants que la probabilité de voir les thons se diriger vers un filet en particulier. Enfin, l'habileté d'un *Raïs* (chef des pêcheurs) peut également avoir une influence sur les rendements des madragues mais il s'agit alors de variations à petite échelle temporelle comme géographique.

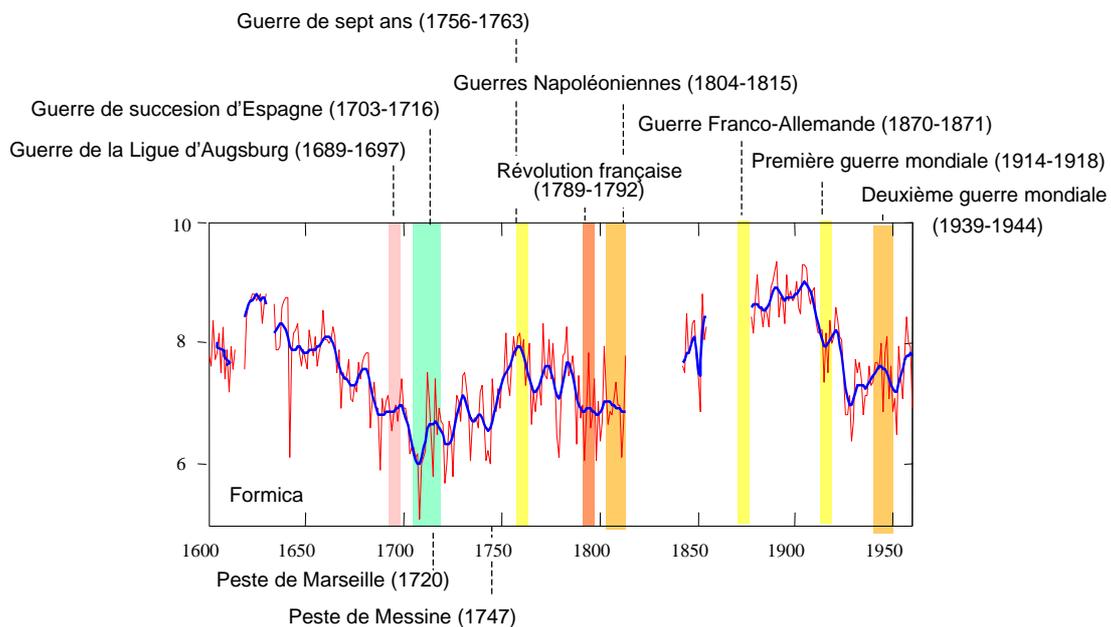


Fig. 2. 8 : Evènements de société et captures (log) de la madrague de Favignana (Sicile).

Le nombre de madragues en activité a varié au cours des siècles mais les principales madragues, celles qui généraient des productions significatives, sont restées en nombre relativement constant sur la période étudiée (première partie, chapitre II). Un filet endommagé, un défaut de main d'œuvre ou la difficulté à réunir les fonds nécessaires ont pu remettre en question leur calaison une année donnée mais il s'agit alors de variations à court terme. Des événements de société (guerres, épidémies, changements dans le commerce et l'industrie,...) peuvent également avoir influencés la pêche (Leroy Ladurie, 1983 ; Hersart de la Villemarqué, 1995 ; Binet, 1999, Fig. 2. 8). On ne peut pas exclure, par exemple, toute l'influence de la guerre de succession d'Espagne (1703-1716), qui a eu des répercussions jusqu'en Sicile et en Sardaigne avec la fin de l'hégémonie espagnole et le développement de l'influence autrichienne, sur les saisons de pêche de Conil, Zahara, Formica, Favignana ou Bonagia en 1703-1704 (Fig. 1. 19, Fig. 2. 3). La littérature avance également différents événements susceptibles d'avoir influencé le développement de la pêche.

Rubino (1995) par exemple explique que le secteur italien des pêcheries thonières entre en crise à la fin du XIX^{ème} siècle à cause de la concurrence des pêcheries espagnoles et portugaises, situées plus précocement sur le passage des thons et où se développent des conserveries de thons dont les produits à bas prix envahissent le marché italien (c'est d'ailleurs ce qui conduit le roi Umberto 1^{er} à créer la *Commissione Reale per le Tonnara* à l'intention de laquelle est écrit le rapport de Pavesi, 1889). Conte (1985) avance des relargages de boues par des industriels, qui troublent l'eau et salissent les filets, pour expliquer la décadence des madragues sardes à partir de 1880. Cependant, de tels événements sont rarement concomitants entre les différents pays de la zone étudiée et les événements communs sont vraiment trop courts pour expliquer de larges fluctuations. De plus, aucune information de la littérature n'indique que des événements historiques et économiques ont pu influencer les pêcheries sur des décennies ou des siècles (Hjort, 1914 ; Hersart de la Villemarqué, 1995). Enfin, si le nombre de madragues a pu chuter lors de périodes de crise (lorsque les prises se raréfiaient), traduisant une diminution globale de l'effort de pêche sur la population et entraînant de ce fait une augmentation des captures sur les madragues subsistantes, cela a pu lisser les variations dans les captures mais certainement pas les créer.

La pêcherie espagnole, cependant, a été moins stable qu'ailleurs (encadré 6). Tout d'abord, les sennes de plage ont été utilisées jusqu'au début du XIX^{ème} siècle, puis alors seulement remplacées par les madragues. Ensuite, l'aristocratie a conservé ses droits sur les madragues jusque vers 1815, puis les madragues ont été vendues et dispersées entre de nombreux propriétaires. De 1804 à 1880, leur nombre a ainsi varié entre une quinzaine et une quarantaine le long des côtes espagnoles méditerranéennes et atlantiques (Berthelot, 1869 ; Pavesi, 1889 ; Belloc, 1961). Franco a restauré des droits d'exploitation exclusifs dans les années 1930-1940, ce qui a conduit à une réduction du nombre de madragues autour d'une dizaine. Ce changement local pourrait expliquer pourquoi les captures des madragues espagnoles augmentent de 1930 à 1960, alors que les captures des autres madragues restent approximativement constantes. Malheureusement, on ne dispose pas des captures espagnoles pendant le XIX^{ème} siècle, qui auraient permis de tester cette hypothèse. On peut noter cependant que les deux séries temporelles de captures par les sennes de plage espagnoles couvrant les XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, Zahara et Conil (Fig. 1. 19), tendent à montrer des fluctuations parallèles avec les séries siciliennes disponibles à la même période (Fig. 2. 3).

Tout ceci suggère les variations d'effort sont peu susceptibles d'être à l'origine des larges fluctuations observées à l'échelle de l'étude (près de 4 siècles de données). Cependant, les événements cités peuvent affecter la variabilité à court terme (< 20 ans), sur une échelle spatiale plus réduite, qui pourrait participer à expliquer les fluctuations inter-annuelles synchrones à une échelle < 200 km (Fig. 2. 7).

II.1.2 Variations de la capturabilité

Des variations de la capturabilité peuvent également potentiellement être à l'origine de fluctuations dans les captures. Ainsi, des variations locales des facteurs de l'environnement (vent, courant, température,...) et/ou un changement de comportement des thons qui passent plus au large une année (présence d'une espèce prédatrice,...) peuvent avoir une influence sur les

rendements des madragues. Cependant, ces changements relèvent de la petite échelle (variations locales et inter-annuelles) et ne sont pas à même d'expliquer de larges fluctuations temporelles, synchrones à l'échelle du bassin méditerranéen et du proche Atlantique. Ils peuvent en revanche également contribuer à expliquer les fluctuations inter-annuelles synchrones observées à échelle locale.

Il est possible en revanche que l'augmentation des perturbations anthropiques au cours du XX^{ème} siècle ait influé sur les conditions de la pêche. Scaccini et Paccagnella (1965a) soulignent par exemple que le développement du trafic côtier motorisé, de la pêche au lamparo (qui éloignerait les thons de la côte), et en dernier lieu d'hypothétiques pollutions des eaux côtières, ont pu entraîner la baisse de production des madragues siciliennes au début du siècle. Cependant, encore une fois, ces variations ne peuvent contribuer à expliquer que la dernière chute observée dans les captures et non pas les trois siècles de fluctuations.

Ceci suggère que, jusqu'au début du XX^{ème} siècle au moins, l'effort de pêche et la capturabilité n'aient pas connu de fluctuations à long ou moyen terme susceptibles d'expliquer les variations > 20 ans observées dans les captures. Celles-ci pourraient donc être directement liées à des fluctuations de la population disponible à la pêche en Méditerranée et sur le proche Atlantique. En ce sens, les madragues pourraient être considérées comme des engins d'échantillonnage qui captureraient chaque année une proportion comparable de la population de thon rouge migrante en Méditerranée.

II.2. Validation par l'analyse des séries

Au début du siècle, Buen (1925) remarquait la concordance des fluctuations des séries de captures des côtes sud atlantique espagnoles, et Sella (1929a, 1929b) celles de quelques séries de captures du Portugal, de Sardaigne, de Tunisie et de Sicile (Fig. 2. 9). Fromentin *et al.* (2000) ont confirmé, par des analyses de corrélation, l'occurrence de variations à long terme similaires parmi cinq séries de captures alors disponibles.

Le synchronisme des variations de captures est vérifié ici, en considérant un jeu de données bien plus étoffé (54 séries à long terme), provenant de l'est comme de l'ouest du bassin méditerranéen occidental. L'inspection visuelle des séries et les résultats des différentes analyses explorant le synchronisme montrent que les fluctuations à long et moyen terme des captures disponibles sont parallèles tout autour du bassin méditerranéen occidental et du proche Atlantique (I.4). Les informations qualitatives de la littérature corroborent ces résultats pour les périodes et/ou régions non renseignées dans la base de donnée : les indications de Berthelot (1869), soulignant un déclin au début XIX^{ème} siècle, tendent à confirmer le synchronisme des séries espagnoles avec les siciliennes. Pavasi (1889) lui, mentionne des captures en baisse dès la fin du XVIII^{ème} siècle en Algarve, soit un déclin simultané à celui observé dans les séries siciliennes. Enfin, Neuparth (1925, pour le Portugal) souligne que « *la pêche a été très mauvaise de 1845 à 1852, le thon ayant presque disparu* ».

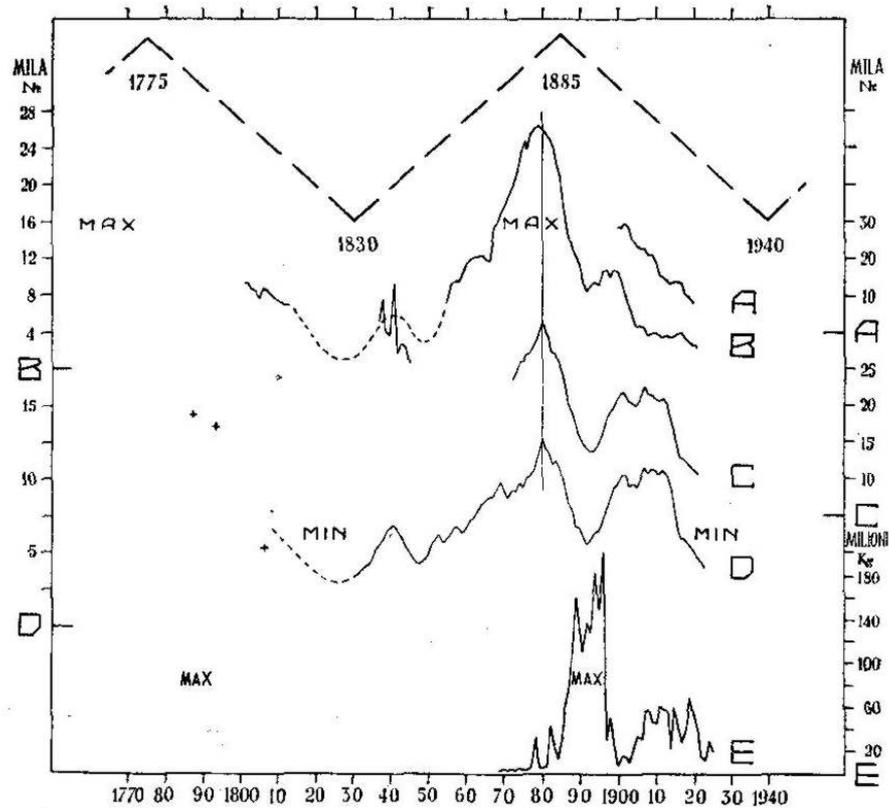


Fig. 2. 9 : Concordance de quelques séries de captures, d'après Sella (1929b).

Diagramme des rendements, lissés sur 9 années, des madragues de : A, groupe de Tavira (Portugal) ; B, Medo das Casas (Portugal) ; C, Sidi-Daoud (Tunisie) ; D, Porto Scuso + Isola Piana (Sardaigne). E, du hareng près de Bohuslän (Johansen), données non lissées.

Or seules les madragues qui capturent des reproducteurs ont été considérées et il est admis que les thons reproduisent sensiblement chaque année le même trajet migratoire : si les madragues ne capturaient qu'une part non-représentative de la population, il n'y aurait aucune raison que les fluctuations des captures apparaissent synchrones à l'est comme à l'ouest du bassin méditerranéen. Nos résultats tendent ainsi à confirmer l'hypothèse selon laquelle les fluctuations des captures par les madragues constitueraient de bons indices des fluctuations d'abondance de la population de thon rouge migrant en Méditerranée et sur le proche Atlantique chaque année.

Ainsi, s'appuyant sur un postulat de bon sens (*si les fluctuations des captures sont représentatives des fluctuations d'abondance, elles doivent évoluer de la même façon tout autour du bassin méditerranéen et du Proche Atlantique*), la vérification du parallélisme des séries à l'échelle du bassin méditerranéen permet de valider l'hypothèse de base sur laquelle se fondera la suite de ce document : les fluctuations à long terme des captures par les madragues constituent de bons indices des fluctuations à long terme des abondances de la population de thons rouges migrant en Méditerranée pour se reproduire.

II.3. Indice synthétique des fluctuations d'abondance

Un indice synthétique est calculé pour représenter les fluctuations temporelles à long terme de l'abondance de la population de thon rouge migrant en Méditerranée et sur le proche Atlantique. Une telle série résumée peut être classiquement réalisée en conduisant une ACP sur toutes les séries puis en extrayant le premier axe, *i.e.* le schéma temporel dominant (ou le schéma moyen) partagé par toutes les séries de captures. Cependant, une telle méthode requiert des longueurs identiques et une même date initiale pour toutes les séries, ce qui n'est pas le cas ici. Une méthode plus simple a donc été retenue : chaque année, une moyenne des valeurs centrées réduites des séries disponibles est réalisée. Cette procédure n'est pas totalement satisfaisante d'un point de vue statistique car l'intervalle de confiance autour de chaque valeur est différent (Fig. 1. 29). Chaque point n'ayant pas le même degré de liberté, la série n'est pas totalement cohérente. Cependant, le propos est simplement descriptif et non inférentiel. Un EVF a été mis en œuvre sur cette série résumée pour dépeindre les fluctuations long et moyen terme. Pour éviter les périodes soumises à discussion (II.1), la série synthétique a été construite sur la période restreinte 1600-1900.

La tendance de cette série, qui explique 76,1 % de la variance totale, peut résumer les fluctuations long terme d'abondance du thon rouge en Méditerranée de 1600 à 1900, *i.e.* trois pseudo-cycles séculaires avec des pics autour de 1620, 1760 et 1880 et des creux autour de 1700 et 1810, sur lesquels des cycles d'environ 20 ans se surimposent (Fig. 2. 10).

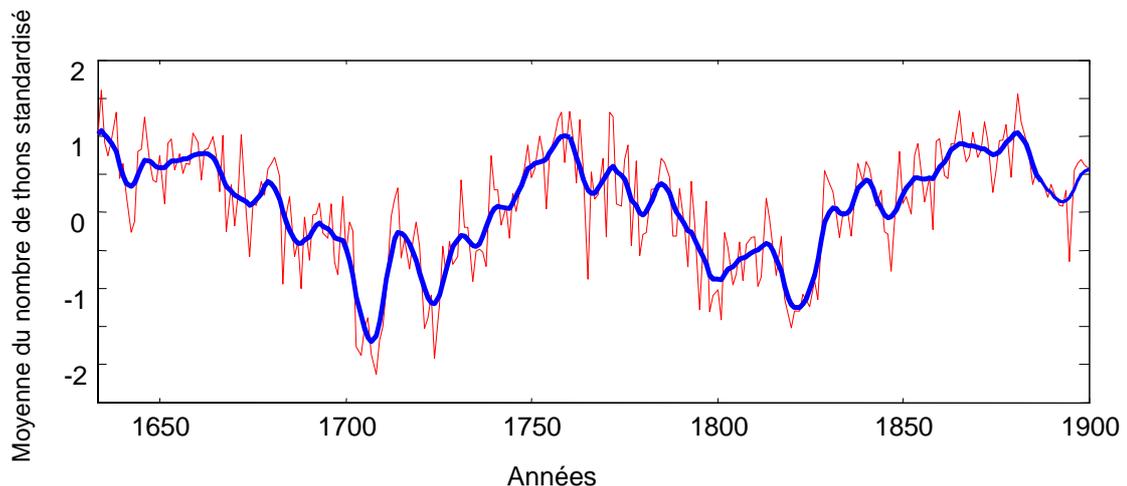


Fig. 2. 10 : Série synthétique (en gras) estimée par EVF sur la moyenne des valeurs standardisées des différentes séries (trait fin) :

un indice des fluctuations à long et moyen terme de thon rouge migrant en Méditerranée.

Origine des fluctuations

*“ Le hasard,
c'est le purgatoire de la causalité.”
Jean Baudrillard*

Introduction

La question de l'origine des fluctuations observées dans les captures des madragues intrigue les scientifiques depuis plus d'un siècle. Les hypothèses les plus couramment avancées concernent essentiellement la variabilité à court terme des captures. Celles-ci sont généralement expliquées par des changements dans les conditions océanographiques locales (Bragança, 1899 ; Roule, 1918 ; Buen, 1925 ; Sella, 1929a ; Rodriguez-Roda, 1970a, 1970b), ou au XX^{ème} siècle, par des perturbations anthropiques et/ou la pollution environnementale (Scaccini et Paccagnella, 1965a ; Conte, 1985). Plus intéressantes sont les hypothèses concernant les tendances à plus long terme, et *a priori* les fluctuations d'abondance. La sur-exploitation a été incriminée régulièrement dans les périodes décroissantes des cycles de production (e.g. dès 1757, Sarmiento, ou encore Berthelot, 1869). Plus imaginaire, Sella (1929a) a proposé l'hypothèse de changements migratoires, avec un nombre de thons passant Gibraltar qui pourrait varier dans le temps. Rodriguez-Roda (1965, 1966a), s'appuyant sur les nouveaux paradigmes écologiques, suggérait que les fluctuations puissent résulter de processus intrinsèques ou aléatoires. Enfin, certains auteurs, constatant que différents stocks présentaient des fluctuations de périodicités similaires, ont émis l'hypothèse d'une origine naturelle, *i.e.* de fluctuations naturelles du stock, liées à des changements environnementaux à grande échelle (e.g. sardines de l'Adriatique et thon rouge, Zupanovic *et al.*, 1983). La plupart de ces hypothèses, cependant, ont été émises d'après l'examen de quelques séries, et sans le recul permis dorénavant avec les séries de près de quatre siècles. De plus, aucune de ces hypothèses n'a été plus amplement investie, notamment en la testant avec des critères objectifs (e.g. mesures du niveau d'exploitation, indices environnementaux...).

Cette troisième partie aborde la question des processus sous-jacents aux fluctuations de la population de thon rouge, en utilisant des séries à long terme pour prendre en compte un maximum de la variabilité. Dans un premier temps, les différents processus potentiels, ainsi que leurs échelles de pertinence attendues, sont évoqués. L'hypothèse d'un forçage climatique à grande échelle est ensuite testée en utilisant différents indices environnementaux à long terme.

I. Les processus potentiels

Comprendre comment et pourquoi les populations naturelles fluctuent dans le temps et l'espace constitue l'un des enjeux majeurs de l'écologie (Krebs, 1972 ; May, 1976 ; Lundberg *et al.*, 2000). Depuis près d'un siècle, les écologistes débattent de l'importance relative des divers facteurs gouvernant la dynamique des populations. Pour résumer simplement, la première hypothèse à succès a promu l'influence des processus extrinsèques. Dans les années 50-60, le "paradigme de densité-dépendance" (Krebs, 1972) l'a remplacé et s'est imposé, appuyé, à la fin des années 70, par le "cri du cœur" de May (1976) sur l'existence potentielle d'une dynamique complexe même dans les modèles les plus simples. Cette hypothèse a conduit, dans les années 80, à la prise en compte de la non-linéarité et du chaos. Au cours de la dernière décennie, les études ont porté (i) sur l'impact du forçage climatique à grande échelle et (ii) sur les modèles stochastiques non-linéaires combinant les théories déterministes non linéaires et les théories stochastiques linéaires (Bjørnstad et Grenfell, 2001). Les études récentes cherchent à synthétiser ces approches pour comprendre comment les fluctuations émergent de l'interaction entre variations stochastiques, forçage climatique et dynamique non-linéaire. Bien que l'importance relative de ces différentes composantes diffère entre systèmes (terrestre et marin, vertébré et invertébré, cycles de vie simple et complexe), il est maintenant admis que toutes contribuent et inter-agissent, à différentes échelles de temps et d'espace (Turchin, 1999 ; Lundberg *et al.*, 2000 ; Bjørnstad et Grenfell, 2001).

En ce qui concerne les populations marines exploitées, trois principaux facteurs sont classiquement avancés pour jouer un rôle dans la dynamique : (i) l'activité humaine, principalement à travers la sur-exploitation et la pollution des zones de ponte et des nurseries (*e.g.* Cook *et al.*, 1997 ; Jennings *et al.*, 1998 ; Hutchings, 2000), (ii) les variations du recrutement (*e.g.* Hjort, 1914, 1926 ; Bailey et Houde, 1989 ; Myers et Cadigan, 1993 ; Fortier et Villeneuve, 1996) et (iii) les événements climatiques (*e.g.* Cushing et Dickson, 1976 ; Southward *et al.*, 1988 ; Dickson et Brander, 1993 ; Alheit et Hagen, 1997 ; Lehodey *et al.*, 1997). Ces facteurs sont détaillés ici, en soulignant leurs échelles de pertinence.

I.1. Variations de l'effort de pêche et/ou de la capturabilité

Le premier facteur couramment envisagé pour expliquer les variations d'un stock, est la pêche elle-même (*e.g.* pour les pêcheries d'Atlantique Nord, Myers *et al.*, 1996 ; Cook *et al.*, 1997). L'exploitation induit évidemment une certaine déplétion dans la biomasse du stock reproducteur. Celle-ci est supposée décliner plus ou moins graduellement lorsque l'exploitation s'intensifie, mais la relation est souvent complexe et non-linéaire.

L'intensification de l'exploitation du thon rouge par les madragues a régulièrement été avancée dans la littérature historique pour expliquer les chutes de production (e.g. Berthelot, 1869). Cependant, nous avons déjà démontré ici (deuxième partie, chapitre II.1) que la stabilité relative de l'effort de pêche sur la période étudiée et les variations inter-annuelles de la capturabilité étaient peu à même d'expliquer les larges fluctuations observées dans les captures des madragues. En revanche, celles-ci pouvaient s'avérer pertinentes pour expliquer les fluctuations à court terme.

I.2. Variations du recrutement

Les fluctuations d'un stock peuvent également trouver leur origine dans les variations du recrutement des populations considérées.

- Variations du recrutement liées à des phénomènes de prédation, de cannibalisme et de compétition

Des processus biotiques, comme la prédation, le cannibalisme ou la compétition résultant de limitations en nourriture ou en espace pour l'habitat, peuvent également générer des cycles et des fluctuations à long terme dans un stock.

L'influence de la prédation/cannibalisme peut être directe, à travers une mortalité et/ou une croissance densité-dépendante (Caley *et al.*, 1996 ; Knell, 1998 ; Stenseth *et al.*, 1999 ; Fromentin *et al.*, 2001). Le cannibalisme et la prédation interspécifique sur les larves de poissons peuvent ainsi directement engendrer des variations du recrutement. Le cannibalisme inter-cohorte est connu pour générer des cycles de l'ordre du cycle de vie de l'espèce alors que le cannibalisme intra-cohorte génère des cycles de 2 fois la durée du cycle de vie (Gurney et Nisbet, 1985).

La prédation et le cannibalisme peuvent également être indirectement une importante source de variabilité, liée à des changements de l'écosystème ou à la vitesse de la croissance larvaire et juvénile. Ainsi en mer Baltique par exemple, des changements hydrologiques ont entraîné des variations de la production zooplanctonique et modifié l'intensité de la prédation des clupéidés sur les œufs de morue ainsi que le cannibalisme intra et inter-cohorte chez les juvéniles de morue (Köster et Möllmann, 2000). L'intensité de la prédation est aussi liée à la vitesse de la croissance larvaire et juvénile qui sont elles-mêmes contrôlées par des facteurs abiotiques, tels que la température (Pepin, 1991).

L'influence de tels processus de prédation, de cannibalisme ou de compétition, pour expliquer les fluctuations observées reste hypothétique, ceux-ci étant encore très mal connus chez le thon rouge (Mather *et al.*, 1995).

- Résonance

Les processus biotiques peuvent également générer des fluctuations à travers des phénomènes de résonance. Bjørnstad *et al.* (1999) ont ainsi montré chez la morue de la Skagerrak que des processus de densité-dépendance inter-cohorte (cannibalisme de l'âge 1 sur l'âge 0), intenses dans cette population, pouvaient agir comme un résonateur et déformer les variations à haute fréquence du

recrutement en basse fréquence au niveau des abondances de juvéniles et des adultes.

Les facteurs de compétitions intra- et inter- spécifiques sont encore mal connus chez le thon rouge. La possibilité théorique d'un phénomène de résonance pouvant expliquer les fluctuations à moyen et long terme observées dans la population de thon rouge a récemment été mise en évidence ; cependant ce phénomène ne serait plus lié à des interactions asymétriques entre classes de juvéniles mais à des variations aléatoires dans le recrutement. Fromentin (2002a) a en effet récemment montré que du bruit blanc dans le recrutement d'une espèce à vie longue pouvait générer des variations à long terme dans la biomasse reproductrice et les captures ainsi que des fluctuations à moyen terme dépendant de la longueur de vie de l'espèce (*i.e.* une somme mobile pondérée sur le bruit blanc du recrutement génère un signal basse fréquence dans le stock reproducteur, la fenêtre de lissage étant égal au nombre de classes de reproducteurs). Ces recherches théoriques concordent avec nos résultats qui décrivent des cycles de 15-30 ans correspondant à la durée de vie du thon rouge. L'hypothèse de variations inter-annuelles du recrutement, liées par exemple à des changements climatiques à court terme, pour expliquer des fluctuations d'abondance à moyen et plus long terme de la population de thon rouge apparaît ainsi potentiellement pertinente.

Les facteurs environnementaux connus pour affecter le recrutement des poissons sont des changements dans (i) la température de l'eau, qui influence le développement journalier et la mortalité des œufs et des larves (Pepin, 1991 ; Ottersen et Sundby, 1995) et (ii) la disponibilité de nourriture, *i.e.* l'hypothèse de *match-mismatch* (Hjort, 1926 ; May, 1974 ; Cushing, 1990) et/ou l'impact du vent et des courants à large échelle (dispersion des œufs et des larves, Hjort, 1926 ; Lasker, 1975) et à petite échelle (la turbulence joue un rôle sur la probabilité de rencontrer une proie, MacKenzie et Leggett, 1991 ; MacKenzie *et al.*, 1994 ; Kiørboe et MacKenzie, 1995). Cette hypothèse apparaît d'autant plus pertinente que le thon rouge d'Atlantique Est présente une fenêtre spatio-temporelle de reproduction restreinte (*i.e.* les îles Baléares et le détroit de Messine de mi-mai à juin), donc un succès reproductif particulièrement sensible aux variations environnementales à petite échelle.

I.3. Changement des routes migratoires

L'environnement est également connu pour influencer les schémas de migration des populations de poissons migrateurs (Cushing, 1982). C'est même l'une des toutes premières hypothèses qui ait été avancée pour expliquer les variations des stocks de hareng et de morue (Cuvier, 1830 ; Hjort, 1914). Pour Ljungman (1882), les variations du stock de hareng de mer du Nord suivaient un cycle de 55 ans dû aux variations de l'activité solaire (*sunspots*) et des marées. L'hypothèse d'un forçage d'origine climatique pour les stocks de hareng d'Atlantique Nord perdure toujours (*e.g.* Beverton et Lee, 1965 ; Cushing et Dickson, 1976 ; Southward *et al.*, 1988 ; Corten, 1990 ; Alheit et Hagen, 1997 ; Toresen et Oestvedt, 2000 ; Corten, 2001), et est également avancée pour d'autres stocks (*e.g.*, la sardine d'Atlantique Nord (Alheit et Hagen, 1997), la morue du Groenland (Dickson et Brander, 1993), le saumon du Pacifique (Beamish et Bouillon, 1993 ; Beamish *et al.*, 1999), ...).

Selon cette hypothèse, les fluctuations séculaires de la pêcherie méditerranéenne de thon rouge pourraient résulter de changements dans la proportion de la population fréquentant le bassin méditerranéen. Celui-ci pourrait provenir par exemple d'un mouvement de balancement de la population entre les sites de reproduction méditerranéens et ouest atlantiques. Le déterminisme des migrations du thon rouge est très mal connu mais la variabilité spatio-temporelle des zones de pêches laisse envisager une influence des facteurs hydro-climatiques (première partie, chapitre 1.2.3). L'hypothèse d'un forçage climatique à grande échelle pour expliquer les fluctuations à long terme observées dans les captures méditerranéennes et du proche Atlantique mérite donc d'être plus amplement explorée.

II. Fluctuations à long terme, *un forçage climatique ?*

Le forçage climatique est une des premières hypothèses couramment envisagée pour expliquer les tendances à long terme observées dans les populations (chapitre précédent). L'impact des variations à long terme du climat sur la dynamique spatio-temporelle du thon rouge étant encore méconnue, ce chapitre consiste à tester si les fluctuations à long terme observées dans les captures de thon rouge peuvent être reliées à des changements environnementaux à grande échelle. Pour cela, des indices climatiques disponibles sur le long terme doivent être utilisés. Trois indices différents sont retenus :

- L'indice d'Oscillation Nord Atlantique (NAO, Rogers, 1984 ; Hurrell *et al.*, 2001, Encadré 9). Plusieurs études ont décrit l'impact du NAO sur la chaîne trophique de l'Atlantique Nord (Fromentin et Planque, 1996) ainsi que son influence sur la reproduction, la croissance et la distribution des poissons, (comme le hareng, la morue, les thons tempérés, *e.g.* Alheit et Hagen, 1997 ; Bard, 2001 ; Ottersen *et al.*, 2001). Pour toutes ces raisons, le NAO pourrait influencer directement ou indirectement la dynamique spatiale et temporelle de la population de thon rouge d'Atlantique Nord (Marsac, 1999).

- L'indice de longueur du jour (LOD, McCarthy et Badcoc, 1986). Klyashtorin (1998) a mis en avant que l'indice de circulation atmosphérique (ACI, Girs, 1974) était étroitement corrélé avec les captures de petits pélagiques dont se nourrit le thon rouge (Mather *et al.*, 1995). L'ACI est très corrélé avec un indice géophysique global, l'excès de la longueur du jour (LOD). Ce dernier indice étant disponible depuis le XVII^{ème} siècle, il permet de tester une hypothétique relation avec les fluctuations à long terme d'abondance de thon rouge.

- Les températures. La température influence l'histoire de vie des poissons à divers stades, *i.e.* la croissance et la mortalité larvaire (Pepin, 1991 ; Otterlei *et al.*, 1999), la disponibilité de nourriture pour les juvéniles (Ellersten *et al.*, 1989), la croissance (Brander, 1995), la maturité (Tyler, 1995), la date de ponte (Hutchings et Myers, 1994) et la survie des œufs (Flett *et al.*, 1996). La température joue également un rôle clé dans l'activité de ponte, à la fois pour les thons tropicaux et tempérés qui pondent dans des eaux chaudes (généralement > 24°C, Nishikawa *et al.*, 1985 ; Schaefer, 2001). La température est enfin connue pour influencer la production planctonique (McGowan *et al.*, 1998) et, en conséquence, la ressource en nourriture pour les thons rouges juvéniles et adultes (Mather *et al.*, 1995). Ainsi, les changements de température pourraient également affecter la dynamique spatiale et temporelle du thon rouge de l'Atlantique.

Pour tester ces possibles relations, les schémas de variabilité de séries de thon rouge (BFT), NAO, LOD et les températures sont étudiés et comparés, à la fois dans le domaine du temps et des fréquences.

Encadré 9 : Reconstructions de l'Oscillation Nord Atlantique

L'Oscillation Nord Atlantique (NAO, pour *North Atlantic Oscillation*), identifiée par Walker (1924), résulte des fluctuations atmosphériques à grande échelle entre les hautes pressions de la région subtropicale de l'Atlantique Nord, centrées sur les Açores, et les basses pressions de la région subpolaire, centrées sur l'Islande (Rogers, 1984). L'état de cette oscillation détermine la force et l'orientation du gradient de pression sur l'Atlantique Nord, et par là-même l'intensité et la direction des *Westerlies* (ou flux d'ouest) traversant le bassin océanique aux latitudes dites tempérées, ainsi que les températures sur les deux côtes de l'océan Atlantique nord (Lamb et Randy, 1987 ; Hurrell *et al.*, 2001).

Les états du NAO peuvent être retracés à partir de données instrumentales depuis le XIX^{ème} siècle : un indice est calculé traditionnellement comme la différence des anomalies de pressions normalisées et moyennées de janvier à mars, entre le pôle subtropical (Ponta Delgada (Açores), Lisbonne (Portugal), Gibraltar), et le pôle subpolaire (Akureyri, Stykkisholmur ou Reykjavik (Islande), Rogers, 1984 ; Hurrell, 1995 ; Jones *et al.*, 1997a). Sur la période pré-instrumentale, ils sont reconstitués à partir de données paléoenvironnementales (e.g. les anneaux de croissance des arbres (Cook *et al.*, 1998), des enregistrements glaciaires (Appenzeller *et al.*, 1998), le taux de croissance des stalagmites (Proctor *et al.*, 2000), la reconstitution des précipitations (Rodrigo *et al.*, 2001), ou plusieurs de ces indices (Luterbacher *et al.*, 1999 ; Cullen *et al.*, 2001 ; Glueck et Stockton, 2001 ; Mann, 2001 ; Luterbacher *et al.*, 2002, Fig. 3. 1, annexe B). Il doit cependant être gardé à l'esprit que de telles reconstructions sont potentiellement biaisées (la croissance des arbres est principalement température dépendante, l'accumulation de glace précipitation dépendante, Schmutz *et al.*, 2000).

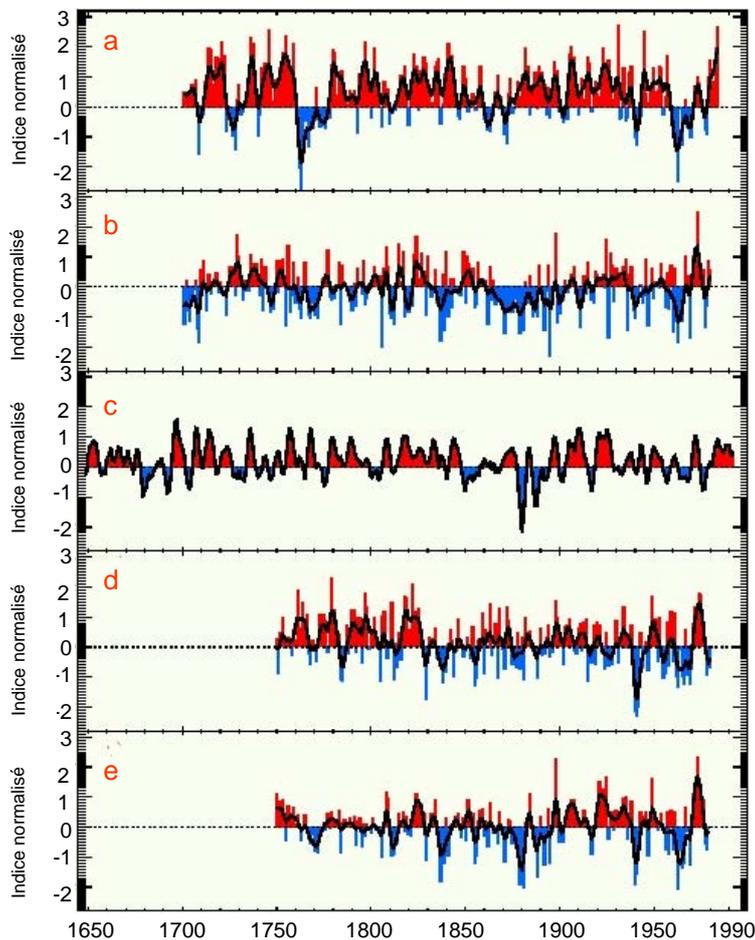


Fig. 3. 1 : Reconstruction d'indices NAO à partir de données paléoenvironnementales (les saisons et/ou les indices ciblés sont différents dans chaque cas), par (a) Glueck et Stockton (2001), (b) Cook *et al.* (1998), (c) Appenzeller *et al.* (1998), (d) Mann (2001), et (e) Cullen *et al.* (2001). D'après Osborn *et al.* (2000).

Un indice NAO proche de zéro signe une situation moyenne. Un indice positif est caractéristique d'une différence de pression accentuée entre les Açores et l'Islande, associée à de forts flux d'ouest sur l'Atlantique Nord, des hivers doux sur l'Europe occidentale et une intensification des *upwellings* en bordure Est des continents. Un indice négatif au contraire, traduit une intensification du flux d'air sibérien, entraînant des hivers rudes sur l'Europe, et une baisse d'intensité des *upwellings* en bordure Est des continents.

II.1. Matériel

II.1.1 Séries de captures

Les résultats de la seconde partie (chapitre I.1.3) soulignent l'importance de la tendance (qui explique plus de 50 % de la variabilité des séries), et donc la nécessité de considérer de longues séries temporelles. Ainsi pour cette étude, seules sont retenues les séries de plus de 80 ans contigus (Tab. 3. 1 ; la série de San Giuliano, qui présente un taux de données manquantes parmi les plus élevé de la base de données (10,5 %), et dont les données manquantes estimées conduisaient à des *outliers* dans les corrélations, n'a pas été conservée).

Tab. 3. 1 : Principales caractéristiques des séries de captures par les madragues utilisées dans l'étude environnementale :

indice de la série (N°), région concernée, nom de la madrague, période avec des données continues > 80 ans, nombre d'observations totales disponibles (N), taux de données estimées (%NA), valeur médiane et coefficient de variation (C.V) calculés sur les valeurs log des données.

N°	Région	Madrague	Période	N	%NA	Médiane	C.V.
1	Portugal	Medo das Casas	1852-1933	112	0	8,90	10,57%
2	Tunisie	Sidi Daoud	1863-1960	98	5,1	8,36	10,09%
3	Sicile	Formica	1634-1813	302	5,6	7,58	9,02%
4	Sicile	Favignana	1878-1960 1634-1813	302	6,7	7,56	10,74%
5	Sicile	Bonagia	1657-1809	249	5,7	6,82	10,73%
6	Sardaigne	Saline	1868-1960	114	0,9	7,50	12,19%
7	Sardaigne	Porto Paglia	1825-1960	138	5,1	7,37	10,31%
8	Sardaigne	Porto Scuso	1825-1960	139	0,7	7,95	8,85%
9	Sardaigne	Isola Piana	1825-1960	139	0,7	7,73	9,16%

II.1.2 Séries environnementales

Les données environnementales (indices NAO, variations de la longueur du jour et températures) ont été collectées à travers la littérature scientifique, les bases de données du WEB ou communiquées par des climatologues reconnus (Tab. 3. 2). Les séries d'observations climatologiques régulières, fiables et permettant de calculer les indices climatologiques d'intérêt, remontent à environ 150 ans. Ces enregistrements sont utilisés en premier lieu lorsqu'ils sont disponibles. Sur la période pré-instrumentale, des séries reconstruites sont requises.

L'oscillation Nord Atlantique (NAO) est une des fluctuations climatologiques pluri-annuelles majeures de l'Hémisphère Nord (Encadré 9). Le NAO résulte de l'oscillation entre les hautes pressions subtropicales, centrées sur les Açores, et les basses pressions subpolaires centrées sur l'Islande. Pour représenter de manière satisfaisante ce qu'ont pu être les fluctuations du NAO sur une longue période, 3 séries temporelles sont retenues. La première est l'indice NAO classique, calculé comme la différence des pressions normalisées au niveau de la mer entre Ponta Delgadas (Açores) et Akureyri (Islande) au cours de la saison hivernale (Décembre à Février, lorsque le NAO est la plus prononcée, Rogers, 1984 ; Hurrell, 1995, Fig. 3. 3). Les autres indices sont deux indicateurs du NAO :

(i) une reconstruction basée sur la dendrochronologie d'essences nord américaines et européennes, qui s'étend de 1701 à 1980 (Cook *et al.*, 1998, Fig. 3. 3) et (ii) une série reconstruite sur les 350 dernières années à partir d'enregistrements glaciaires du Groenland (Appenzeller *et al.*, 1998, Fig. 3. 3). Ces deux indicateurs expliquent respectivement 58 % et 30 % de la variance de l'indice NAO instrumental sur la période 1865-1980.

Tab. 3. 2 : Principales caractéristiques des séries environnementales : type de variable, nature (observations instrumentales ou reconstruction), période couverte et références bibliographiques.

Variable	Nature	Période	Références
NAO	Mesures instrumentales	1865-2000	Méthode de Rogers (1984) Données du <i>World Monthly Surface Station Climatology</i> http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.htm
	Reconstruction (enregistrements glaciaires)	1648-1991	Appenzeler <i>et al.</i> (1998)
	Reconstruction (anneaux de croissance des arbres)	1701-1980	Cook <i>et al.</i> (1998)
LOD	Enregistrements	1656-1984 utilisée : 1745-1984	McCarthy et Badcoc (1986)
Température Hémisphère Nord	Reconstruction (mesures instrumentales)	1856-2001	Jones <i>et al.</i> (1997b, 1999, 2001) Données de la <i>Climatic Research Unit</i> http://www.cru.uea.ac.uk/
	Reconstruction (anneaux de croissance des arbres)	1671-1973	D'Arrigo <i>et al.</i> (1999)
Température locale	Enregistrements à Cadix	1870-1994	Wheeler (<i>com. pers.</i>)
	Enregistrements à Dar-El-Beida	1878-1995	<i>Global Historical Climatology Network data base</i> http://cdiac.esd.ornl.gov/ghcn/ghcn.html
	Enregistrements à Cagliari	1866-1996	Brunetti <i>et al.</i> (2000) ; Maugeri (<i>com. pers.</i>)
	Enregistrements à Palerme	1866-1996	Brunetti <i>et al.</i> (2000) ; Maugeri (<i>com. pers.</i>)

L'excès de la longueur du jour (LOD) est un indice géophysique global qui caractérise les variations de la vitesse de rotation de la terre. Cette dernière est en effet soumise à des décélérations séculaires, des fluctuations périodiques et des variations irrégulières ou aléatoires. Ces variations sont étroitement corrélées avec la dynamique de l'Indice de Circulation Atmosphérique (ACI), également connu sous le nom d'indice de Vangengeim-Girs (Girs, 1974). L'ACI caractérise la direction dominante de transport des masses d'air sur la région Atlanto-eurasienne et traduirait ainsi les changements climatiques globaux, comme les variations dans la circulation atmosphérique et l'intensité des vents (Klyashtorin, 1998). L'indice LOD est calculé comme la différence entre l'actuelle (astronomique) longueur du jour et la durée standard du jour de 86 400 SI secondes (Stephenson et Morrison, 1984). La série temporelle la plus longue actuellement disponible est celle de McCarthy et Badcoc (1986) qui couvre les 350 dernières années (Fig. 3. 3). L'enregistrement continu du LOD est conduit par le bureau international du temps à Paris depuis 1800. Ces enregistrements corroborent cet indice LOD sur la période 1800-1984. Il est à noter cependant que les données antérieures à 1800 ne montrent que des variations limitées en comparaison à la période 1800-1984 (Fig. 3. 3).

La température de l'air est enregistrée couramment en Europe depuis plusieurs siècles et a ainsi été largement utilisée pour évaluer l'influence des changements environnementaux sur les populations animales sur une longue période (e.g. Gian-Reto *et al.*, 2002). Il n'y a en revanche aucune série temporelle régulière de température de surface (SST) pour la Méditerranée avant la période récente. Quelques études montrent cependant qu'il existe une très bonne corrélation entre les températures de l'air et les températures de surface des eaux de mer côtières (e.g. Southward *et al.*, 1988 ; Fromentin et Planque, 1996 ; Fromentin *et al.*, 1998) ; des températures de l'air seront ainsi utilisées comme indicateurs des SST.

Deux séries de températures de l'hémisphère Nord (HN), les plus longues disponibles, sont tout d'abord retenues : (i) la température annuelle moyenne de l'hémisphère Nord estimée sur les 150 dernières années à partir d'une grille de séries temporelles de températures à la surface de la terre et de la mer (Parker *et al.*, 1994 ; Jones *et al.*, 1997b, 1999, 2001, Fig. 3. 3) et (ii) une reconstruction de la température annuelle de l'hémisphère Nord basée sur l'étude de 20 enregistrements dendrochronologiques provenant d'Amérique du Nord, de Scandinavie, de Sibérie et de Mongolie sur les 3 siècles derniers (D'Arrigo *et al.*, 1999, Fig. 3. 3). Ce dernier indice est ainsi seulement fondé sur des données continentales, il est donc vraisemblable qu'il ne soit qu'un faible descripteur des changements de températures sur l'Atlantique Nord, notamment moins pertinent que l'indice précédent. Cependant, il permet de couvrir la partie la plus ancienne des séries de captures par les madragues.

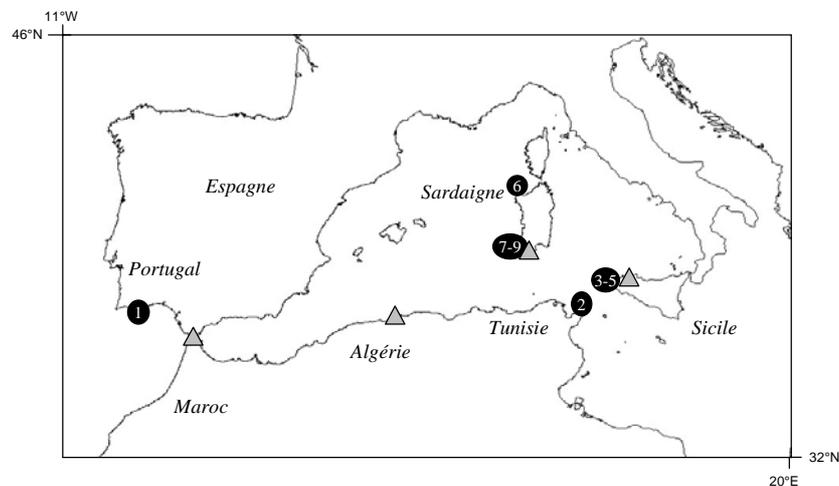


Fig. 3. 2 : Localisation des madragues (représentées par leurs indices, Tab. 3. 1) et des stations d'enregistrements des séries de températures locales (triangles identifiant de l'ouest à l'est : Cadix, Dar-El-Beida, Cagliari et Palerme).

Après la grande échelle spatio-temporelle, les relations températures - captures des madragues sont analysées à une échelle locale, mais sur une période plus restreinte. 4 séries de températures instrumentales, enregistrées sur des stations proches des lieux de calaison des madragues sont utilisées : Palerme en Sicile (Brunetti *et al.*, 2000), Cagliari en Sardaigne (Brunetti *et al.*, 2000), Cadix, au niveau du détroit de Gibraltar (Wheeler, Sunderland Polytechnic, Royaume-Uni, *com. pers.*), Dar-El-Beida en Algérie (*Global Historical Climatology Network data base*, Tab. 3. 2).

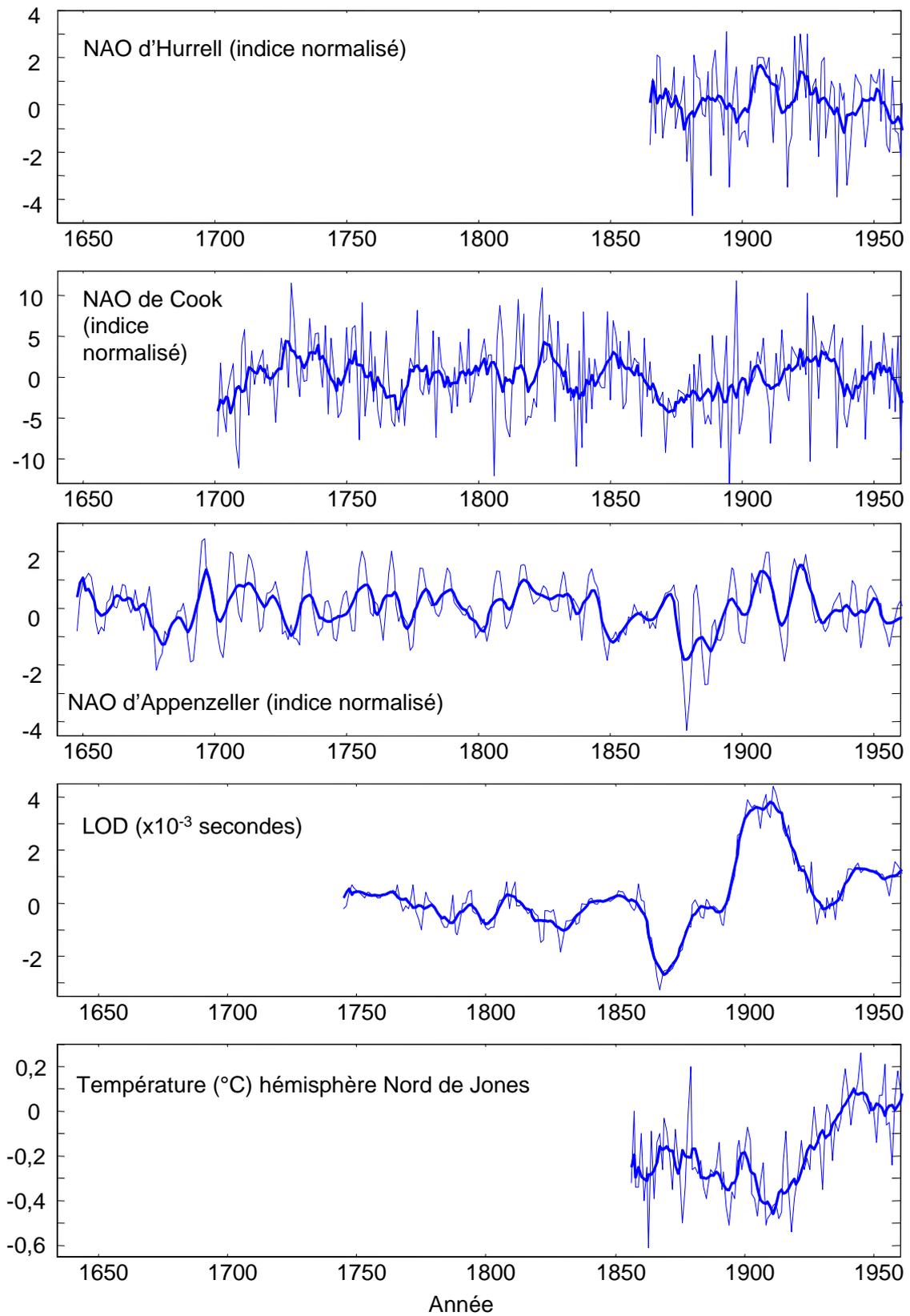


Fig. 3. 3 : Les séries temporelles de données environnementales
(ligne fine : données brutes, ligne épaisse : médiane mobile d'ordre 3)

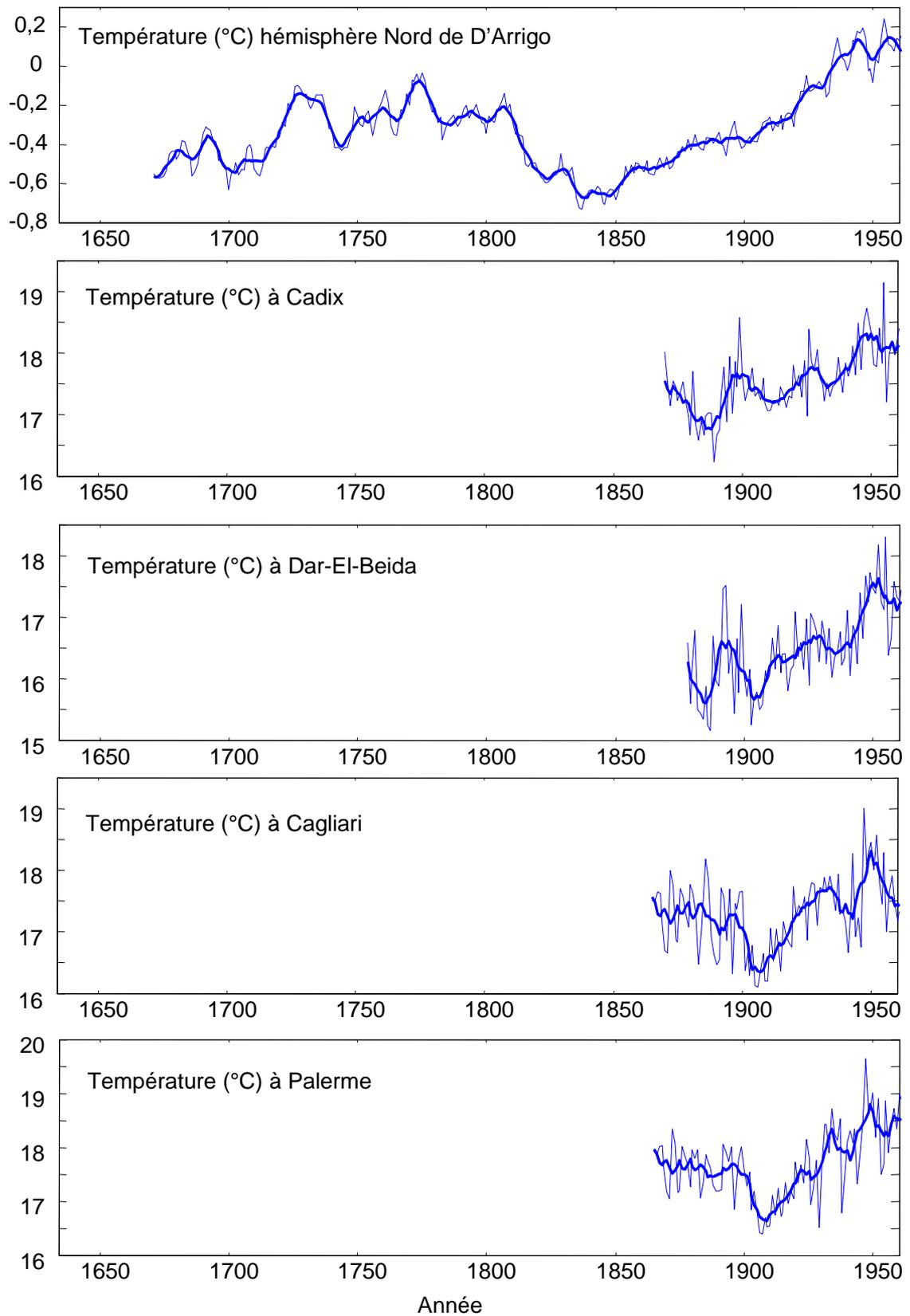


Fig. 3. 3 : Les séries temporelles de données environnementales (suite)
(ligne fine : données brutes, ligne épaisse : médiane mobile d'ordre 3)

II.2. Méthodes

Les sommes totales annuelles de BFT capturés par les madragues sont log-transformées (logarithme népérien) pour stabiliser la variance (Sen et Srivastava, 1990). Les relations entre BFT et données environnementales sont étudiées en deux temps.

Des analyses spectrales sont tout d'abord réalisées pour comparer les schémas de variabilité dans le domaine des fréquences. Les analyses spectrales sont conduites sur chaque série (sur la période continue la plus longue pour les séries discontinues, Tab. 3. 1 et Tab. 3. 2). Les analyses spectrales supposent la stationnarité (indépendance temporelle de la moyenne, de la variance et de la covariance des séries, Priestley, 1981). La plupart des séries utilisées ici sont stationnaires, cependant 5 d'entre elles présentent une tendance générale croissante ou décroissante (e.g. la série de température de Cadix). Une façon commune d'obtenir une approximation de la stationnarité est d'appliquer une différence de premier ordre. Cependant, cette procédure supprime toutes variations de moyen à long terme. Comme nous nous intéressons ici aux variations à long terme, les analyses spectrales sont conduites sur les séries non détendancialisées, bien que les conditions d'application de l'analyse spectrale ne soient alors pas totalement remplies. Les résultats devront donc être examinés avec prudence et dans un but descriptif.

Les relations entre BFT et données environnementales sont ensuite étudiées dans le domaine temporel grâce à des régressions et des corrélations. Les régressions linéaires sont conduites sur chaque paire de séries temporelles BFT/environnement qui se recouvrent sur une période suffisamment longue (80 ans minimum). La méta-analyse est une méthode souvent utilisée pour résumer les résultats des régressions (e.g. Myers *et al.*, 2001). Elle ne peut pas être conduite ici à cause de la non-indépendance des analyses (*i.e.*, différentes séries BFT régressées contre la même série climatique). Une approche graphique est donc utilisée pour présenter les résultats : les distributions des probabilités des régressions sont figurées en utilisant des graphiques "boîte à moustaches" (S-Plus, 2001). Pour tenir compte de l'auto-corrélation des séries dues aux fluctuations à long terme, un modèle linéaire utilisant les moindres carrés généralisés est également ajusté (GLS, Venables et Ripley, 1999 ; S-Plus, 2001). Le modèle GLS est une régression dans laquelle les erreurs peuvent être auto-corrélées et/ou avoir une variance inégale. Ici, les erreurs sont spécifiées suivre un processus auto-régressif de degré p , déterminé en utilisant la fonction d'autocorrélation partielle et l'ajustement satisfaisant d'un modèle ARIMA (Box et Jenkins, 1976 ; S-Plus, 2001). Lorsque les séries temporelles de captures sont discontinues, le modèle GLS est ajusté sur la plus longue période disponible.

Réaliser des régressions sur chaque paire de séries BFT/environnementale induit un test multiple, *i.e.* l'erreur de type I devient plus grande que la valeur nominale α (deuxième partie, chapitre I.4.2, Legendre et Legendre, 1998). Pour corriger ce biais, une analyse des corrélations est conduite : la procédure de Holm pour les tests non-indépendants est appliquée pour estimer des valeurs de probabilités ajustées (qui peuvent être supérieures à 1, Holm, 1979). Comme quelques séries temporelles ne sont pas normalement distribuées, le coefficient de corrélation de Spearman est utilisé (Zar, 1984). Les corrélations sont testées en utilisant une procédure de Monte Carlo (10 000 simulations).

II.3. Résultats

II.3.1 Captures et NAO

Comme cela a été montré précédemment (seconde partie, chapitre I.1.2), les spectres des séries BFT sont fortement dominés par des signaux basse fréquence ($< 0,1 \text{ an}^{-1}$, *i.e.* périodes > 10 ans), les variations de court à moyen terme étant faibles ou négligeables (Fig. 3. 4). Au contraire, aucun schéma commun n'émerge des 3 spectres du NAO (Fig. 3. 4). L'indice instrumental d'Hurrell présente une large bande spectrale dominée par de la variabilité à court terme ($> 0,4 \text{ an}^{-1}$), avec deux moindres pics sur les fréquences moyennes et basses (autour de $0,3$ et $0,05 \text{ an}^{-1}$). Comme attendu, un signal long terme émerge des séries NAO les plus longues. L'indice de Cook montre une large bande spectrale avec un pic sur les basses fréquences ($< 0,1 \text{ an}^{-1}$), et secondairement autour de $0,25$ et $0,5 \text{ an}^{-1}$. L'indice d'Appenzeller est dominé par des basses fréquences $< 0,2 \text{ an}^{-1}$ (*i.e.* des périodes > 5 ans), avec deux pics autour de $0,02$ et $0,15 \text{ an}^{-1}$. Ainsi, contrairement aux spectres des séries de BFT, une variabilité moyenne à court terme apparaît pour les trois indices NAO. Les régressions entre l'indice d'Hurrell et les séries de BFT conduisent à des relations non-significatives, comme cela apparaît clairement sur la boîte à moustache figurant les probabilités des 6 régressions (Fig. 3. 5 a). Les pentes sont toujours faibles ($a \in [-0,01 ; 0,08]$, Tab. 3. 3). Les analyses portant sur des séries plus longues (*i.e.* analyses avec les 2 indicateurs du NAO) ne conduisent pas à des relations plus fortes (Fig. 3. 5 a) : la plupart des régressions apparaissent également non-significatives et les coefficients de pente sont faibles (et soit positifs, soit négatifs, $a \in [-0,32 ; 0,07]$, Tab. 3. 3). Les résultats des modèles GLS (qui prennent en compte l'autocorrélation) sont similaires aux régressions linéaires et dans la plupart des cas (15 sur 18) non-significatifs au seuil de 5 % (Tab. 3. 3). Les analyses de corrélation confirment les résultats précédents : 67 % des coefficients de corrélation sont non-significatifs ; cette proportion atteint 83 % quand la correction pour les tests multiples est appliquée.

Les résultats de toutes les analyses ci-dessus indiquent clairement que les fluctuations à long terme dans les séries de BFT ne sont statistiquement pas reliées à celles du NAO.

Tab. 3. 3 : Résultats des analyses entre séries environnementales et captures de BFT :

Nombre d'observations communes utilisées dans les régressions et les corrélations (N), pente et probabilité des régressions linéaires, pente et probabilité des ajustements des modèles généralisés des moindres carrés (GLS), probabilités des coefficients de corrélations sans et avec la correction de Holm (les valeurs en gras soulignent des probabilités $<$ au seuil de 5%). Lorsque les séries temporelles de captures sont discontinues, le modèle GLS est ajusté sur la plus longue période disponible.

II. Fluctuations à long terme, un forçage climatique ?

Séries environnementales	Madrague	N	Régression linéaire		Modèle GLS		Corrélation probabilité	
			pente	probabilité	pente	probabilité	probabilité	corrigée
NAO d'Hurrell	Sidi Daoud	96	0,08	0,1190	0,05	0,0639	0,0604	0,3020
	Formica	83	0,08	0,0690	0,06	0,0655	0,0200	0,1200
	Favignana	83	0,05	0,3087	0,02	0,4403	0,1300	0,4244
	Saline	93	-0,01	0,9095	-0,03	0,3907	0,4776	0,4840
	Porto Scuso	96	0,04	0,3133	0,04	0,2214	0,1061	0,4244
	Isola Piana	96	0,02	0,6749	0,00	0,8909	0,2420	0,4840
NAO de Cook	Medo das Casas	112	-0,05	0,0044	0,00	0,9307	0,0005	0,0045
	Sidi Daoud	98	-0,02	0,3135	0,01	0,1775	0,0494	0,2470
	Formica	217	0,00	0,8653	0,00	0,9892	0,2975	0,7976
	Favignana	214	0,00	0,9060	0,02	0,0224	0,4350	0,7976
	Bonagia	179	0,00	0,7231	-0,02	0,0598	0,2591	0,7976
	Saline	114	-0,04	0,0450	-0,01	0,4863	0,0050	0,0400
	Porto Paglia	136	0,00	0,8230	0,02	0,0448	0,1994	0,7976
	Porto Scuso	136	-0,02	0,0619	0,01	0,5681	0,0326	0,2258
	Isola Piana	136	-0,02	0,0724	0,00	0,8425	0,0386	0,2316
NAO d'Appenzeller	Medo das Casas	112	-0,32	0,0000	-0,02	0,7832	0,0008	0,0072
	Sidi Daoud	98	-0,08	0,2971	0,02	0,7746	0,3876	1,2548
	Formica	270	0,01	0,8371	-0,02	0,6659	0,4384	1,2548
	Favignana	267	-0,09	0,0647	-0,09	0,0451	0,0907	0,7016
	Bonagia	227	0,07	0,1293	0,01	0,8967	0,1509	0,9054
	Saline	114	-0,06	0,4696	0,02	0,7190	0,3804	1,2548
	Porto Paglia	136	-0,11	0,0671	0,00	0,9855	0,0877	0,7016
	Porto Scuso	136	-0,05	0,3346	0,02	0,6934	0,1616	0,9054
	Isola Piana	136	-0,05	0,3544	-0,01	0,8650	0,3137	1,2548
LOD	Medo das Casas	112	-0,15	0,0027	0,09	0,2404	0,0000	0,0000
	Sidi Daoud	98	-0,09	0,0687	0,06	0,4814	0,0041	0,0205
	Formica	198	0,13	0,0008	0,07	0,4471	0,0123	0,0492
	Favignana	195	0,28	0,0000	0,02	0,8045	0,0001	0,0006
	Saline	114	-0,04	0,4291	0,20	0,0582	0,0418	0,1254
	Porto Paglia	136	-0,16	0,0000	0,01	0,9331	0,0000	0,0000
	Porto Scuso	136	0,01	0,8111	0,14	0,0502	0,3354	0,3354
	Isola Piana	136	0,09	0,0148	0,14	0,0541	0,0880	0,1760
Température hémisphère Nord de Jones	Sidi Daoud	98	-2,20	0,0000	-0,45	0,2215	0,0000	0,0000
	Formica	83	-1,71	0,0000	-0,66	0,1415	0,0000	0,0000
	Favignana	83	-2,06	0,0000	-0,56	0,1287	0,0000	0,0000
	Saline	93	-2,18	0,0000	0,44	0,2999	0,0000	0,0000
	Porto Scuso	105	-1,46	0,0000	-0,28	0,4386	0,0000	0,0000
	Isola Piana	105	-1,41	0,0000	-0,15	0,6220	0,0000	0,0000
Température hémisphère Nord de D'Arrigo	Medo das Casas	112	-1,72	0,0028	-0,75	0,4874	0,0000	0,0000
	Sidi Daoud	98	-2,90	0,0000	-2,75	<,0001	0,0000	0,0000
	Formica	247	-0,76	0,0005	-0,07	0,9041	0,0003	0,0015
	Favignana	244	-0,17	0,5358	0,20	0,7423	0,2595	0,4930
	Bonagia	209	-0,31	0,2998	0,86	0,2017	0,2465	0,4930
	Saline	114	-2,31	0,0000	-2,76	<,0001	0,0000	0,0000
	Porto Paglia	136	-1,34	0,0000	-0,79	0,1112	0,0000	0,0000
	Porto Scuso	136	-0,96	0,0000	-0,19	0,7474	0,0003	0,0015
	Isola Piana	136	-0,50	0,0318	-0,01	0,9852	0,0204	0,0612
Température à Palerme	Sidi Daoud	96	-0,44	0,0007	0,11	0,2845	0,0003	0,0009
	Formica	83	-0,40	0,0004	-0,16	0,1800	0,0001	0,0005
	Favignana	83	-0,45	0,0001	-0,07	0,4914	0,0000	0,0000
	Saline	93	-0,55	0,0002	0,06	0,6573	0,0001	0,0005
	Porto Scuso	96	-0,24	0,0350	0,26	0,0144	0,0088	0,0088
	Isola Piana	96	-0,32	0,0013	0,14	0,1298	0,0008	0,0016
Température à Cagliari	Sidi Daoud	96	-0,44	0,0017	0,03	0,7314	0,0026	0,0078
	Formica	83	-0,54	0,0000	-0,24	0,0402	0,0000	0,0000
	Favignana	83	-0,60	0,0000	-0,13	0,1586	0,0000	0,0000
	Saline	93	-0,53	0,0010	-0,01	0,9422	0,0003	0,0015
	Porto Scuso	96	-0,34	0,0059	0,01	0,9054	0,0041	0,0082
	Isola Piana	96	-0,38	0,0005	0,04	0,6899	0,0004	0,0016
Température à Cadix	Sidi Daoud	91	-0,81	0,0000	-0,04	0,7617	0,0000	0,0000
	Formica	83	-0,61	0,0000	-0,30	0,0349	0,0001	0,0002
	Favignana	83	-0,70	0,0000	-0,27	0,0176	0,0000	0,0000
	Saline	91	-0,94	0,0000	-0,09	0,5804	0,0000	0,0000
	Porto Scuso	91	-0,64	0,0000	-0,23	0,0946	0,0000	0,0000
	Isola Piana	91	-0,48	0,0002	-0,13	0,2042	0,0000	0,0000
Température à Dar-El-Beida	Sidi Daoud	83	-0,54	0,0000	-0,01	0,9181	0,0000	0,0000
	Formica	83	-0,49	0,0000	-0,17	0,1219	0,0000	0,0000
	Favignana	83	-0,55	0,0000	-0,14	0,0982	0,0000	0,0000
	Saline	83	-0,71	0,0000	0,01	0,9546	0,0000	0,0000
	Porto Scuso	83	-0,46	0,0001	-0,08	0,4603	0,0000	0,0000
	Isola Piana	83	-0,44	0,0000	-0,07	0,3893	0,0000	0,0000

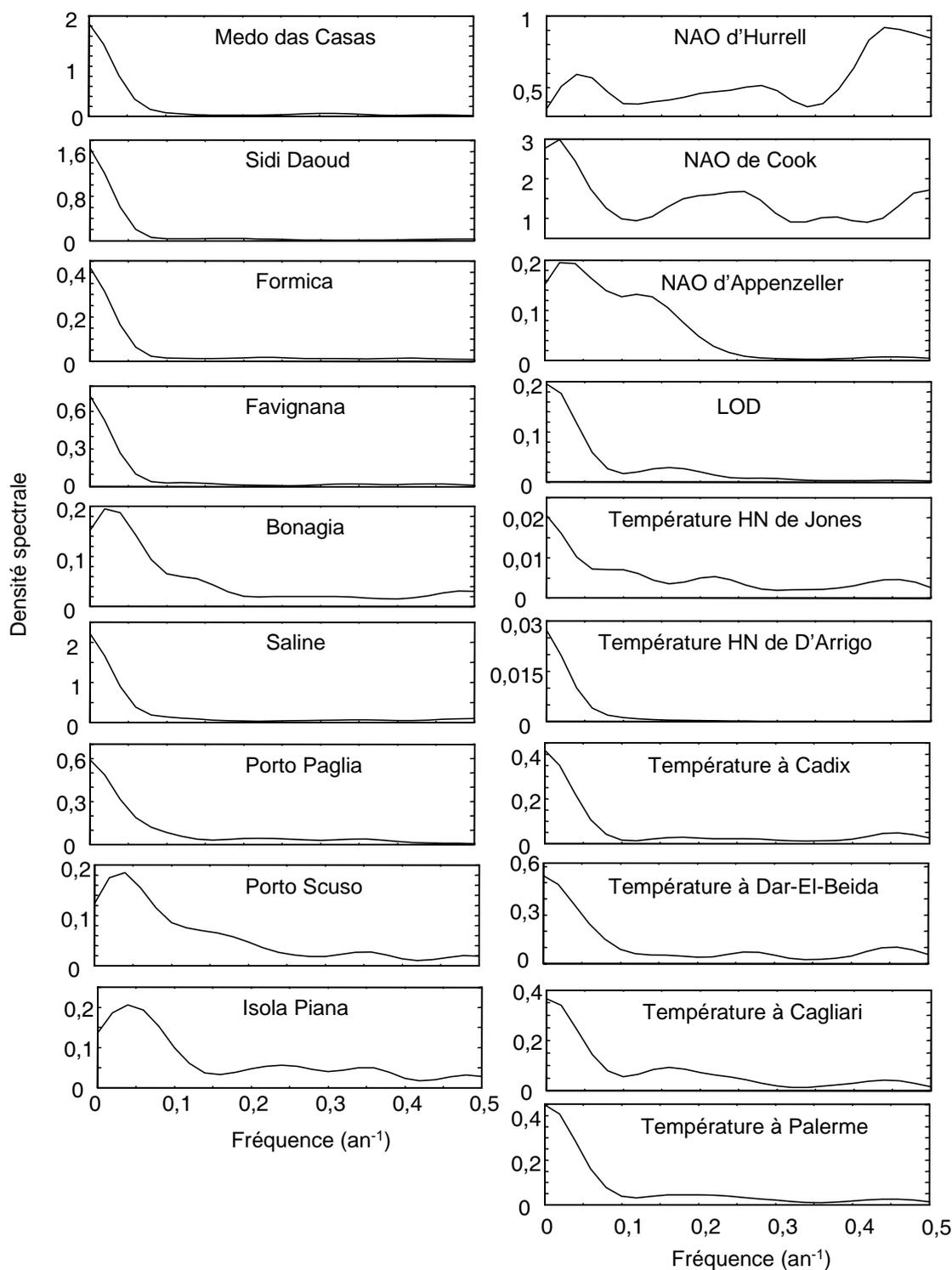


Fig. 3. 4 : Densités spectrales des 9 séries de captures de madrague (panneau de gauche) et des 10 séries environnementales (panneau de droite).

Des spectres similaires, dominés par de basses fréquences sont mis en évidence pour les captures des madragues, LOD et températures alors que des larges bandes spectrales, avec de la variabilité à court terme, caractérisent les séries de NAO.

II.3.2 Captures et LOD

La décomposition dans le domaine des fréquences de la série LOD montre un spectre décalé sur les basses fréquences ($< 0,1 \text{ an}^{-1}$), similaire à ceux des séries de BFT (Fig. 3. 4). Cinq des huit régressions entre captures de BFT et LOD sont significatives (Tab. 3. 3), mais le graphique montre une distribution nettement plus large des probabilités (Fig. 3. 5 b). De plus, les pentes sont faibles (soit positives soit négatives) et des relations positives comme négatives apparaissent significatives (3 et 2 respectivement, Tab. 3. 3). Une étude plus précise révèle une forte structure dans les résidus ; les périodes pendant lesquelles les relations sont positives (1750-1810, 1920-1960) alternent avec des périodes pendant lesquelles les relations sont faibles ou négatives (1850-1890). Les ajustements des modèles GLS conduisent tous à des régressions positives et non-significatives, indiquant que les tendances à long terme sont le trait le plus commun entre les captures des madragues et le LOD. 75 % des coefficients de corrélation sont significatifs, mais cette proportion tombe à 62 % quand la correction pour les tests multiples est appliquée.

Ainsi, les séries de BFT et de LOD montrent des schémas sensiblement comparables dans le domaine des fréquences, mais les analyses de régression et de corrélation ne concordent pas et ne permettent pas de conclure à une relation claire.

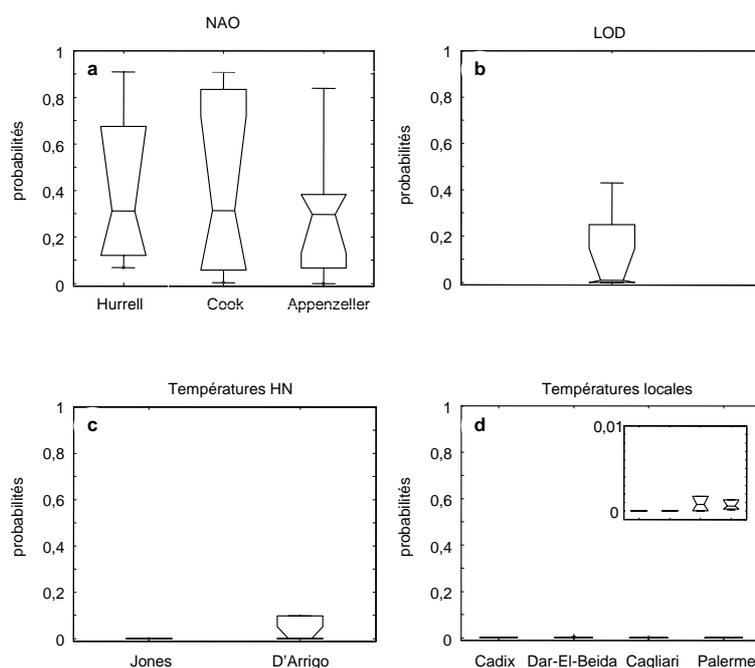


Fig. 3. 5 : Distribution des probabilités des régressions linéaires entre les séries de BFT et les séries environnementales :

(a) indice NAO d'Hurrell (N = 6 régressions), de Cook (N = 9) et d'Appenzeller (N = 9),
 (b) indice LOD (N = 8), (c) températures hémisphère Nord de Jones (N = 6) et de D'Arrigo (N = 9),
 (d) températures instrumentales à Cadix (N = 6), Dar-El-Beida (N = 6), Cagliari (N = 6), et Palerme (N = 6) ; l'encart présente un zoom des probabilités entre 0 et 0,01. Médiane, premier et troisième quartile, et les extrémités 1,5 de l'intervalle inter-quartile, sont dessinés. Les probabilités des régressions avec les indices NAO et LOD apparaissent non-significatives et sont largement distribuées entre 0 et 1, alors que celles avec les températures sont toutes significatives et proche de 0.

II.3.3 Captures et température

Les spectres des deux séries de températures de l'hémisphère Nord sont dominés par de basses fréquences et sont comparables à ceux des séries de BFT (Fig. 3. 4). Toutes les régressions entre les captures par les madragues et les températures de l'hémisphère Nord montrent des pentes fortement négatives ($a \in [-2,90 ; -0,17]$, Tab. 3. 3). Les régressions avec la série reconstruite de Jones sont toutes significatives au seuil de 1 % (Tab. 3. 3, Fig. 3. 5 c) et montrent des résidus distribués normalement. En ce qui concerne les régressions avec la série reconstruite de D'Arrigo, 2 régressions (avec les séries Bonagia et Favignana) ne sont pas significatives et présentent une structure dépendante du temps dans les résidus. Les 7 autres régressions, cependant, sont significatives au seuil de 5% (Tab. 3. 3) et montrent des résidus normalement distribués. Les graphiques des probabilités tendent à confirmer que les séries de BFT sont, en général, significativement reliées à la série de D'Arrigo, bien que ceci soit moins évident qu'avec la série de Jones (Fig. 3. 5 d). La plupart des ajustements de modèles GLS conduisent à de faibles coefficients de pente ($a \in [-2,76 ; 0,86]$, Tab. 3. 3) et à une baisse significative de la force de la relation (seulement 2 des 15 régressions restent significatives, Tab. 3. 3). Ceci montre une nouvelle fois que les tendances à long terme sont le trait le plus commun entre les captures des madragues et les indicateurs de Jones et de D'Arrigo. Ces résultats sont confirmés par les coefficients de corrélation très élevés et négatifs, parmi lesquels 100 % (pour la série de Jones) et 78 % (pour la série de D'Arrigo) sont significatifs au seuil de 5 % pour les analyses brutes comme pour les corrigées (Tab. 3. 3).

Les spectres des 4 séries de températures locales sont également dominés par de la variabilité à long terme et sont très similaires à ceux des séries de BFT (Fig. 3. 4). 23 régressions entre séries de BFT et températures locales sont significatives au seuil de 1 % et la 24^{ème} au seuil de 5 % (Tab. 3. 3). Les graphiques des probabilités représentent ces résultats particulièrement clairs pour les 4 séries de température (Fig. 3. 5d). Toutes les régressions montrent des pentes descendantes (parmi lesquelles 12 sont particulièrement fortes, avec des coefficients de pente $< -0,5$, Tab. 3. 3). Les régressions GLS conduisent à des relations plus faibles et non-significatives dans 83 % des cas et de faibles coefficients de pente ($a \in [-0,30 ; 0,26]$, Tab. 3. 3). Ceci montre à nouveau que le signal long terme est le signal commun aux séries de BFT et de températures locales. Finalement, les analyses de corrélation confirment la forte et négative relation entre captures des madragues et températures locales. Tous les coefficients de corrélation sont significatifs, même lorsque la correction pour les tests multiples est appliquée (Tab. 3. 3).

Ainsi, les analyses avec les températures locales corroborent celles conduites avec les reconstructions de températures à grande échelle : (1) les séries de BFT comme les différentes séries de températures sont largement dominées par un signal base fréquence et (2) une relation négative et significative apparaît clairement entre les fluctuations long terme des captures de BFT et celles des températures.

D'un point de vue statistique, les résultats amènent à rejeter l'hypothèse d'une relation entre fluctuations à long terme du BFT et NAO ou LOD. En revanche, toutes les analyses mettent en évidence une relation significative et négative entre fluctuations à long terme de BFT et températures.

II.4. Discussion

II.4.1 Un forçage climatique ?

Le fait de combiner plusieurs variables peut affecter le niveau de significativité des tests statistiques et, ainsi, la confiance dans les résultats ci-dessus. Cependant, la procédure de Holm, appliquée pour corriger l'incidence de tests multiples, confirme clairement ces résultats, ce qui permet de considérer les conclusions comme robustes. Une autre difficulté concerne l'autocorrélation dans les séries temporelles qui diminue le degré de liberté effectif (Bartlett, 1946). Les analyses montrent que les régressions disparaissent généralement lorsque l'autocorrélation est prise en compte, indiquant que la significativité est due au signal autocorrélé, *i.e.* aux fluctuations long terme. Ainsi, nous pourrions conclure que les relations significatives entre séries de BFT et température proviennent uniquement de fluctuations à long terme opposées, mais les analyses statistiques standards ne permettent pas de préciser le niveau réel de significativité de telles relations.

Des études récentes ont avancé que le NAO pourrait affecter le thon rouge d'Atlantique Est à travers un impact sur le recrutement (Santiago, 1998 ; Marsac, 1999). Cependant, Fromentin (2002b) et le dernier groupe de travail de l'ICCAT sur l'environnement et le recrutement des thons (ICCAT, 2002) ont analysé plus avant la question et n'ont montré aucune relation claire entre le recrutement du BFT et le NAO. Nos résultats, basés sur des comparaisons à long terme, viennent appuyer ces dernières conclusions. Le délai entre le NAO et la période du recrutement est, cependant, une question délicate (ICCAT, 2002). Nous avons donc également étudié les effets retard entre l'indice NAO d'Hurrell et les séries de BFT. Ces analyses ne conduisent pas non plus à des relations significatives, ce qui tend à nous faire rejeter, d'un point de vue statistique, l'hypothèse d'une relation entre fluctuations long terme de BFT et NAO.

Klyashtorin (1998) a mis en évidence que l'indice de circulation atmosphérique (ACI), lié à la longueur du jour (LOD), était hautement corrélé avec les captures des principales espèces pélagiques commerciales atlantiques et pacifiques. Cette étude considérait des données de captures ne couvrant que le XX^{ème} siècle (de 1920 ou 1950 à nos jours). En considérant la période 1920-1960, les captures des madragues apparaissent elles aussi corrélées au LOD. Cependant, la corrélation disparaît sur la période 1850-1890. Ainsi, lorsque le long terme est considéré, nos résultats tendent également à rejeter la relation entre les fluctuations de BFT et les indices LOD/ACI.

Un forçage long terme potentiel de la température est finalement étudié en utilisant 6 séries à long terme différentes. La série reconstruite de Jones et les séries instrumentales de Cadix et Dar-El-Beida sont validées et tout à fait fiables. L'indicateur de D'Arrigo est construit à partir d'enregistrements dendrochronologiques ; il est ainsi possible que d'autres phénomènes météorologiques que la température (comme par exemple la pluie) ou des facteurs d'ordre autre que climatologique aient biaisé cet indice (Schmutz *et al.*, 2000). Cet indice est de plus estimé à partir d'informations continentales. Ceci

pourrait expliquer que les résultats des régressions et des corrélations sont un peu moins évidents avec la série de D'Arrigo qu'avec les autres séries de température. Les deux séries italiennes (*i.e.* Palerme et Cagliari) peuvent présenter quelques problèmes d'homogénéité entre les périodes ancienne et récente (Maugeri, *Instituto di Fisica Generale Applicata, Italie, com. pers.* ; voir aussi Brunetti *et al.*, 2000). Les analyses ont donc été re-conduites en utilisant une série régionale pour la région centre-Italie, homogène et validée (Brunetti *et al.*, 2000). Les résultats conduisent exactement aux mêmes conclusions : les séries de captures du thon rouge apparaissent significativement et négativement corrélées aux séries italiennes de températures. Les analyses menées tant dans le domaine du temps que dans celui des fréquences conduisent ainsi à des résultats concordants et solides. Des régressions et des corrélations significatives n'impliquent pas de relations causales mais ces analyses soulignent que l'hypothèse selon laquelle les fluctuations à long terme dans les captures de BFT seraient induites par des changements dans les températures ne peut pas être exclue. Pour valider cette hypothèse, des études plus poussées impliquant modélisation et recherches expérimentales sont nécessaires. Les processus sous-jacents les plus probables susceptibles d'être à l'origine d'une telle relation peuvent cependant d'ores et déjà être discutés.

II.4.2 Processus sous-jacents

Les fluctuations induites par le climat dans les captures de poissons ont été démontrées pour de nombreux stocks commerciaux (*e.g.* Cushing et Dickson, 1976 ; Cushing, 1995). Les changements de température sont connus pour influencer : (1) la capturabilité, (2) le recrutement, et (3) la dynamique spatiale des populations de poissons migrateurs (*e.g.* Southward *et al.*, 1988 ; Corten, 1990 ; Corten, 2001).

Comme cela a été détaillé en seconde partie (chapitre II.1), les changements de capturabilité des madragues apparaissent ici peu à même d'expliquer des fluctuations de captures simultanées et sur le long terme entre des engins distants de plus de 2000 km. Les hypothèses (2) et/ou (3) apparaissent plus vraisemblables. La température affecte principalement le recrutement des poissons à travers le développement et la mortalité des larves ainsi qu'à travers la croissance des juvéniles (Pepin, 1991 ; Ottersen et Sundby, 1995). Nos résultats mettent en avant une relation significative, mais négative, entre la température et les captures des madragues. En d'autres mots, plus la température est élevée, moins les captures de BFT en Méditerranée sont importantes. En l'état des connaissances actuelles, les températures élevées sont pourtant sensées favoriser le recrutement (les activités de maturation et de reproduction des espèces de thons, dont le BFT, requièrent des températures élevées, généralement > 24°C, Bye, 1989 ; Stacey, 1989 ; Mather *et al.*, 1995 ; Schaefer, 2001). En conséquences, la relation entre température et recrutement du BFT devrait être positive, et non négative. Ceci tend donc à rejeter l'hypothèse de changement de régime (variations à long terme) du recrutement en relation avec la température.

La relation négative entre les fluctuations à long terme de la température et les captures de BFT peuvent être plus facilement expliquées par les changements de schémas migratoires. Les changements dans les conditions

environnementales sont en effet connus pour influencer la distribution spatiale et temporelle et/ou les routes de migration des poissons (e.g. Southward *et al.*, 1988 ; Dickson et Brander, 1993 ; Lehodey *et al.*, 1997 ; Brill et Lutcavage, 2001), et pourraient notamment influencer les trajets migratoires du thon rouge (Binet et Leroy, 1987 ; Marsac, 1999). Le thon rouge est un grand pélagique qui réalise des migrations trans-atlantiques pour rejoindre ses aires de nutrition et de reproduction. Il est capturé par la pêche des madragues lorsqu'il migre en Méditerranée (première partie, chapitre II). Les fluctuations dans les captures des madragues pourraient ainsi résulter de changements dans la fréquentation des frayères méditerranéennes, liées à des variations des conditions océanographiques.

La relation négative entre fluctuations à long terme des températures et du BFT rend peu probable l'hypothèse de changement de régime du recrutement en relation avec la température. Elle pourrait être plus vraisemblablement expliquée par des changements des schémas migratoires.

II.4.3 Retour au bercail, opportunisme... ou un certain compromis?

Le thon rouge de l'Atlantique est généralement considéré visiter chaque année un de ses deux sites de ponte clairement identifié : la Méditerranée occidentale (principalement autour des îles Baléares et de la Sicile) d'une part et le golfe du Mexique d'autre part. Les résultats et la discussion ci-dessus conduisent à questionner l'hypothèse du "retour au bercail" ("*natal homing*", Cury, 1994 ; Cury *et al.*, 1998). Cette hypothèse postule que les jeunes individus, tous juste éclos, mémorisent des indices environnementaux qui déterminent leur futur environnement de reproduction. Dans le cas du thon rouge, cette hypothèse de retour au bercail est d'abord fondée sur l'observation millénaire des migrations du thon rouge en Méditerranée (Doumenge, 1998), mais cette migration récurrente n'implique pas que la taille de la population migrante soit restée constante au cours des siècles. Le second argument pour le retour au bercail est que seuls deux sites de ponte (*i.e.* des sites où ont été retrouvés à la fois des individus à pleine maturité, avec des oocytes hydratés, et des œufs) ont été clairement identifiés. Cependant, Mather *et al.* (1995) souligne que l'identification des sites de ponte à partir des conditions gonadiques est soumise à de nombreuses limites : (i) les individus à pleine maturité sont difficiles à capturer à l'hameçon dans la mesure où ils se montrent peu disposés à se nourrir (Sella, 1929b), (ii) le thon rouge peut parcourir de grandes distances en peu de temps (Lutcavage *et al.*, 2000 ; Gunn et Block, 2001) et (iii) sa ponte est séquentielle (Medina *et al.*, 2002). Enfin, de récentes études de marquages (par marques archives) ont fait la preuve d'une grande diversité des schémas migratoires : certains individus peuvent séjourner dans l'Atlantique ouest pendant des périodes plus ou moins prolongées, tandis que d'autres réaliseront des migrations trans-atlantiques, avec ou sans fréquentation annuelle d'un site de ponte connu. Ces études ont par ailleurs mis en avant de possibles nouvelles aires de ponte dans l'Atlantique ouest (Block *et al.*, 1998 ; Lutcavage *et al.*, 1999, 2000 ; Block *et al.*, 2001 ; Gunn et Block, 2001). Ces observations n'appuient donc pas l'hypothèse d'un strict retour au bercail.

L'hypothèse alternative au retour au bercail suppose qu'un individu essaie de sélectionner et de suivre les conditions environnementales optimales qui maximiseront son succès de reproduction (Harden Jones, 1968 ; Balchen, 1979 ; Potts et Wootton, 1984). Cette hypothèse de "reproduction opportuniste" est celle généralement acceptée pour les thons tropicaux (Cayré, 1990). Leur remarquable potentiel de migration leur permet d'explorer une large gamme de conditions environnementales et de sélectionner celles qui répondent le mieux à leurs besoins physiologiques et biologiques. Cependant, à la différence des thons tropicaux, les thons tempérés se nourrissent et se reproduisent sur des aires différentes (Fromentin et Fonteneau, 2001). Un comportement reproductif strictement opportuniste est donc improbable pour le thon rouge.

La stratégie reproductive du thon rouge pourrait finalement se placer quelque part entre les deux hypothèses évoquées ci-dessus, un "retour aux sources opportuniste" en quelque sorte. Une récente étude physiologique souligne que les derniers stades de la maturation des gonades du thon rouge (production intense d'oocytes de stades 3 et 4) interviennent au cours d'une période de temps relativement courte et probablement sous le contrôle de la température (Medina *et al.*, 2002). Si des températures favorables induisent les derniers stades de la gamétogenèse et, dès lors, la reproduction, on peut envisager que des sites de l'Atlantique Nord, rencontrés par le thon rouge au cours de ses migrations, deviennent des aires de ponte favorables lorsque la température de l'eau augmente. En d'autres termes, la population de thon rouge atlantique pourrait se reproduire ailleurs que sur les aires traditionnelles (*i.e.*, la Méditerranée occidentale et le golfe du Mexique) pendant les périodes chaudes. Cette hypothèse est en accord avec les récents enregistrements de marquage *pop-up* (Lutcavage *et al.*, 1999 ; Block *et al.*, 2001) et plusieurs travaux passés qui mentionnent l'existence d'autres aires de ponte hypothétiques au niveau de la baie Ibero-Marocaine et du golfe de Gascogne (*e.g.* Buen, 1925, 1927 ; Mather *et al.*, 1995). Au contraire, en période froide, les activités reproductrices seraient confinées au niveau des aires traditionnelles et permanentes (aires qui conviendraient également pendant les périodes chaudes). Cette hypothèse rejoint l'idée émise dès 1964 par Sara (1964, 1973), qui stipulait que, parmi les thons rassemblés dans la baie ibéro-marocaine, seul « *un nombre déterminé par les conditions environnementales* » rejoignait la Méditerranée pour s'y reproduire.

Combinant l'hypothèse de "retour au bercail" avec la stratégie opportuniste des thonidés, l'hypothèse d'un comportement de "retour aux sources opportuniste" permet de donner une explication cohérente à la relation négative observée entre fluctuations à long terme du thon rouge en Méditerranée et températures, en accord les connaissances actuelles de l'écologie et la biologie du thon rouge.

Implication des fluctuations pour l'évaluation et la gestion du stock

*“Il est intéressant de voir que les gens qui se moquent de la science fiction
se fient à la météo et aux économistes.”
Kevin Throop III*

Introduction

Bien que le thon rouge de l'Atlantique soit étudié depuis plus d'un siècle, de nombreuses incertitudes demeurent et rendent délicate la gestion du stock. En 2001, la situation est devenue si critique que les évaluations quantitatives du stock Est n'ont pas été réalisées à l'ICCAT (ICCAT, 2003). Les incertitudes affectant les procédures d'évaluation peuvent être résumées en quatre grands points (Fonteneau et Fromentin, 2000 ; Fromentin, 2003) : (i) les incertitudes liées aux captures (captures sous et/ou mal déclarées, captures illégales de poissons sous-taille, captures des navires battant pavillon de complaisance), (ii) les incertitudes relatives à l'effort de pêche (difficultés de quantifier l'évolution de la technologie des engins et des stratégies de pêche, les changements des schémas de sélectivité et de zones de pêche, la coopération et la compétition entre navires, ...), (iii) les incertitudes liées aux modèles d'évaluation (procédures d'ageage, indices d'abondance estimés à partir de GLM, ...) et (iv) les incertitudes liées à un manque d'informations biologiques et écologiques. Cette dernière source d'incertitudes, souvent négligée, est pourtant essentielle. Elle concerne notamment le manque d'information sur la mortalité naturelle, les routes migratoires, la génétique des populations, les variations inter-annuelles de la croissance et la méconnaissance de la dynamique à long terme de la population.

Nos analyses permettent de documenter ce dernier point, en montrant que la population de thon rouge accessible à la pêche en Méditerranée fluctue naturellement, suivant de grands pseudo-cycles séculaires et des périodes d'une vingtaine d'années. Ces résultats conduisent à questionner les stratégies de gestion du thon rouge, notamment dans une approche de précaution. En effet, le stock de thon rouge d'Atlantique Est et de Méditerranée est actuellement géré par des quotas, associés à des mesures de protection des juvéniles (taille minimum au débarquement, ICCAT, 2003). Pour fixer les quotas, la commission se réfère à des points cibles de référence fixes et limites⁽¹⁾ (e.g. la production maximale soutenable, PME⁽²⁾, ICCAT, 2000a). On peut se demander s'il n'est pas un peu réducteur de se référer à une mesure si simplificatrice pour gérer l'exploitation d'une population à dynamique complexe. Ce constat, bien que trivial et déjà énoncé pour d'autres populations exploitées (e.g. la morue de mer

⁽¹⁾ Un point cible de référence (souvent inopportunément appelé point *biologique* de référence) est un étalon qu'il faut atteindre en moyenne conformément à un ensemble donné d'objectifs de gestion. Les cibles impliquées à l'ICCAT sont la PME, f_{PME} (effort de pêche à PME) et B_{PME} (biomasse à PME, ICCAT, 2000b).

⁽²⁾ La production maximale soutenable est la production (capture) moyenne la plus élevée qui peut être prélevée à long terme sur un stock, ce qui correspond à la production escomptée du fait de pêcher à f_{PME} . L'objectif ultime de l'ICCAT est de garantir que les stocks se maintiennent à un niveau qui permette une production au niveau de la PME (ICCAT, 2000a, 2000b). L'expression "production maximale soutenable" est la traduction littérale du fameux "*Maximum Sustainable Yield*" (MSY) des anglophones ; une autre traduction souvent utilisée est "Production Maximale Equilibrée" (d'où l'acronyme PME), mais notre propos portant ici moins sur la notion d'équilibre que sur celle de point de référence, nous lui avons préféré la première.

du Nord, Restrepo *et al.*, 1992 ; Caddy, 1998), n'est pourtant pas encore pris en compte dans les processus de gestion actuels. Dans le cas de l'ICCAT, la notion de PME fait toujours partie intégrante de sa convention⁽¹⁾.

Cette dernière partie se propose donc d'évaluer l'impact éventuel des fluctuations sur les estimations actuellement réalisées dans le cadre des évaluations de stock. Elle est organisée de manière à représenter la démarche suivie. Le chapitre I présente la première approche envisagée : l'emploi d'un outil simple, le modèle global, pour quantifier l'impact des fluctuations sur l'estimation de points de référence. Une approche par simulation, se plaçant dans le cadre des procédures d'évaluation de l'ICCAT pour discuter les diagnostics posés en fonction de différents scénarios d'état de stock, est finalement retenue et mise en œuvre dans un second chapitre.

⁽¹⁾ Le texte de la convention stipule que l'ICCAT est responsable de « *l'étude et l'évaluation de renseignements relatifs aux mesures et méthodes visant à maintenir, dans la zone de la Convention, les populations de thonidés à des niveaux permettant un rendement maximal soutenu et compatible avec une exploitation efficace de ces ressources* » (ICCAT, 1966).

I. Approche par modèle global

Le modèle global, ou modèle de production, est l'un des plus simples outils disponibles pour caractériser l'état et la productivité d'une population de poisson. De prime abord, il apparaît particulièrement intéressant pour étudier le biais potentiel induit par les fluctuations sur les estimateurs utilisés dans les procédures d'évaluation de stock car :

- il repose sur un concept simple ; le changement de taille du stock d'une année à l'autre est supposé être la différence entre la dynamique de biomasse (croissance individuelle, reproduction et mortalité naturelle, modélisées en une seule fonction) et les captures par la pêche. Si la dynamique de biomasse excède les captures, la population augmente et *vice versa*. Le revers de cette simplicité, c'est que le modèle global présente d'importantes limitations (Larkin, 1977). Il est tout d'abord incapable de prendre en compte une variation du diagramme d'exploitation (ne rentrant pas dans la "boîte noire" du stock). Il considère un stock unique et clos, les taux d'immigration et d'émigration étant considérés comme négligeables par rapport aux taux de croissance et de mortalité. De plus, les interactions avec d'autres espèces (disponibilité en nourriture, prédation,...), tout comme les variations spatiales ou environnementales⁽¹⁾, sont négligées en regard des effets de la pêche et de la croissance intrasèque. Cependant, par son approche synthétique et malgré ces limites, le modèle global présente pour cette étude l'indéniable avantage de permettre l'utilisation des données de madragues qui ne sont pas ventilées par classe d'âge.

- il intègre explicitement la notion de capacité biotique. Les modèles globaux sont construits à partir de l'hypothèse fondamentale de l'existence de mécanismes de régulation interne au stock, *i.e.* il existe une certaine biomasse K pour laquelle un stock vierge est en situation d'équilibre stable avec son milieu : c'est la capacité biotique ou la capacité de charge du milieu. Nos analyses (seconde partie) ont mis en évidence de larges fluctuations naturelles dans les abondances du stock reproducteur méditerranéen de thon rouge. Ainsi, la capacité de charge du thon rouge (le " K " du modèle global) varierait dans le temps. Le modèle global permet de comparer l'estimation de points de référence dans l'hypothèse d'un K fixe et d'un K variable.

Considérons par exemple un des premiers modèles de production largement utilisé, celui de Schaefer (1954) :

$$\frac{dB}{dt} = rB\left(1 - \frac{B}{K}\right) - C$$

où B représente la biomasse du stock, K la capacité biotique, r le taux de croissance de la population et C les captures.

⁽¹⁾ Cependant, des composantes spatiale ou environnementale, lorsqu'elles sont considérées d'importance significative, peuvent être ajoutées (Laloë, 1989 ; Die *et al.*, 1990 ; logiciel d'ajustement CLIMPROD, Fréon *et al.*, 1993).

Le taux de capture C est supposé proportionnel à la taille du stock et à l'effort de pêche :

$$C = qEB$$

où B représente la biomasse du stock, E l'effort de pêche et q la capturabilité. Les points d'intérêts pour la gestion, en particulier la production maximale soutenable (PME) et le niveau d'effort pour lequel la PME est atteinte (f_{PME}), sont obtenus directement à partir des paramètres r , K et q (Tab. 4. 1).

Tab. 4. 1 : Résumé des paramètres d'intérêts pour la gestion pour le modèle de Schaefer (Hilborn et Walters, 1992).

Production Maximale Equilibrée (PME)	$rk/4$
Taille du stock à la PME	$k/2$
Taux d'exploitation à la PME	$r/2$
Effort requis pour atteindre la PME (f_{PME})	$r/2q$
Taux maximum d'exploitation	r
Effort au taux maximum d'exploitation	r/q

Le modèle global constitue ainsi un outil simple, permettant l'utilisation des données disponibles de captures des madragues, pour quantifier l'impact des fluctuations (*i.e.* un K constant ou variable) sur les estimations de points de références utilisés dans les procédures classiques d'évaluation de stock.

I.1. Cadre bayésien : PROCEAN

Pour tester l'impact des fluctuations sur les estimateurs utilisés dans les procédures d'évaluation de stock, nous avons d'abord tenté d'utiliser un modèle de production non équilibré permettant d'estimer la capturabilité et la capacité biotique dans un contexte bayésien : PROCEAN (PROduction Catch Effort Analysis, Maury, 2001a, 2001b). Cette partie a été réalisée en collaboration avec O. Maury (IRD) et E. Chassot (ENSAR) dans le cadre du PNEC (ART4).

I.1.1 Le modèle

PROCEAN est basé sur un modèle global généralisé (Pella et Tomlinson, 1969), qui relie la biomasse B à la mortalité par pêche F par l'équation suivante (écrite sous forme continue) :

$$\frac{dB_{(t)}}{dt} = rB_{(t)} \left(1 - \left(\frac{B_{(t)}}{K_{(t)}} \right)^{m-1} \right) - F_{(t)}B_{(t)} \text{ avec } m > 1$$

B étant la biomasse, F la mortalité par pêche, K la capacité biotique, ou capacité de charge, du système (égale à la biomasse à l'état vierge), ces paramètres varient avec le temps t . r est le taux de croissance de la population et m un paramètre structurel de forme.

Pour introduire les captures et l'effort de différentes flottilles (ici, différentes madragues), la mortalité par pêche F_t représente la somme des taux de mortalité instantanée par pêche :

$$\begin{cases} \frac{dB_{(t)}}{dt} = rB_{(t)} \left(1 - \left(\frac{B_{(t)}}{K_{(t)}} \right)^{m-1} \right) - \sum_{i=1}^n q_{i,(t)} f_{i,(t)} B_{(t)} \\ \frac{dC_{i,(t)}}{dt} = q_{i,(t)} f_{i,(t)} B_{(t)} \end{cases}$$

n étant le nombre total de flottilles ; q étant la capturabilité, f l'effort de pêche nominal et C les captures, donnés pour chaque flottille i et variant avec le temps t .

L'une des originalités de ce modèle consiste à estimer les différents paramètres dans un cadre bayésien. La paramétrisation (*i.e.* la distribution postérieure) dépend donc non seulement de l'ajustement des paramètres aux données, en utilisant le maximum de vraisemblance, mais aussi des *a priori* faits par le modélisateur, qui peut ainsi utiliser l'ensemble de ses connaissances (y compris celles d'ordre intuitif, qualitatif ou semi-quantitatif, Hilborn et Mangel, 1997). Des *a priori* sur le taux intrinsèque de croissance de la population et sur le paramètre structurel de forme du modèle ont ainsi été développés.

1.1.2 Estimations des *a priori*

L'*a priori* sur le taux intrinsèque d'accroissement r de la population est estimé selon la méthode démographique classique (Krebs, 1972 ; Begon *et al.*, 1996 ; Cortes, 1998). Il est déduit de l'équation :

$$\sum e^{-ra} S_a F_a = 1$$

où S_a est le taux de survie et F_a le taux de fécondité d'un individu d'âge a .

L'*a priori* sur le paramètre de forme du modèle global m est développé selon la méthode proposée par McAllister *et al.* (2000). Il s'agit de déterminer une valeur possible de B_{PME}/K à partir des valeurs de r et de A , temps de génération, déterminés par la méthode démographique explicitée ci-dessus, en résolvant l'équation de Fowler (1988) :

$$\frac{B_{PME}}{K} = f(\ln(rA))$$

avec $A = \frac{\sum a S_a F_a}{\sum S_a F_a}$, K la capacité biotique, et B_{PME} la biomasse au point de

production maximale soutenable.

Le point d'inflexion m du modèle global est alors déterminé en résolvant l'équation de Fletcher (1978) :

$$\phi = \frac{B_{PME}}{K} = \left(\frac{1}{m} \right)^{1/m-1}$$

Les paramètres S_a et F_a sont estimés à partir de paramètres dont la distribution est considérée connue (Encadrés 1 et 2).

Un tirage aléatoire dans ces distributions, réitéré 1 000 fois, permet d'obtenir une distribution *a priori* de r et de m (Fig. 4. 1). Des fonctions de densité ont été ajustées aux distributions de r et de m . Le paramètre r est supposé suivre une loi normale de moyenne $\mu = 0,34$ et $\sigma = 0,14$, le paramètre m une loi gamma de paramètre $a = 8,57$ et $b = 0,10$.

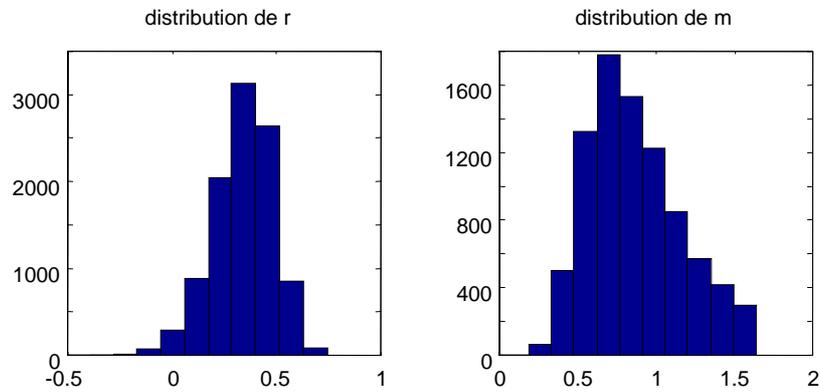


Fig. 4. 1 : *A priori* sur le taux intrinsèque de croissance de la population de BFT r (à gauche) et sur le paramètre de forme du modèle global m (à droite).

En fait, de par leur méthode d'estimation, les paramètres r et m du modèle global sont liés ; ils doivent donc être considérés conjointement (Chassot, 2001, Fig. 4. 2) :

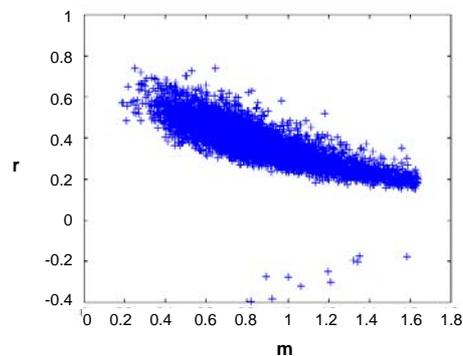


Fig. 4. 2 : *A priori* conjoints sur le taux intrinsèque de croissance de la population de thon rouge r et sur le paramètre de forme du modèle global m .

1.1.3 Ajustement du modèle et conclusion

Ce modèle a tout d'abord été ajusté aux données historiques de captures par les madragues, en supposant une capacité de charge du milieu constante (K , *i.e.* en faisant l'hypothèse traditionnelle et toujours en activité que la biomasse de thon rouge est stationnaire). Le modèle a ensuite été ajusté en supposant que la capacité de charge pouvait fluctuer (les variations de K étaient supposées suivre une marche aléatoire). L'objectif était de comparer les estimations de la PME dans les deux cas et ainsi d'estimer le biais lié à l'hypothèse de stationnarité lorsque l'abondance est connue pour varier naturellement.

Malheureusement, le modèle s'est avéré trop sensible aux conditions initiales et l'ajustement insatisfaisant (estimateurs toujours sur les bornes). La sensibilité aux conditions initiales est un problème récurrent du modèle global non équilibré. Elle a été vérifiée ici en tentant d'ajuster le modèle global de Punt et Hilborn (*Biodyn*, Punt et Hilborn, 1996) aux données des madragues. Ces tentatives se sont révélées infructueuses, le modèle ne convergeant pas. La même opération a été menée avec des séries exemples, dont les paramètres à estimer (K , q) étaient connus : elle a montré que le modèle fournit des valeurs aberrantes ou se montre incapable de converger dès que lors que les conditions initiales s'éloignent des valeurs de référence. Par ailleurs, il apparaît clairement que PROCEAN est surparamétré par rapport à l'information disponible dans le cas des madragues. Il manque notamment une information sur la capturabilité : lorsque celle-ci est fixée dans le modèle, toute la variabilité se retrouve dans la capacité biotique et inversement. L'approche bayésienne tentée avec PROCEAN se révèle donc infructueuse et une seconde approche, basée sur les modèles mixtes, est envisagée.

I.2. Cadre des modèles mixtes

Une seconde tentative, conservant la philosophie de la démarche précédente, a été développée avec le concours d'Ottar Bjornstad (Université de Pennsylvanie, USA) dans le cadre de STROMBOLI. Elle a consisté à écrire le modèle global de Schaefer sous forme linéaire, afin d'estimer les paramètres dans le cadre des modèles linéaires généralisés et des modèles mixtes.

I.2.1 Le modèle

Le modèle se base sur l'équation de Schaefer (1954), qui s'écrit sous forme discrète :

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right) - C_t$$

B_t étant la biomasse au temps t , C_t les captures au temps t , K la capacité biotique, et r le taux de croissance de la population.

Postulant que les fluctuations des captures des madragues sont représentatives des fluctuations d'abondance de thon rouge en Méditerranée, à un facteur de proportionnalité près (seconde partie, chapitre II), nous pouvons écrire :

$$B_t = \frac{C_t}{\alpha} \text{ avec } \alpha \in]0,1[$$

d'où

$$\frac{C_{t+1}}{\alpha} = \frac{C_t}{\alpha} + \frac{rC_t}{\alpha} \left(1 - \frac{C_t}{\alpha K}\right) - C_t$$

$$\Leftrightarrow C_{t+1} = C_t + rC_t - \frac{rC_t^2}{\alpha K} - \alpha C_t$$

$$\Leftrightarrow C_{t+1} = (1 + r - \alpha)C_t - \frac{r}{\alpha K} C_t^2$$

$$\Leftrightarrow C_{t+1} = C'_t + \frac{1}{K} C''_t$$

avec

$$C'_t = (1 + r - \alpha)C_t$$

$$C''_t = -\frac{r}{\alpha} C_t^2$$

1.2.2 Estimations des paramètres

Le paramètre r peut être estimé indépendamment (chapitre 1.1). Il s'agit donc de résoudre une équation linéaire à 3 termes, avec deux paramètres à estimer ($(1-\alpha)$ et $(1/\alpha K)$). Les modèles mixtes constituent un outil puissant et flexible pour étudier un tel système. Dédiés à l'étude des relations entre une variable réponse et des covariables groupées selon un ou plusieurs facteurs, ils permettent d'inclure à la fois des effets fixes⁽¹⁾ et des effets aléatoires⁽²⁾ (S-Plus, 2001). Ainsi, le paramètre intéressant, $(1/K)$, soupçonné d'être variable, peut être estimé avec un effet aléatoire ; $(1-\alpha)$ en revanche, est estimé avec un effet fixe. L'autocorrélation (*i.e.* tendances pseudo-cycliques) n'étant pas négligeable, elle est prise en compte dans le modèle (les résidus sont spécifiés se distribuer selon un ARMA(p,q)⁽³⁾ en utilisant la fonction "corrstruct", S-Plus, 2001). Le paramètre α étant inconnu, une boucle sur un intervalle de valeurs réalistes ($\alpha \in [0,01 ; 0,9]$) est exécutée et un modèle est estimé pour chaque valeur de α . Le modèle qui maximise la vraisemblance est conservé.

1.2.3 Ajustement du modèle et conclusion

De nouveau, l'ajustement du modèle s'est révélé non satisfaisant, avec une mauvaise estimation des paramètres (large intervalle de confiance) et des résidus présentant une forte structure quadratique.

Il apparaît ainsi que la forme quadratique du modèle global ne semble pas correspondre à l'information contenue dans les données de captures historiques des madragues.

Le modèle global se révélant non adapté, nous nous sommes placé dans le cadre des groupes de travail de l'ICCAT et avons envisagé l'utilisation d'un modèle structuré par âge, l'analyse des populations virtuelles (VPA).

⁽¹⁾ Effets fixes : paramètres associés à la population entière.

⁽²⁾ Effets aléatoires : paramètres associés à des unités expérimentales tirées au hasard dans la population.

⁽³⁾ L'ARMA(p,q) est un modèle autorégressif d'ordre p et de moyenne mobile d'ordre q (Box et Jenkins, 1976).

II. Approche par simulations

Pertinence des diagnostics issus des VPA

L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure les fluctuations à long et moyen terme peuvent biaiser le diagnostic et les conclusions des évaluations de stock telles qu'elles sont actuellement conduites par l'instance de gestion compétente. Pour cela, nous avons employé le modèle structuré par âge utilisé à l'ICCAT, l'analyse de populations virtuelles (VPA, Gulland, 1965). Cette approche, dite analytique ou structurale, dépasse l'approche globale en "plongeant" dans les mécanismes de la dynamique du stock : elle s'appuie sur la connaissance des captures faites à chaque âge pour mesurer les processus de disparition d'une cohorte⁽¹⁾, et en déduire une estimation de l'abondance des individus de chaque âge chaque année.

La VPA est l'une des plus puissantes techniques disponibles actuellement pour l'analyse des pêcheries (Hilborn et Walters, 1992). Mais parallèlement, elle est très gourmande en données. Elle nécessite notamment une matrice de capture détaillée par âge, ce qui n'est pas le cas des données des madragues. Cette approche implique donc d'avoir recours à des données simulées. Nous nous sommes donc placés dans un cadre théorique et avons élaboré une simple procédure de simulation, couplant un modèle de dynamique de population avec une VPA (Fig. 4. 3). Le modèle de dynamique de population permet de générer une matrice de captures, en envisageant différents scénarios sur l'origine des fluctuations et différents schémas de mortalités par pêche. La matrice de captures est alors utilisée dans une VPA pour juger de l'état du stock et les diagnostics sont posés, comme ils le seraient à l'ICCAT. La pertinence des prédictions est finalement appréciée en les comparant avec le devenir de la population simulée.

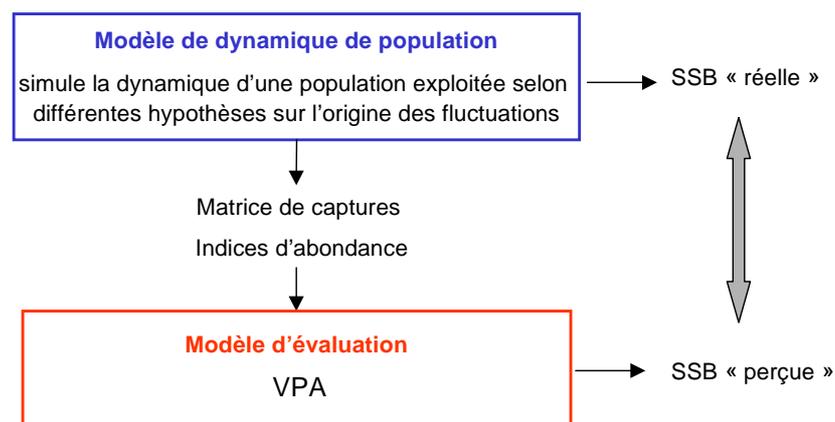


Fig. 4. 3 : Représentation du cadre de simulation, couplant un modèle de dynamique de population exploitée à une VPA.

⁽¹⁾ Une cohorte rassemble tous les individus nés lors d'une même période de reproduction, une année donnée. Pour le thon rouge, on considère une cohorte par an.

II.1. Matériel et méthodes

II.1.1 Le modèle de dynamique de population

- Concept de base

Le modèle de dynamique de population simulée est fondé sur celui utilisé par Fromentin et Fonteneau (2001) pour étudier les effets de la pêche sur la dynamique de population du thon rouge. Il s'appuie sur l'équation de Gompertz, également à la base de la VPA :

$$N_{a+1,t+1} = N_{a,t} e^{-Z_t}$$

où $N_{a,t}$ est le nombre de poisson d'âge a au temps t , Z est la mortalité totale de l'âge $(a-1)$ à l'âge a . $Z=M+F$, M représentant la mortalité naturelle et F , la mortalité par pêche. Les processus de densité-dépendance n'ayant pas été clairement établis chez le thon rouge, aucune mortalité de ce type n'est introduite pour les âges vulnérables (juvéniles, Myers et Cadigan, 1993 ; Fromentin *et al.*, 2001).

- Paramétrisation

Les principaux traits de vie utilisés dans le modèle (détaillés dans la première partie, chapitre I.3 et encadrés 1 et 2), sont synthétisés dans le Tab. 4. 2.

Tab. 4. 2 : Traits de vie du thon rouge utilisés dans le modèle de simulation.

Traits de vie	Paramètres
Fréquence de ponte	1 cohorte/an
Durée de vie	20 ans
Âge à maturité	4,5 ans
Taux de mortalité naturelle M_{BFT} (âge 1 à 10+)	[0,49 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,24 ; 0,20 ; 0,175 ; 0,15 ; 0,125 ; 0,1]
Poids moyens W_{BFT} (âge 1 à 20)	[4 ; 11 ; 24 ; 39 ; 55 ; 74 ; 95 ; 117 ; 141 ; 161 ; 187 ; 213 ; 238 ; 263 ; 287 ; 310 ; 332 ; 354 ; 374 ; 393] kg

La population se reproduit suivant la loi stock-recrutement de Beverton et Holt (1957), qui suppose un mécanisme de densité-dépendance et peut se formaliser ainsi (Cushing, 1995) :

$R = aSSBf\left(\frac{SSB}{K}\right)$ où R est le recrutement⁽¹⁾ (nombre de recrues par an), a la pente à l'origine, SSB la biomasse du stock reproducteur en tonnes et K , la biomasse seuil. Le modèle de Beverton a été choisi car il est utilisé par le groupe de travail thon rouge de l'ICCAT. Ce choix pouvant apparaître arbitraire, des simulations ont également été conduites avec un modèle stock recrutement de Ricker (1954) : elles conduisent à des résultats équivalents. Pour des raisons de simplicité, les variations environnementales à court terme pouvant influencer le succès du recrutement d'une année sur l'autre sont négligées.

La pêche est prise en compte dans le modèle par le terme F de mortalité par pêche. Les paramètres de mortalités par pêche aux âges et de sélectivité sont définis comme égaux à ceux de la VPA (chapitre II.1.3 et annexe C).

⁽¹⁾ Le recrutement est utilisé ici au sens écologique du terme (*i.e.* nombre de juvéniles intégrant chaque année une population donnée) et non au sens halieutique (entrée dans la phase exploitable d'un stock).

- Sorties du modèle de simulation

Le modèle permet de générer les données nécessaires à la VPA :

- une matrice de captures (en nombre) :

$$C_{a,t} = Nd_{a,t} \frac{F_{a,t}}{F_{a,t} + M_{a,t}} \left(1 - e^{-(F_{a,t} + M_{a,t})}\right)$$

- des indices d'abondance relative pour les âges 2, 4 et 8 requis pour l'estimation des F terminaux. Ces indices d'abondance sont égaux, à un facteur de capturabilité q constant près, à l'abondance (en nombre d'individu) de la classe d'âge considérée (N_a) :

$$I_{a,t} = qN_{a,t}$$

Les simulations sont réalisées avec Matlab 6.1 (Matlab, 2001).

II.1.2 Les scénarios envisagés

L'objectif consiste à voir si la VPA est capable de reconstituer les fluctuations et quelle est la pertinence des diagnostics posés à l'issue de la procédure d'évaluation, que les fluctuations soient liées à des variations à long terme du recrutement ou à des changements des routes de migrations. Pour cela, plusieurs scénarios sont élaborés, envisageant deux hypothèses sur l'origine des fluctuations, deux niveaux d'abondance et trois cas d'évolution de la mortalité par pêche.

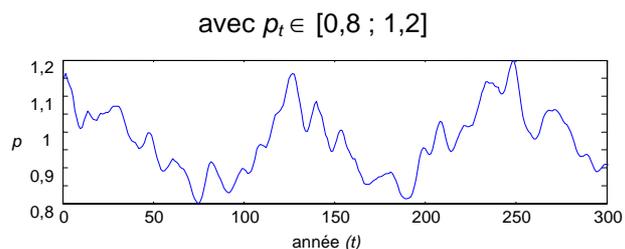
- Hypothèses sur l'origine des fluctuations

Deux hypothèses principales ont été avancées pour expliquer l'origine des fluctuations observées (troisième partie de ce document). La première hypothèse suppose que le stock, entièrement accessible à la pêche, subit des fluctuations d'abondance dues par exemple à des variations du recrutement. La seconde propose des changements dans les routes de migrations des reproducteurs, induisant des variations dans la proportion de la population accessible à la pêche.

Ces deux origines potentielles n'ont pas les mêmes conséquences en terme de gestion. Les deux hypothèses sont donc envisagées et impliquent de décliner le modèle de base en deux versions. Notons Nd la population disponible à la pêche, et p_t une proportion, fondée sur les fluctuations de la série synthétique (deuxième partie, chapitre II.3) :

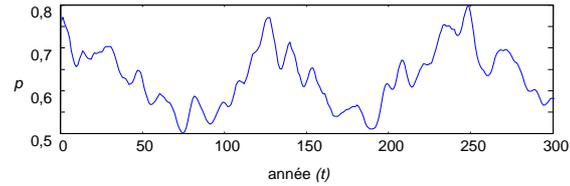
- l'hypothèse "recrutement" suppose des variations d'abondance de la population : les fluctuations trouvent leur source au niveau du renouvellement de la population, *i.e.* le recrutement varie entre 80 et 120% du recrutement attendu sous Beverton et Holt suivant les fluctuations de la série synthétique :

$$\begin{cases} N_{a+1,t+1} = N_{a,t} e^{-(F_{a,t} + M_a)} \\ Nd_{a+1,t+1} = N_{a+1,t+1} \\ R = aSSBf\left(\frac{SSB}{K}\right)p_t \end{cases}$$



- l'hypothèse "migratoire" envisage des variations dans la fréquentation de la zone Méditerranée - proche Atlantique, *i.e.* c'est la proportion du stock accessible à la pêche qui fluctue. Les fluctuations alors appliquées au niveau de l'abondance supportant la mortalité par pêche : toute la population meurt naturellement mais seule une fraction, dont l'importance varie dans le temps, meurt par pêche.

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{a+1,t+1} = [p_t N_{a,t} e^{-(F_{a,t} + M_a)}] + [(1 - p_t) N_{a,t} e^{-M_a}] \quad \text{avec } p_t \in [0,5 ; 0,8] \\ N d_{a+1,t+1} = p_t N_{a,t} e^{-(F_{a,t} + M_a)} \\ R = a S S B f \left(\frac{SSB}{K} \right) \end{array} \right.$$



Il est à noter que la proportion p_t appartenant à l'intervalle $[0,5 ; 0,8]$, la biomasse accessible à la pêche ne représente jamais plus de 80% de la biomasse totale, *i.e.* il existe une biomasse cryptique de 20% minimum (Fonteneau *et al.*, 1998).

- Etat de la population

Pour évaluer l'impact des fluctuations sur les diagnostics posés à l'issue de la VPA, deux cas contrastés sont envisagés :

- le diagnostic est posé au "sommet" d'une fluctuation, *i.e.* lorsque l'abondance (totale ou disponible pour la pêche) est forte mais va décliner.
- le diagnostic est posé au "creux" d'une fluctuation, *i.e.* lorsque l'abondance (totale ou disponible pour la pêche) est faible mais va croître.

- Scénarios de pêche

Chacun de ces cas est finalement comparé sous 3 scénarios de pêche différents (Fig. 4. 4) :

- un scénario à F constant dans le temps et bas, soit approximativement $F=1,5 M$;
- un scénario à F constant dans le temps et haut, soit approximativement $F= 3 M$;
- un scénario à F variant dans le temps, suivant un effort considéré comme réaliste sur la période 1950-1999 : une baisse liée à la fin de la pêche nordique dans les années 50-60, suivie d'une augmentation avec l'introduction de la palangre et le développement de la pêche à la senne en Méditerranée. Ce dernier scénario permet de simuler l'évolution de l'exploitation sur la période récente. Les deux premiers scénarios constituent des éléments de comparaison et permettent d'apprécier le comportement du modèle.

L'objectif étant d'évaluer l'impact des fluctuations à long terme sur les diagnostics posés lors des évaluations de stock, l'étude est conduite sur 150 ans. Une première période de transition de 50 ans permet d'atteindre un état d'équilibre. La simulation proprement dite, pendant laquelle F peut varier, est ensuite conduite sur 50 ans. Une dernière période de 50 ans, pendant laquelle la mortalité par pêche est alors considérée comme stable, permet d'envisager le devenir du stock sous hypothèse de *statu quo* de l'exploitation.

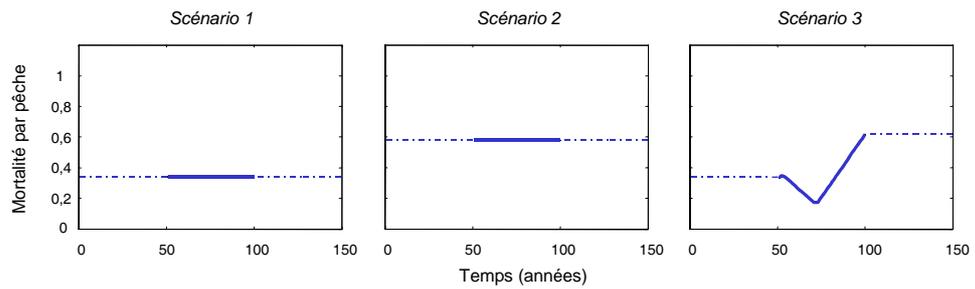


Fig. 4. 4 : Trois scénarios d'évolution de la mortalité par pêche.

Scénario 1 : F constante et basse ; scénario 2 : F constante et haute ; scénario 3 : F suivant une évolution considérée comme réaliste sur la période 1950-1999. Pour simplifier, seule la mortalité de l'âge 8 est représentée. Les simulations sont conduites sur 150 ans, comprenant une période de transition pour atteindre un état d'équilibre (50 ans), la simulation proprement dite (50 ans) et une période de *statu quo* de l'exploitation (50 ans).

- Analyses

Les analyses vont donc considérer successivement les 2 hypothèses sur les origines des fluctuations, 2 états de la population et 3 scénarios d'effort de pêche, soit 12 analyses (Fig. 4. 5).

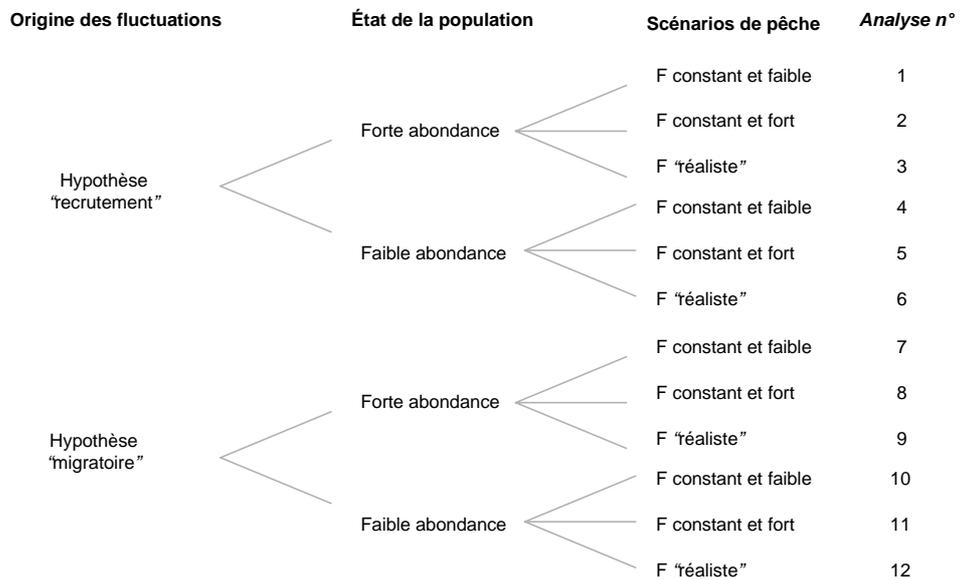


Fig. 4. 5 : Présentation des 12 analyses considérant 2 hypothèses sur les origines des fluctuations, 2 états de la population accessible à la pêche et 3 scénarios d'évolution de la mortalité par pêche.

II.1.3 La VPA

Le modèle de dynamique de population est couplé à une VPA, modèle d'évaluation qui permet d'estimer l'abondance historique et les mortalités par pêche d'après une série temporelle de données de captures effectuées pour chaque groupe d'âge, en suivant l'évolution de chaque cohorte individuellement.

- Concept de base

La VPA repose sur deux équations :

- l'équation de Gompertz ou équation de survie, qui décrit l'abondance (en nombre d'individus) d'une cohorte d'âge $a+1$ l'année $t+1$ ($N_{a+1,t+1}$) en fonction du nombre d'individu d'âge a l'année t ($N_{a,t}$), du coefficient de mortalité par pêche $F_{a,t}$ et du coefficient de mortalité naturelle $M_{a,t}$:

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

- l'équation des captures, qui estime le nombre $C_{a,t}$ des captures faites au sein de chaque cohorte d'âge a l'année t , en fonction de l'abondance de la cohorte $N_{a,t}$ et de la mortalité :

$$C_{a,t} = N_{a,t} \frac{F_{a,t}}{F_{a,t} + M_{a,t}} \left(1 - e^{-(F_{a,t} + M_{a,t})} \right) \quad (2)$$

De ces deux équations, on déduit :

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

La VPA apparaît ainsi surparamétrée. Des hypothèses doivent donc être faites sur certains des paramètres. Traditionnellement, on pose M et les F "terminaux" (i.e. les F du dernier âge A et les F de la dernière année T). Ainsi, connaissant $C_{A,T}$, $M_{A,T}$ et $F_{A,T}$, il est possible de calculer $N_{A,T}$ (équation 2). $F_{A-1,t-1}$ peut alors être calculé par résolution numérique itérative (équation 3) et $N_{A-1,t-1}$ être finalement estimé par l'équation de survie (équation 1). En remontant dans les cohortes et les années, il est ainsi possible de déterminer l'abondance et la mortalité par pêche pour tous les âges et années (Fig. 4. 6).

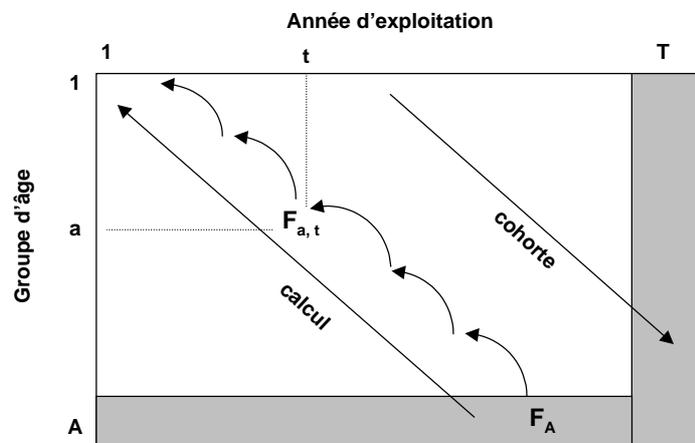


Fig. 4. 6 : Schéma explicatif de la résolution d'une VPA, cohorte par cohorte (Pelletier, 1991).

- **Modèle et paramétrisation**

Le modèle et la paramétrisation adoptés ici sont ceux des groupes de travail de l'ICCAT (ICCAT, 1999). Ils sont détaillés en annexe C et sont résumés ici.

Les hypothèses faites sur les F terminaux sont les suivantes :

- les F -ratios ne sont pas estimés et sont posés égal à 1 pour tous les âges.
- les F terminaux des âges 2, 4 et 8 sont estimés directement. Les F terminaux des âges 1 et 3 sont posés égaux au F terminal de l'âge 2. Ceux des âges 5, 6, 7 sont posés égaux à celui de l'âge 4, ceux des âges 9 et 10+ égaux à celui de l'âge 8. L'exploitation ne touchant pas au même titre toutes les classes d'âge, un vecteur de sélectivité fonction de l'âge S_a est considéré (annexe C).

Le programme utilisé requiert également en entrée un certain nombre de paramètres biologiques (taux de mortalité naturelle, âge à maturité, poids aux âges, paramètres de la loi de stock-recrutement), qui sont posés logiquement égaux à ceux utilisés dans le modèle de dynamique de population (Tab. 4. 2).

Comme à l'ICCAT, 10 classes d'âge (1 à 10+) sont considérées.

II.2. Résultats

Avant de procéder aux analyses, les limites de la procédure de simulation, et notamment les problèmes récurrents de la VPA liés à l'estimation de certains paramètres lorsque la pression de mortalité ($F+M$) sur la population est faible ont été testées (annexe C). Il apparaît ainsi que les estimations de la VPA sont fiables dès lors que Z est significative ($Z=2M$). Par ailleurs, l'influence de la longueur de la fenêtre considérée (e.g. 25, 50 ans) a également été testée. Elle n'apparaît pas avoir d'effet : si la matrice de captures est bonne, la VPA reconstitue bien le SSB quelle que soit la longueur de la fenêtre.

II.2.1 Fluctuations dans le recrutement

La procédure de simulation est tout d'abord appliquée au cas des fluctuations liées à des changements à long terme des abondances, par exemple en relation avec des variations du recrutement. L'objectif est de voir si la VPA est alors capable de reconstituer les fluctuations et de juger de la pertinence des diagnostics posés à l'issue de la procédure d'évaluation, selon l'état de la population.

- **Capacité de la VPA à reconstituer les fluctuations**

Lorsque les fluctuations sont liées à des changements dans le nombre de recrues, la VPA estime de manière globalement satisfaisante les mortalités par pêche. Seuls les F terminaux ne sont pas toujours correctement estimés, notamment lorsque la mortalité évolue au cours du temps (analyses 3 et 6) mais les tendances sont généralement bien reproduites. Les F étant estimés correctement, la VPA se montre logiquement capable de reproduire les fluctuations de la biomasse du stock reproducteur : les courbes de la SSB simulée et de la SSB estimée par la VPA sont parallèles et d'un niveau très proche (Fig. 4. 7, Fig. 4. 8).

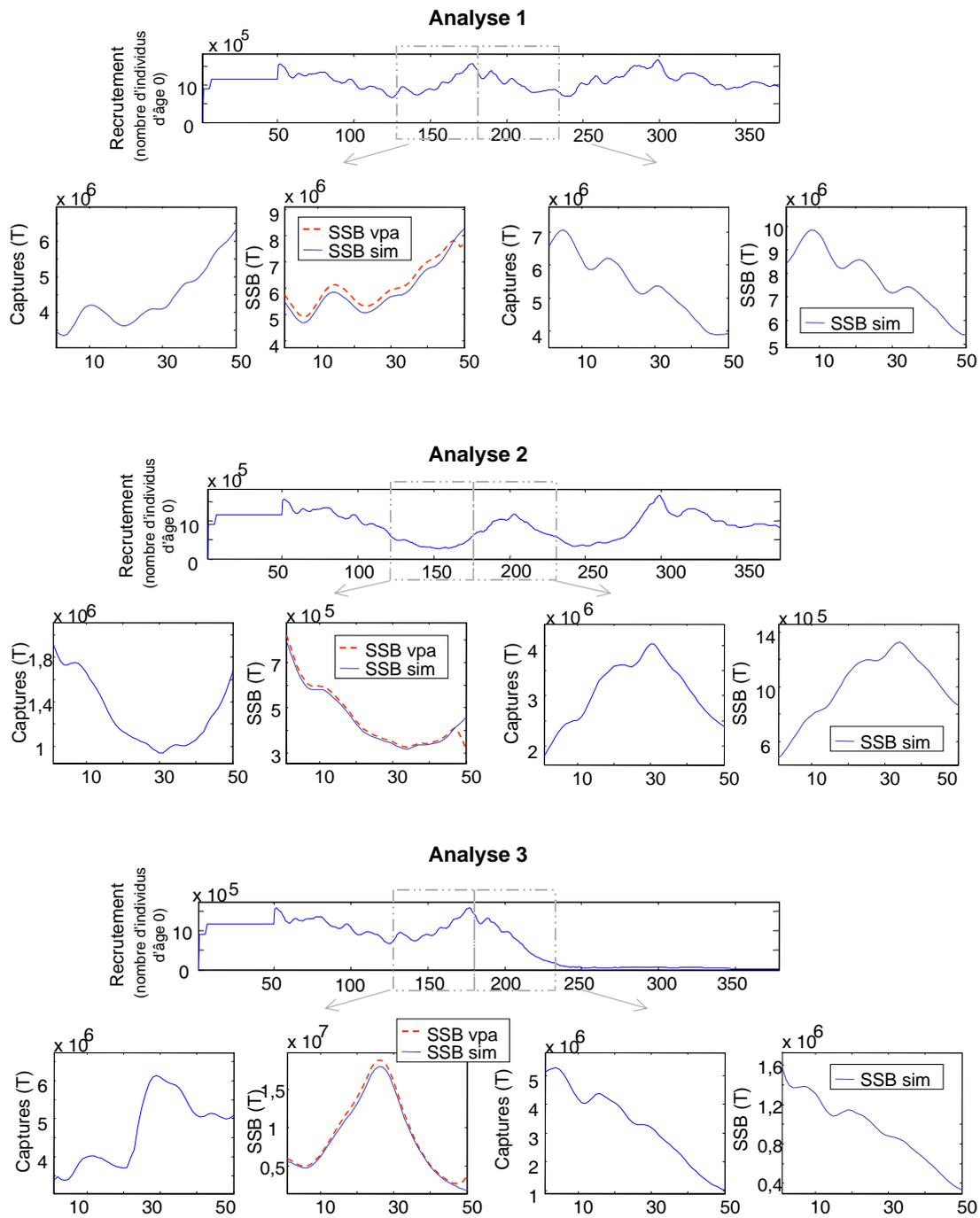


Fig. 4. 7 : Résultats des analyses 1 à 3 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement et de forte abondance au moment du diagnostic

i.e. diagnostic posé au “sommet” d'une fluctuation. La série temporelle de 350 ans présente les fluctuations d'abondance de la classe d'âge 0. Les encarts présentent les évolutions des captures et de la biomasse du stock reproducteur (SSB) au cours des 50 ans précédents l'évaluation (à gauche) et des 50 ans suivants l'évaluation (à droite). Les encarts de gauche présentent les captures entrées dans la VPA, la SSB simulée (trait continu) et la SSB reconstituée par la VPA (trait discontinu). La simulation est ensuite poursuivie sous hypothèse de mortalité par pêche constante et les encarts de droite présentent les captures et la SSB simulée correspondante.

La VPA apparaît capable de reproduire de manière globalement satisfaisante les tendances des fluctuations et le niveau de la SSB. Le diagnostic est correct mais les prédictions risquent d'être trop optimiste en regard de l'évolution future naturelle des abondances

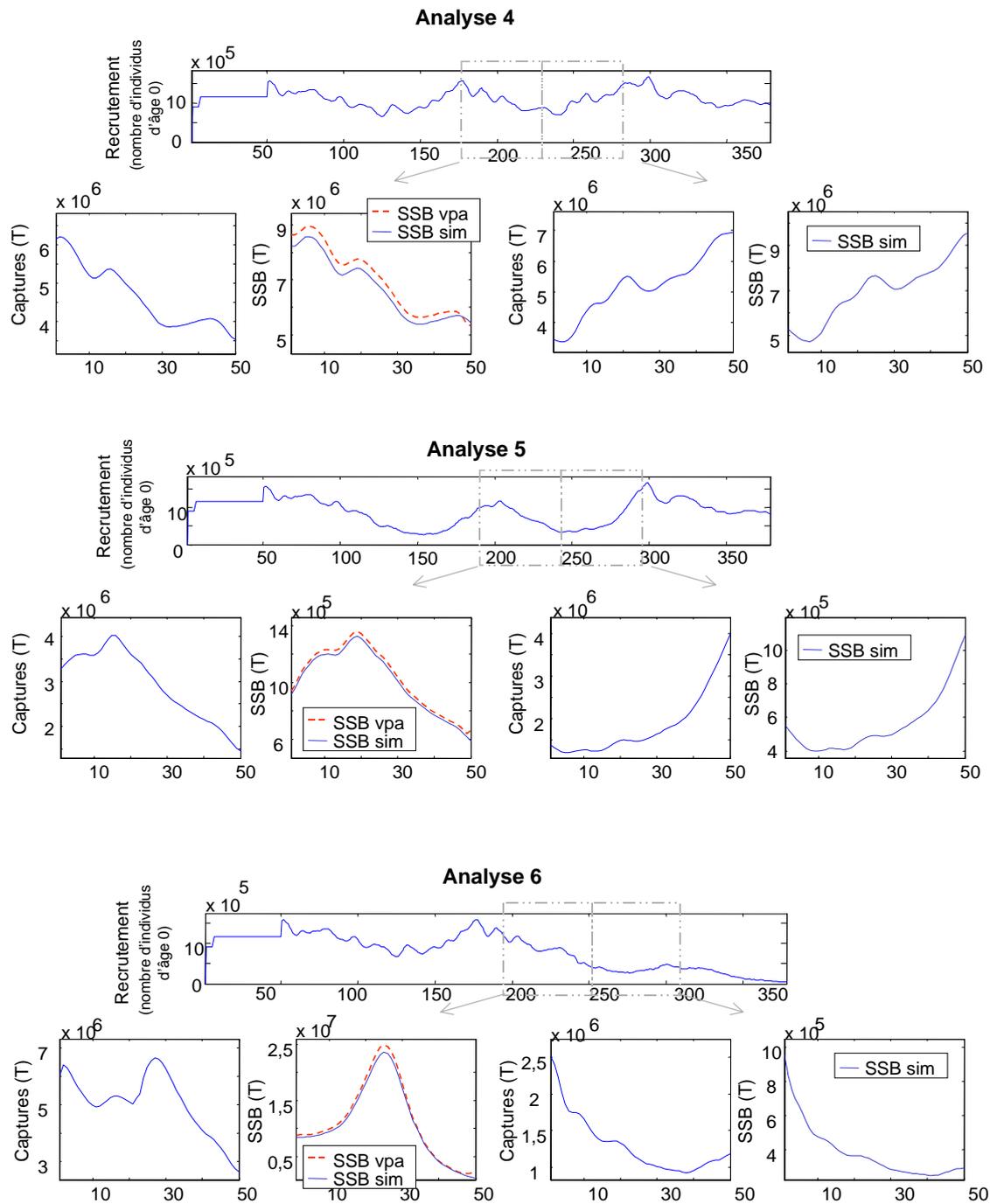


Fig. 4. 8 : Résultats des analyses 4 à 6 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement et de faible abondance au moment du diagnostic

i.e. diagnostic posé au "creux" d'une fluctuation. La série temporelle de 350 ans présente les fluctuations d'abondance de la classe d'âge 0. Les encarts présentent les évolutions des captures et de la biomasse du stock reproducteur (SSB) au cours des 50 ans précédents l'évaluation (à gauche) et des 50 ans suivants l'évaluation (à droite). Les encarts de gauche présentent les captures entrées dans la VPA, la SSB simulée (trait continu) et la SSB reconstituée par la VPA (trait discontinu). La simulation est ensuite poursuivie sous hypothèse de mortalité par pêche constante et les encarts de droite présentent les captures et la SSB simulée correspondante.

La VPA reproduit correctement les tendances des fluctuations et le niveau de la SSB mais les prédictions déduites risquent d'être trop pessimistes s'il n'est pas tenu compte des fluctuations naturelles des abondances.

Comme attendu, les estimations du niveau de la SSB sont légèrement meilleures lorsque la pression de mortalité est plus forte (analyses 2, 3, 5, 6). Les tendances, en revanche, sont toujours bien reproduites, quel que soit le niveau de mortalité par pêche.

- Pertinence du diagnostic et des prédictions posés au “sommet” d'une fluctuation

Plaçons-nous tout d'abord dans le cas d'une évaluation faite alors que l'abondance est importante, juste avant que le stock n'aborde une phase de régression (*i.e.* au sommet d'une fluctuation, analyses n°1 à 3, Fig. 4. 7). La VPA reproduisant de manière satisfaisante les tendances des fluctuations et le niveau de la SSB, le diagnostic est correct quelque soit le niveau de mortalité par pêche. En revanche, la pertinence des prédictions apparaît discutable. Lorsque la mortalité par pêche est faible, les captures et la SSB présentent des tendances croissantes, ce qui conduit à poser des prédictions optimistes sur les capacités du stock à soutenir une telle mortalité par pêche (analyse n°1, Fig. 4. 7). Or, au cours des 50 années suivantes (sous hypothèse de mortalité par pêche constante), la simulation montre que la tendance de la SSB s'inverse, suivant logiquement les fluctuations, pour décroître de manière significative. Ainsi, le diagnostic est valide au temps t (il repose sur l'estimation de la SSB qui est correcte) mais les prédictions peuvent se révéler faussées par les fluctuations naturelles du stock. Lorsque la mortalité par pêche est importante (analyse n°2, Fig. 4. 7), l'examen des tendances des captures et de la SSB conduit à des prédictions plus réservées mais néanmoins optimistes. Sur les 50 années suivantes, la simulation montre que la SSB poursuit sa tendance croissante sur 20-30 ans (*i.e.* une génération) avant de s'effondrer. Dans le cas d'un F “réaliste” (analyse n°3, Fig. 4. 7), l'examen des tendances des captures montre qu'elles stagnent pendant les 10 dernières années précédant l'évaluation (alors que la mortalité par pêche augmente). La SSB en revanche chute, et cette tendance conduit à poser des prédictions pessimistes sur les capacités du stock à soutenir une telle pression de pêche. La simulation conduite sur les 50 années suivantes, sous hypothèse de *statu quo* de l'exploitation, montre une chute drastique des captures et de la SSB. Ainsi, lorsque l'évaluation est faite au “sommet” d'une fluctuation, les diagnostics sont corrects mais la pertinence des prédictions est discutable : elles risquent d'être trop optimistes en regard de l'évolution future naturelle des abondances.

- Pertinence du diagnostic et des prédictions posés au “creux” d'une fluctuation

Lorsque l'évaluation intervient alors que l'abondance est faible, juste avant que le stock n'aborde une phase de croissance (*i.e.* au creux d'une fluctuation, analyses n°4 à 6, Fig. 4. 8), les analyses conduisent sensiblement aux mêmes conclusions quant à la pertinence des diagnostics et des prédictions. Comme dans le cas précédent, la VPA reproduisant de manière satisfaisante les tendances des fluctuations et le niveau de la SSB, le diagnostic est correct quelque soit le niveau de mortalité par pêche. Lorsque la mortalité par pêche est faible, l'examen des tendances des captures et de la SSB conduit à poser des prédictions pessimistes (analyse n°4, Fig. 4. 8), alors que la simulation fait état, suivant logiquement les fluctuations, d'une tendance croissante de la SSB au cours des 50 années suivantes. Lorsque la mortalité par pêche est importante (analyse

n°5, Fig. 4. 8), l'examen des tendances des captures et de la SSB conduit à poser des prédictions également pessimistes. Pourtant, la simulation montre que la SSB se stabilise au cours des 20-30 années suivantes (*i.e.* une génération) avant d'augmenter. Enfin, dans le cas d'un F "réaliste" (analyse n°6, Fig. 4. 8), l'examen des tendances des captures et de la SSB montre une nette tendance négative et conduit à des prédictions pessimistes. La simulation conduite sur les 50 années suivantes, sous hypothèse de *statu quo* de l'exploitation, montre que la décroissance ralentit et qu'une inversion de tendance est finalement amorcée après 40 ans. Ainsi, les prédictions pessimistes ne s'avèrent pas pertinentes lorsqu'elles sont comparées avec les évolutions futures positives du stock.

Le diagnostic posé au temps t apparaît donc valide mais son interprétation peut être faussée par les fluctuations : le stock peut apparaître en parfaite santé alors qu'il va entamer une phase de régression naturelle ou inversement. Les résultats de la VPA doivent donc être interprétés avec précaution, en gardant à l'esprit la possibilité de fluctuations naturelles du stock.

Ainsi, dans l'hypothèse de fluctuations liées à des variations d'abondance, la VPA apparaît capable de reproduire de manière globalement satisfaisante les fluctuations. Le diagnostic posé est valide mais l'interprétation (les prédictions) qui en est faite peut être faussée. Les fluctuations biaisent la perception de l'état du stock.

II.2.2 Changements migratoires

La procédure de simulation est ensuite appliquée au cas des fluctuations liées à des changements des routes migratoires, *i.e.* des fluctuations de la biomasse disponible à la pêche.

- Capacité de la VPA à reconstituer les fluctuations

Lorsque les fluctuations sont liées à des variations de la biomasse disponible à la pêche, la procédure de simulation montre que la VPA n'est plus capable d'estimer correctement les mortalités par pêche. Lorsque la pression de pêche est faible (analyses 7 et 10), les F sont sous-estimées mais leur tendance stable est approximativement reproduite. Les F sont également sous-estimées lorsque la pression de pêche est forte et une tendance croissante (analyse 8) ou décroissante (analyse 11) apparaît alors que les F attendues sont constantes. Dans le cas de F variables au cours du temps (analyses 9 et 12), la VPA sous-estime de nouveau les mortalités par pêche mais reproduit globalement la tendance des F attendues. N'ayant pas correctement estimé les F, la VPA ne se montre logiquement pas capable d'estimer de manière satisfaisante la SSB (Fig. 4. 9, Fig. 4. 10). Quel que soit l'état de la population et le niveau de l'exploitation, la SSB est largement surestimée par rapport à la biomasse disponible à la pêche attendue. L'évolution de la SSB estimée reproduit globalement celle de la SSB disponible attendue mais les dernières années sont très mal estimées. Ainsi, la VPA ne se montre pas capable d'estimer correctement les niveaux de mortalité par pêche et de SSB lorsque les fluctuations concernent la seule fraction du stock disponible à la pêche.

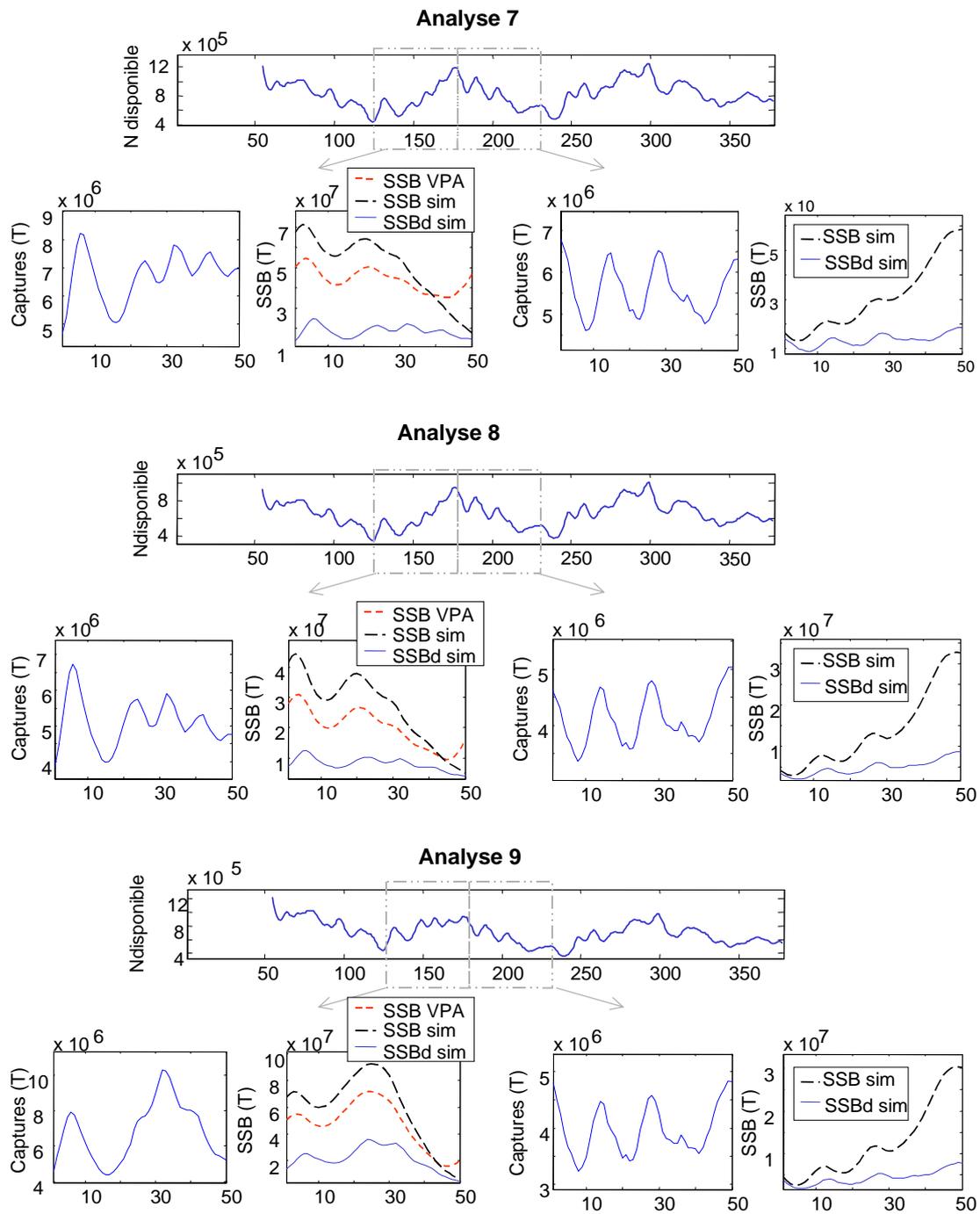


Fig. 4. 9 : Résultats des analyses 7 à 9 (Fig. 4. 5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à changements migratoires et de forte abondance au moment du diagnostic

i.e. diagnostic posé au "sommets" d'une fluctuation. La série temporelle de 350 ans présente les fluctuations de l'abondance (nombre d'individus) de la population disponible à la pêche. Les encarts présentent les évolutions des captures et de la biomasse du stock reproducteur (SSB) au cours des 50 ans précédents l'évaluation (à gauche) et des 50 ans suivants l'évaluation (à droite). Les encarts de gauche présentent les captures entrées dans la VPA, les simulations de la biomasse du stock reproducteur total (SSB sim) et celle du stock disponible à la pêche (SSBd sim), la SSB reconstituée par la VPA (SSB VPA). La simulation est ensuite poursuivie sous hypothèse de mortalité par pêche constante et les encarts de droite présentent les captures et les SSB du stock total et de la fraction disponible simulée correspondante.

La VPA se révèle incapable de reproduire la dynamique de la population lorsque c'est la disponibilité à l'engin de pêche qui varie. Le diagnostic posé est alors invalide.

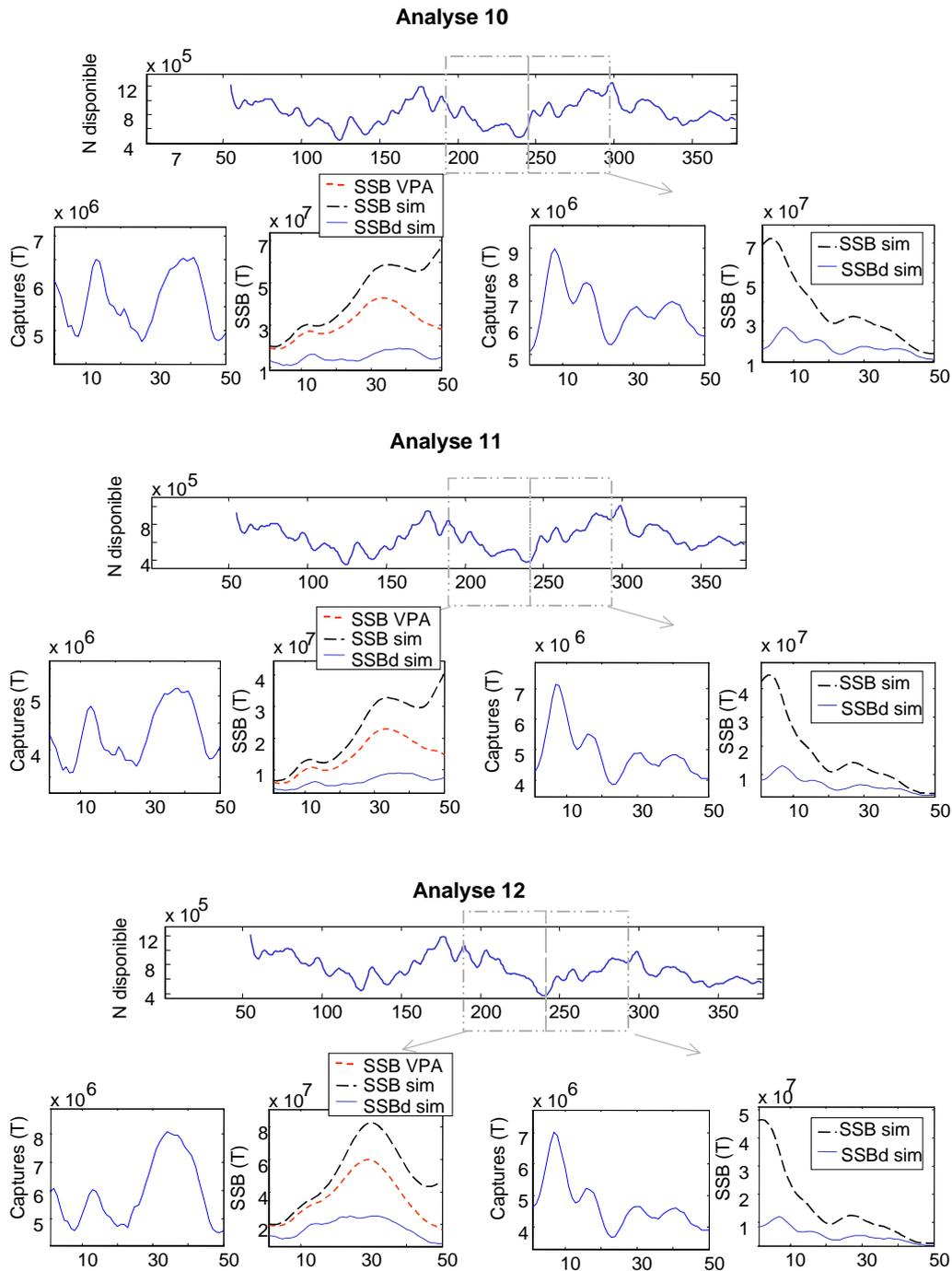


Fig. 4.10 : Résultats des analyses 10 à 12 (Fig. 4.5) : simulations sous hypothèse de fluctuations liées à changements migratoires et de faible abondance au moment du diagnostic *i.e.* diagnostic posé au "creux" d'une fluctuation. La série temporelle de 350 ans présente les fluctuations d'abondance (nombre d'individus) de la population disponible à la pêche. Les encarts présentent les évolutions des captures et de la biomasse du stock reproducteur (SSB) au cours des 50 ans précédents l'évaluation (à gauche) et des 50 ans suivants l'évaluation (à droite). Les encarts de gauche présentent les captures entrées dans la VPA, les simulations de la biomasse du stock reproducteur total (SSB sim) et celle du stock disponible à la pêche (SSBd sim), la SSB reconstituée par la VPA (SSB VPA). La simulation est ensuite poursuivie sous hypothèse de mortalité par pêche constante et les encarts de droite présentent les captures et les SSB du stock total et de la fraction disponible simulée correspondante. *La VPA se révèle incapable de reproduire la dynamique de la population lorsque c'est la disponibilité à l'engin de pêche qui varie. Le diagnostic posé est alors invalide.*

- Pertinence du diagnostic et des prédictions

Que le diagnostic soit posé au “sommets” (Fig. 4. 9) ou au “creux” (Fig. 4. 10) d'une fluctuation, le niveau de la SSB estimé par la VPA au moment de l'évaluation est largement surestimé par rapport à la biomasse disponible : le diagnostic posé est donc incorrect. Les prédictions, se basant sur un diagnostic incorrect, sont biaisées de fait.

Ainsi, la VPA se révèle incapable de reproduire la dynamique de la population lorsque c'est la disponibilité à l'engin de pêche qui varie. Le diagnostic posé est alors invalide. Dans l'hypothèse de changements migratoires à grande échelle, un mode de gestion basé sur les captures se révèle inadapté.

II.3. Discussion

II.3.1 Pertinence de l'approche analytique pour le thon rouge

Ainsi, la VPA apparaît capable de reconstruire les fluctuations liées à des variations du recrutement. Ces résultats sont cohérents avec les analyses du groupe de travail du sous-comité environnement de l'ICCAT (ICCAT, 2002, basées sur le modèle de simulation développé par Kell *et al.* (2000, 2003)), qui montrent que la VPA est capable de reconstituer des fluctuations de la SSB liées des variations du recrutement, dès lors que la matrice de captures et les indices de *tuning* ne sont pas biaisés. Nos conclusions soulignent l'importance de tenir compte d'une dynamique complexe lors de la procédure d'évaluation. En effet, si les fluctuations sont bien reproduites par la VPA, le diagnostic posé est valide ; mais l'interprétation qui en est faite peut être faussée. Les fluctuations biaisent la perception que l'on a de l'avenir du stock, *i.e.* risquent de fausser les prédictions. Typiquement, les prédictions risquent d'être trop optimistes si l'évaluation est faite à la fin d'une période d'abondance croissante, trop pessimistes au contraire si l'on se trouve au “creux” d'une fluctuation. Ainsi, lorsqu'il n'est pas tenu compte des fluctuations naturelles du stock, et dans une approche de précaution, les quotas qui en découlent peuvent se révéler au mieux inappropriés, au pire dangereux si ils sont définis par rapport à un point de référence (ou à un indicateur) comme c'est le cas à l'ICES. Le danger est d'autant plus grand que la fréquence des évaluations est faible et que la période sur laquelle porte les prédictions est longue. Elles doivent donc être adaptées en conséquence. A l'ICCAT, les évaluations ont lieu tous les 2 ans, ce qui conduit, même en considérant des projections à très court terme (2 ans), à un minimum de 2 à 4 ans de retard sur l'état réel du stock. Ce retard n'est pas anodin (il correspond à la durée de la phase juvénile de l'espèce) et doit être pris en considération dans une approche de précaution.

Dans l'hypothèse de changements migratoires, en revanche, les captures et les CPUE ne permettent pas de reconstituer correctement l'état du stock (biais sur le niveau observé). Ce résultat pouvait être attendu puisque les modèles de dynamique et d'évaluation ne considèrent alors pas le même stock (l'un considère le stock total, l'autre la seule fraction exploitée). Les conclusions ne

sont cependant pas anodines : elles soulignent l'inadéquation d'un mode de gestion basé sur les captures dans cette hypothèse de changements migratoires à grande échelle, qui ne peut pas être exclue pour le thon rouge (voir troisième partie). Baser la gestion sur des modèles tenant compte des migrations (intégrant la dimension spatiale) serait alors plus judicieux.

II.3.2 Points biologiques de référence et approche de précaution

La gestion durable des ressources repose actuellement sur des points biologiques de référence cibles et limites (FAO, 1995). Ainsi, la plupart des chartes pour l'approche de précaution des différentes commissions internationales se réfère systématiquement, voire exclusivement, à la PME (ICES, 1998 ; NAFO, 1998 ; ICCAT, 2000a). Les résultats ci-dessus soulignent que le concept de points biologiques de référence fixes et uniques dans le temps est inapproprié pour les populations à dynamique complexe telles que le thon rouge de l'Atlantique Est. Il peut même se révéler dangereux dans une approche de précaution. De plus, l'estimation de ces points de référence est souvent basée sur des modèles qui présupposent la stationnarité (e.g. les projections faites pour le stock de thon rouge de l'Atlantique ouest qui utilisent le modèle de Beverton et Holt). Or si l'hypothèse de stationnarité peut être acceptable pour les thons tropicaux, qui présentent des niveaux de recrutement et de productivité relativement stables sur de longues périodes, elle est beaucoup plus discutable pour le thon rouge (Steele et Henderson, 1984 ; Fromentin *et al.*, 2000). Et une estimation erronée des points de référence rend inopérante l'approche de précaution. Cette critique a déjà été également énoncée pour de nombreuses autres populations exploitées (e.g. la morue de mer du Nord, Restrepo *et al.*, 1992 ; Caddy, 1998). Plutôt que des points fixes et limites, estimer des "trajectoires de référence" pourrait se révéler plus pertinent pour les populations à dynamique complexe. Cette alternative impliquerait de prendre en compte la dynamique naturelle de la population, et non plus seulement celle du stock exploité. Par ailleurs, la prise de décision, dans une approche de précaution, devrait pouvoir se faire sur différents critères. Une approche multiple, se basant sur des trajectoires de références biologiques adaptées, mais aussi sur des travaux théoriques (simulations), pourrait être envisagée pour définir de nouvelles stratégies de gestion, adaptées aux traits de vie (renforcement et application de la limitation de la pêche des juvéniles dans le cas du thon rouge par exemple, e.g. Fromentin *et al.*, 2000 ; Fromentin, 2003) et à la dynamique des populations considérées (développement de modèles spatiaux, Porch *et al.*, 1996 ; Fournier *et al.*, 1998).

Les points de référence biologiques n'apparaissent pas appropriés pour le thon rouge de l'Atlantique. Définir une trajectoire de référence pourrait se révéler plus pertinent.

Bilan général et perspectives

Séries à long terme de thon rouge

La première étape de ce travail a consisté à rassembler une abondante source de données historiques, dispersée dans la littérature et des archives de différentes régions méditerranéennes. S'agissant de collecter des documents anciens, manuscrits à la plume dans différentes langues (ancien espagnol du XVI^{ème} au XVIII^{ème} siècle notamment), l'étape de recensement a grandement bénéficié du caractère européen du programme STROMBOLI et des collaborations avec l'IEO. Ce recensement a permis de rassembler plus de 110 séries de production provenant du pourtour du bassin méditerranéen (Espagne, Maroc, Tunisie, Sicile, Sardaigne, Italie continentale, Croatie et Libye) et des côtes atlantiques proches du détroit de Gibraltar (Portugal, Espagne, Maroc), ainsi que des séries de production régionales (Var, Alpes Maritimes, Algérie). Il a également permis de préciser la nature de certaines données déjà disponibles (e.g. manuscrit de Sarmiento, 1757), qui, vérification faite dans les archives sources (duché de Medina Sidonia), se sont révélées être des captures par des sennes de plages jusqu'à l'adoption des madragues en Espagne au début du XIX^{ème} siècle. Les données collectées ont ensuite été informatisées et ont fait l'objet d'une procédure rigoureuse de sélection, de validation et d'homogénéisation.

Finalement, ce travail met à la disposition de la communauté scientifique plus d'une cinquantaine de séries de capture à long terme, dont 9 s'étendent sur plus d'un siècle et 3 sur près de 4 siècles (Ravier et Fromentin, 2001b). Elles rejoignent les quelques rares séries séculaires actuellement disponibles dans le domaine de l'halieutique (e.g. Zupanovic, 1968 ; Baumgartner *et al.*, 1992 ; Hersart de la Villemarqué, 1995 ; Binet, 1999). Ces séries permettent également d'estimer un niveau historique des captures par les madragues : une production moyenne totale d'environ 110 000 thons/an (\pm 50 000), soit 15 000 t/an ([7 000 ; 25 000], Ravier et Fromentin, 2002).

Fluctuations de la population migrant en Méditerranée

La variabilité spatio-temporelle de ces séries a ensuite été analysée. La variabilité temporelle des séries de captures par les madragues peut se décomposer en trois composantes principales : (i) des larges fluctuations pseudo-périodiques d'environ 100 à 120 ans, (ii) des cycles d'environ 20 ans (correspondant à la durée de vie de l'espèce) et enfin (iii) des fluctuations inter-annuelles (Ravier et Fromentin, 2001b, 2001c). Les fluctuations à moyen et long terme expliquent plus de la moitié de la variance totale des séries. Cette caractéristique, rarement rapportée tant en écologie marine qu'en écologie terrestre, souligne la nécessité de collecter, d'entretenir et de suivre des séries temporelles d'abondances de populations (ou d'indices d'abondance) sur de longues périodes pour être à même de détecter et de décrire les principales sources de variabilité (Fromentin *et al.*, 1998 ; Bjørnstad *et al.*, 1999).

La variabilité spatiale et ses échelles de pertinence sont ensuite déterminées. Les fluctuations à long et moyen terme apparaissent synchrones à l'échelle du bassin méditerranéen et du proche Atlantique ; les variations à court terme, en revanche, ne le sont qu'à une échelle locale (environ 200 km). S'appuyant sur un postulat de bon sens (*si les fluctuations des captures sont représentatives des fluctuations d'abondance, elles doivent évoluer de la même façon tout autour du bassin méditerranéen et du Proche Atlantique*), ces résultats permettent de valider l'hypothèse fondamentale de ce travail : les fluctuations à long terme des captures par les madragues constituent de bons indices des fluctuations à long terme des abondances de la population de thons rouges migrant en Méditerranée. Un indice synthétique est construit pour les résumer de 1600 à 1900, soit 3 siècles continus de fluctuations à moyen et long terme du stock reproducteur méditerranéen de thon rouge.

Déterminisme des fluctuations

Le déterminisme des fluctuations spatio-temporelles des populations animales est un processus complexe, qui dépend de nombreux facteurs aléatoires, d'effets forçants et de composants à la dynamique non-linéaire (*e.g.* Bjørnstad et Grenfell, 2001). Cette complexité est évidemment au cœur de la difficulté à comprendre les processus sous-jacents gouvernant la dynamique spatio-temporelle du thon rouge. Deux mécanismes, non exclusifs ni limitatifs, apparaissent actuellement dignes de plus amples investigations.

Fromentin (2002a) a récemment montré théoriquement que des variations stochastiques dans le recrutement pouvaient générer des variations à long terme dans la biomasse du stock reproducteur ainsi que des fluctuations à moyen terme dépendant de la longueur de vie de l'espèce. Ces résultats concordent avec nos analyses qui décrivent des cycles de 15-30 ans correspondant à la durée de vie du thon rouge.

Cependant, dans la partie 3, nous avons montré que la relation entre température et abondance de thon rouge était négative et non positive. Pour cette raison, nous avons éliminé l'hypothèse selon laquelle les fluctuations à long terme de la population de thon rouge pourraient être liées à des variations à long terme du recrutement, et privilégié celle d'un changement de routes

migratoires à grande échelle en liaison avec les variations des conditions hydroclimatiques sur l'Atlantique Nord. Nous proposons que les adultes aient un comportement de "retour aux sources opportunistes", hypothèse qui combine le "retour au bercail" communément admis pour le thon rouge avec la stratégie opportuniste des thonidés, et permet de donner une explication cohérente en accord avec nos analyses statistiques et les connaissances actuelles de l'écologie et la biologie du thon rouge (Ravier et Fromentin, 2003a, 2003b).

Cependant, on ne peut nier l'occurrence de variations stochastiques liées à des variations inter-annuelles de la disponibilité en nourriture, de la température locale, du vent, *etc.*... et exclure l'hypothèse de résonance.

Ainsi, l'analyse de séries temporelles est une approche particulièrement utile pour les premiers stades d'investigation de la compréhension de la dynamique d'une population, lorsque peu est connu au sujet des mécanismes sous-jacents des changements de la population (Turchin, 1999). Elle permet notamment de décrire les fluctuations et de mener de premières analyses exploratoires sur leur déterminisme. Mais elle n'est pas suffisante. Elle ne peut pas prouver qu'un mécanisme est la cause des fluctuations car d'autres mécanismes écologiques peuvent conduire, ou concourir à conduire, à des cycles similaires. Les expériences *in situ* deviennent alors indispensables (pour des exemples en écologie terrestre, *e.g.* Cappucino et Price, 1995).

Pour avancer sur la question, un programme de recherche de plus grande envergure doit être envisagé pour modéliser la dynamique spatiale du thon rouge en fonction de son environnement physique et biologique. Cette étude pourrait utiliser des données *in-situ* de distribution de thon rouge (suivi par exemple par des marques archives) et de conditions océanologiques sur l'Atlantique Nord (données océanographiques haute résolution issues des satellites AVHRR et SeaWiFS). Un modèle individu-centré, spatialement défini, pourrait intégrer à la fois les processus biologiques modélisés et la variabilité océanographique observée. Les sorties du modèle seraient alors comparées et validées avec les données fournies par les marques archives. Ce projet fait actuellement l'objet de la thèse de F. Royer (Collecte Localisation Satellite (CLS)/IFREMER) qui, à partir des données de survols aériens et des marques archives d'une part, de données d'altimétrie, de couleur de l'océan et de champs de salinité, température et densité d'autre part, devrait apporter de nouvelles informations sur l'évolution spatio-temporelle du thon rouge en Méditerranée et en Atlantique en liaison avec son environnement physique et biologique.

Conséquences pour l'évaluation

Dès 1981, Farrugio (1981a) mentionnait que, « *dans une optique de gestion rationnelle de la ressource, il fallait garder à l'esprit le caractère "aléatoire" de la capturabilité [impliquant qu'il est difficile de supposer que le stock exploité puisse atteindre un "état d'équilibre" et s'y maintenir [...]]* ». Pourtant, le concept de point de référence cible, fixe et unique dans le temps est toujours d'actualité à l'ICCAT, qui s'y réfère pour fixer les quotas (ICCAT, 2000a). Les résultats de la partie 4 soulignent, comme cela a déjà énoncé pour de nombreuses autres populations exploitées (*e.g.* la morue de mer du Nord, Restrepo *et al.*, 1992 ; Caddy, 1998), que ce concept est inapproprié pour les populations à dynamique

complexe telles que le thon rouge de l'Atlantique Est. Il peut même se révéler dangereux dans une approche de précaution (Ravier et Fromentin, 2001a).

La pertinence des diagnostics d'évaluation de stock réalisées à l'aide de VPA est également discutée. Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement, la VPA apparaît capable de reconstruire les fluctuations mais les prédictions sont biaisées lorsqu'il n'est pas tenu compte des fluctuations naturelles du stock. Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des changements migratoires, la VPA apparaît alors incapable de reproduire la dynamique de la population et le diagnostic est invalide. Ces résultats soulignent l'inadéquation d'un mode de gestion basé sur les captures dans l'hypothèse de changements migratoires à grande échelle, qui ne peut pas être exclue pour le thon rouge (troisième partie). Baser la gestion sur d'autres indicateurs, tenant compte des migrations, serait alors plus judicieux (e.g. indices d'abondance par unité géographique...).

Ainsi, les estimations faites dans le cadre des évaluations des stocks, et surtout les prédictions, ont toutes les chances d'être fausses lorsque les fluctuations naturelles du stock ne sont pas prises en compte. Dans tous les cas, chercher à atteindre un point fixe et unique dans le temps alors que la population est non stationnaire, n'a pas grand sens. Ce constat est trivial et évidemment, se borner à un réquisitoire contre les procédures d'évaluation est tout sauf constructif. De plus, les problèmes de gestion du thon rouge sont souvent plus d'ordre politique que scientifique (Fromentin et Ravier, 2002). Cependant, ces résultats soulignent la nécessité de prendre en compte la dynamique de population, à travers e.g. les traits de vie de l'espèce si procédure d'évaluation il doit vraiment y avoir. Un autre axe de recherche serait d'envisager une gestion affranchie de cette étape (basée e.g., sur la limitation de la pêche des juvéniles, des zones/périodes protégées...).

Bibliographie

- Akaike, H., Kitagawa, G., Arahata, E., et Tada, F., 1979 - TIMSAC-78, *Computer Science Monographs*, The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, **11**.
- Alcoforado, M. J., Nunes, M. D., Garcia, J. C., et Taborda, J. P., 2000 - Temperature and precipitation reconstruction in southern Portugal during the Maunder Minimum (AD 1675-1715). *Holocene*, **10**(3): 333-340.
- Alheit, J., et Hagen, E., 1997 - Long-term climate forcing of European herring and sardine populations. *Fish. Oceanogr.*, **6**: 1054-6006.
- Aloncle, H., 1964 - Note sur le thon rouge de la baie ibéro-marocaine. *Bulletin de l'Institut des pêches maritimes du Maroc*, **12**: 43-59.
- Aloncle, H., Hamre, J., Rodriguez-Roda, J., et Tiews, K., 1974 - *Fifth report of the Bluefin Tuna Working Group. Observations on the size composition of Bluefin Tuna catches from 1970 to 1972*. Coopérative research report, ICES, **40**.
- Angotsi, F., 1901 - *L'industria delle tonnara in Sardegna*, Bologne.
- Anonyme, 1931 - *La pesca nei mari e nelle acque interne d'Italia*, Ministero Agric. e Foreste, Istituto Poligrafico dello Stato, Rome, **2**.
- Anonyme, 1932 - *Tableaux statistiques des pêches maritimes en Tunisie, année 1931*. Bulletin de la station Océanographique de Salammbô, Imp. J. Alocio, Tunis, **28**.
- Anonyme, 1933 - *Tableaux statistiques des pêches maritimes en Tunisie, année 1932*. Bulletin de la station Océanographique de Salammbô, Imp. J. Alocio, Tunis, **31**.
- Anonyme, 1934 - *Tableaux statistiques des pêches maritimes en Tunisie, année 1933*. Imp. J. Alocio, Tunis.
- Ansley, C. F., 1979 - An algorithm for the exact likelihood of a mixed autoregressive-moving average process. *Biometrika*, **66**: 59-65.
- Appenzeller, C., Stocker, T. F., et Anklin, M., 1998 - North Atlantic Oscillation dynamics recorded in Greenland ice cores. *Science*, **282**: 446-449.
- Aristote, IV BC - *Histoire des animaux*. Réédition Folio essais, Gallimard, Paris, 1994.
- Aubertin, M., 1909 - *La pêche du thon en Méditerranée*. Hôtel des sociétés savantes, Paris.
- Bailey, K. M., et Houde, E. D., 1989 - Predation on eggs and larvae of marine fishes and the recruitment problem. *Adv. Mar. Biol.*, **26**: 1-83.
- Balchen, J. D., 1979 - Modelling, prediction and control of fish behaviour. In Leondes (Ed.), *Control and dynamic systems*. Academic Press, New York, **15**, pp. 99-146.
- Balling, R. C., Vose, S., et Weber, G.-R., 1998 - Analysis of long-term European temperature records: 1751-1995. *Climate Research*, **10**: 193-200.
- Bard, F. X., 2001 - Extension of the geographical and vertical habitat of albacore (*Thunnus alalunga*) in the North Atlantic. Possible consequences on true rate of exploitation of this stock. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **52**: 1447-1456.
- Bard, F. X., Bessineton, C., Cendrero, O., et Dao, J. C., 1973 - La pêcherie de thon rouge du golfe de Gascogne - Résultat des recherches 1972. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **1**: 399-412.
- Bard, F.X., et Cort, J.L., 1976 - Estimation des captures de thon rouge dans le Golfe de Gascogne de 1972 à 1975. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **5**: 233-235.
- Bard, F.X., et Cort, J.L., 1980 - La pesquería vasca de atun rojo (*Thunnus thynnus*) del Golfe de Vizcaya, 1966-1979. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **9**(2): 406-409. Bartlett, M. S., 1946 - On the theoretical specification of sampling properties of autocorrelated time series. *J. R. Stat. Soc.*, **Suppl. 8**: 24-411.
- Baumgartner, T. R., Soutar, A., et Ferreira-Bartrina, V., 1992 - Reconstruction of the history of Pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. *CalCOFI Report*, **33**: 24-40.
- Beamish, R. J., et Bouillon, D. R., 1993 - Pacific salmon production trends in relation to climate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **50**: 1002-1016.
- Beamish, R. J. D., Noakes, J., McFarlane, G. A., Klyashtorin, L., Ivanov, V. V., Kurashov, V., 1999 - The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **56**: 516-526
- Beaugé, Belloc, Boury, Desbrosses, Fage, Le Gall, Lambert, Rémy, et Schwinte, 1936 - *Manuel des pêches maritimes françaises*. Mémoires de l'office des pêches maritimes, série spéciale, n° 9-12, Ed. le Danois, Office scientifique et technique des pêches maritimes, Paris. **11**(3): 150-156.
- Begon, M., Harper, J. L., et Townsend, C. R., 1996 - *Ecology* (Troisième ed.). Blackwell Science, Oxford.
- Beliaeff, B., Etienne, M., Grosjean, P., et Ibanez, F., 2000 - *Manuel d'utilisation de la librairie Passtec + version alpha 0.5 pour S+ 2000*. <http://www.sciviews.org/pastecs>.
- Belloc, G., 1961 - Inventaire des madragues méditerranéennes. *Proc. gen. Fish. Coun. Medit.*, **6**: 345-371.

- Berthelot, S., 1869 - *Etudes sur les pêches maritimes dans la Méditerranée et l'océan*. Challamel aîné, Paris.
- Beverton, R. J. H., et Holt, S. J., 1957 - On the dynamics of exploited fish populations. *Fishery Investigations London Serie 2*, **19**.
- Beverton, R. J. H., et Lee, A. J., 1965 - Hydrographic fluctuations in the North Atlantic ocean and some biological consequences. In C. G. Johnson, et L. P. Smith (Eds.), *The biological significance of climatic change in Britain*. Institute of Biology Symposia, Londres, **14**: 79-107.
- Binet, D., 1999 - *Les pêches côtières de la baie du Mont-Saint-Michel à la baie de Bourgneuf au XIXe siècle*. IFREMER, Nantes.
- Binet, D., et Leroy, C., 1987 - La pêche du thon rouge (*Thunnus thynnus*) dans l'Atlantique Nord Est était-elle liée au réchauffement séculaire ? *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **26**: 314-322.
- Bjørnstad, O. N., Champely, S., Stenseth, N. C., et Saitoh, T., 1996 - Cyclicity and stability of grey-sided voles, *Clethrionomys rufocanus* of Hokkaido: evidence from spectral and principal components analyses. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **351**: 867-875.
- Bjørnstad, O. N., Fromentin, J. M., Stenseth, N. C., et Gjøsæter, J., 1999 - Cycles and trends in cod populations. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **96**: 5066-5071.
- Bjørnstad, O. N., et Grenfell, B. T., 2001 - Noisy Clockwork: Time series analysis of population fluctuations in animals. *Science*, **293**: 638-643.
- Block, B. A., Dewar, H., Blackwell, S. B., Williams, T. D., Prince, E. D., Farwell, C. J., Boustany, A., Teo, S. L. H., Seitz, A., Walli, A., et Fudge, D., 2001 - Migratory movements, depth preferences, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. *Science*, **293**: 1310-1314.
- Block, B. A., Dewar, H., Farwell, C., et Prince, E. D., 1998 - A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **95**(16): 9384-9389.
- Bounhiol, J. P., 1911 - Le régime du thon sur les côtes algériennes et dans la Méditerranée occidentale. *Bull. trimest. Soc. Enseign. prof. et techn. Pêches marit.*, **16**(2): 374-434.
- Box, G. E. P., et Jenkins, G. M., 1976 - *Time series analysis forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco.
- Bradley, R. S., Kelly, P. M., Jones, P. D., Diaz, H. F., et Goodess, C., 1985 - *A climate databank for the Northern Hemisphere, 1851-1900*. DoE Technical report, US Department of Energy, Carbon dioxide research division, Washington DC. 17.
- Bragança (de), C., 1899 - *A pesca do atun no Algarve en 1898*. Result. Invest. Scient. Feitas a bordo de yacht Amelia. Lisboa Imprensa nacional, Lisbonne.
- Brander, K. M., 1995 - The effect of temperature on growth of Atlantic cod (*Gadus morhua*, L.). *ICES J. Mar. Sci.*, **52**: 1-10.
- Bresc, H., 1981 - La pêche et les madraques dans la Sicile médiévale. In *L'homme méditerranéen et la mer*. Institut national d'archéologie et d'art de Tunis, Jerba.
- Bresc, H., 1984 - Pesca e tonnare nella Sicilia medievale. *Miscellanea storica ligure*, **16**(2): 123-139.
- Bresc, H., 1986 - *Un monde méditerranéen. Economie et société en Sicile, 1300-1450*. Ecole française de Rome, **2**.
- Briffa, K. R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Harris, I. C., Jones, P. D., Shiyatov, S. G., et Vaganov, E. A., 2001 - Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *J. Geophys. Res.*, **106** (D3): 2929-2941.
- Brill, R. W., et Lutcavage, M. E., 2001 - Understanding environmental influences on movements and depth distributions of tunas and billfishes can significantly improve population assessments. *American Fisheries Society Symposium*, **25**: 179-198.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Lo Vecchio, G., Maugeri, M., et Nanni, T., 2001 - *Tre secoli di meteorologia a Bologna*. Cooperativa Universitaria Studio e Lavoro, Milan.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M., et Nanni, T., 2000 - Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1865 to 1996. *Theor. Appl. climatol.*, **66**(1-2): 49-60.
- Buen (de), F., 1925 - *Biología del atun (Orcynnus thynnus L.)*. Resultado campañas realizadas por acuerdos internacionales. CIESM, Madrid.
- Buen (de), F., 1927 - Notes et bibliographie sur la biologie du thon. *Rapp. P.-v Réun. CPIEM*, **44**: 98-107.
- Bye, V. J., 1989 - The role of environmental factors in the timing of reproductive cycles. In G. W. Potts, et R. J. Wootton (Eds.), *Fish reproduction: Strategies and tactics*. Academic press, New York, pp. 187-205.
- Caddy, J. F., 1998 - A short review of precautionary reference points and some proposals for their use in data-poor situations. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **379**.
- Caddy, J. F., et Mahon, R., 1995 - Reference points for fisheries management. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **347**.
- Caley, M. J., Carr, M. H., Hixon, M. A., Hughes, T. P., Jones, G. P., et Menge, B. A., 1996 - Recruitment and the local dynamics of open marine populations. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, **27**: 477-500.
- Cancela, O., 1972 - *Aspetti di un mercato Siciliano. Trapani nei secoli XVII - XIX*. Storia Economica di Sicilia. Unione delle camere di commercio industria ed agricoltura della regione siciliana, Castanissetta.
- Cappucino, N., et Price, P., 1995 - *Population dynamics: new approaches and synthesis*. Academic press, New York.
- Cayré, P., 1990 - Les migrations : un comportement déclenché et guidé par l'environnement. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **32**(1): 158-168.
- Chassot, E., 2001 - *Le modèle PROCEAN : un cadre d'étude pour estimer les tendances de capturabilité et les dynamiques de pêche dans un contexte bayésien*. Rapport de DEA. ENSAR, Rennes.
- Chlistovsky, F., Buffoni, L., et Maugeri, M., 1997 - *La temperatura a Milano-Brera*. Collana Scientifica. CUSL, Milan.
- Colebrook, J. M., 1978 - Continuous plankton records: zooplankton and environment, North-East Atlantic and North Sea. *Oceanol. Acta*, **1**: 9-23.
- Consolo, V., 1986 - *La pesca del tonno in Sicilia*, Palermo.
- Conte, G., 1985 - *Addio Amico tonno. Indagine sulle tonnare di Portopaglia, Portosuso e Isola Piana dal XVI secolo ai giorni nostri*. Edizione della torre, Cagliari.
- Cook, E. R., D'Arrigo, R., et Briffa, K. R., 1998 - A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from the North America and Europe. *Holocene*, **8**: 9-17.

- Cook, E.R., D'Arrigo, R.D., Mann, M.E., 2002 - A well-verified, multi-proxy reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation since AD 1400. *J. Clim.*, **15**: 1754-1764.
- Cook, R. M., Sinclair, A., et Stefansson, G., 1997 - Potential collapse of the North Sea cod stocks. *Nature*, **385**: 521-522.
- Cort, J. L., 1991 - Age and growth of the bluefin tuna *Thunnus thynnus* (L.) of the Northeast Atlantic. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **35**: 214-230.
- Cort, J. L., et Cendrero, O., 1975 - La pesca del atun rojo (*Thunnus thynnus* L.) en el Golfo de Vizcaya. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **4**: 128-132.
- Corten, A., 1990 - Long-term trends in pelagic fish stocks of the North Sea and adjacent waters and their possible connection to hydrographic changes. *Neth. J. Sea Res.*, **25**: 227-235.
- Corten, A., 2001 - Northern distribution of the North Sea herring as a response to high water temperatures and/or low food abundance. *Fish. Res.*, **50**: 189-204.
- Cortes, E., 1998 - Demographic analysis as an aid in shark stock assessment and management. *Fish. Res.*, **39**(2): 199-208.
- Cortes, E., 2000 - Potential rates of increase and rates of increase per generation for three species of pelagic sharks from the Atlantic ocean. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 1822-1829.
- Crowley, T. J., et Lowery, T. S., 2000 - How warm was the Medieval Warm Period? *Ambio*, **29**: 51-54.
- Cullen, H. M., D'Arrigo, R. D., Cook, E. R., et Mann, M. E., 2001 - Multiproxy reconstructions of the North Atlantic Oscillation. *Paleoceanography*, **16**(1): 27-39.
- Cury, P., 1994 - Obstinate nature: An ecology of individuals. Thoughts on reproductive behaviour and biodiversity. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **51**(7): 1664-1673.
- Cury, P., Anneville, A., Bard, F. X., Fonteneau, A., et Roy, C., 1998 - Obstinate North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus thynnus*): an evolutionary perspective to consider spawning migration. In E. J. S. Beckett. (Ed.), *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **50**(1), pp. 239-247.
- Cury, P., et Roy, C., 1989 - Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**(4): 670-680.
- Cury, P., Roy, C., Mendelssohn, R., Bakun, A., Usby, D.M., et Parrish, R.H., 1995 - Moderate is better exploring non linear climatic effects on the Californian anchovy (*Engraulis mordax*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **121**: 417-424.
- Cushing, D. H., 1975 - *Marine ecology and fisheries*. Academic Press, New York.
- Cushing, D. H., 1982 - *Climate and fisheries*. Academic Press, New York.
- Cushing, D. H., 1990 - Plankton production and year class strength in fish populations: an update of the match/mismatch hypothesis. *Adv. Mar. Biol.*, **26**: 249-293.
- Cushing, D. H., 1995 - *Population production and regulation in the sea. A fishery perspective*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Cushing, D. H., et Dickson, R. R., 1976 - The biological response in the sea to climatic changes. *Adv. Mar. Biol.*, **14**: 1-122.
- Cuvier, G., et Valenciennes, A., 1830 - *Histoire naturelle des poissons*. Strasbourg édition, Strasbourg.
- D'Arrigo, R., Jacoby, G., Free, M., et Robock, A., 1999 - Northern hemisphere temperature variability for the past three centuries: tree-ring and model estimates. *Clim. Change*, **42**(4): 663-675.
- De Fages, E., et Ponzevera, C., 1908 - *Les pêches maritimes de la Tunisie*. Imprimerie J. Picard & Cie, Tunis.
- Delefosse, S., 1999 - *Analyse numérique des séries historiques de thon rouge provenant des madragues méditerranéennes*. Rapport de DEA. Université Paris VI, Paris.
- Desse, J., et Desse-Debret, N., 1994 - Stratégies de pêche au 8^{ème} millénaire : les poissons de Cap Andreas Kastros (Chypre). In A. Le Brun (Ed.), *Fouilles récentes à Khirokitia*. Editions Recherche sur Civilisations, Paris, **3**, pp. 332-360.
- Dickson, R. R., et Brander, K. M., 1993 - Effects of a changing windfield on cod stocks of the North Atlantic. *Fish. Oceanogr.*, **2**: 124-153.
- Die, D. J., Restrepo, V. R., et Fox, W. W. Jr, 1990 - Equilibrium production models that incorporate fished area. *Transaction of the American Fisheries Society*, **119**: 445-454.
- Dieuzeide, R., et Novella, M., 1953 - *Le matériel de pêche maritime utilisé en Algérie*. Imprimerie Imbert, Alger.
- Doneddu, G., 1983 - Le tonnare in Sardegna (1500-1800). *Socita e storia*, **6**(21): 535-563.
- Doumenge, F., 1998 - L'histoire des pêches thonières. In E. J. S. Beckett. (Ed.), *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **50**, pp. 753-802.
- Duhamel du Monceau, M., 1769-1782 - *Traité général des pesches et Histoire des poissons qu'elles fournissent*. Connaissances et Mémoires européennes, Paris.
- Ellersten, B., Fossum, P., Solemdal, P., et Sundby, S., 1989 - Relation between temperature and survival of eggs and firstfeeding larvae of northeast Arctic cod (*Gadus morhua* L.). *Rapp. P.-v. Réun. CPIEM*, **191**: 209-219.
- Eschyle, V BC - *Les Perses*. Réédition, Coll. L'Acte même, Comp'Act éditions, Chambéry, 2003.
- Esper, J., Cook, E. R., et Schweingruber, F. H., 2002 - Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, **295**: 2250-2253.
- FAO, 1995 - Precautionary approach to fisheries. Lysekil, Sweden, 6-13 June 1995. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **350**.
- Farrugio, H., 1981a - *Exploitation et dynamique des populations de thon rouge, Thunnus thynnus (Linné 1758), Atlantico-Méditerranéennes*. Doctorat d'Etat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Farrugio, H., 1981b - Statistiques tunisiennes sur le thon rouge, Mission de H. Farrugio. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **15**: 243-245.
- Fletcher, R. I., 1978 - Time-dependent solutions and efficient parameters for stock-production models. *Fish. Bull.*, **76**(2): 377-388.
- Flett, P. A., Munkittrick, K. R., Van Der Kraar, G., et Leatherland, J. F., 1996 - Overripening as the cause of low survival to hatch in Lake Erie coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) embryos. *Can. J. Zool.*, **74**: 851-857.
- Fodera, V., 1961 - La madrague sicilienne de course. *Etude et revues du Conseil Général des Pêches pour la Méditerranée*, **15**.

- Fontaine, D., 1974 - *Le thon rouge Thunnus thynnus (Lineaus 1758) : problème de l'évaluation des stocks de l'Atlantique Nord*. Thèse de Médecine Vétérinaire. Université de Créteil, Créteil.
- Fonteneau, A., et Fromentin, J.-M., 2000 - An overview on the use of precautionary approach and tuna management. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 2085-2094.
- Fonteneau A., Gascuel, D., et Palares, P., 1998 - Vingt-cinq d'évaluation des ressources thonières de l'Atlantique: Quelques réflexions méthodologiques. In E. J. S. Beckett. (Ed.), *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **50**, pp 523-561.
- Fortier, L., et Villeneuve, A., 1996 - Cannibalism and predation of fish larvae by larvae of Atlantic mackerel, *Scomber scombrus*, trophodynamics and potential impact on recruitment. *Fish. Bull.*, **94**: 268-281.
- Fournier, D.A., Hampton, J., et Sibert, J.R., 1998 - MULTIFAN-CL: a length-based, age-structured model for fisheries stock assesment, with application to South Pacific Albacore, *Thunnus alalunga*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**: 2105-2216.
- Fowler, C. W., 1988 - Population dynamics as related to rate of increase per generation. *Evolutionary Ecology*, **2**: 197-204.
- Fréon, P., Mullon, C., et Pichon, G., 1993 - *Experimental interactive software for choosing and fitting surplus production models including environmental variables*. FAO computerized information series. Fisheries, Rome, **5**: 76.
- Friedman, M., 1937 - The use of the ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *J.Amer.Statist.Assoc.*, **32**: 675-701.
- Fromentin, J.-M., 2002a - Can stochastic variations in recruitment induce long-term fluctuations in the carrying capacity? *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **54**(4): 985-991.
- Fromentin, J.-M., 2002b - Is the recruitment a key biological process in the hypothetical NAO-Atlantic tunas relationships? *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **54**(4): 1008-1016.
- Fromentin, J.-M., 2003 - The East Atlantic and Mediterranean bluefin tuna management: uncertainties and alternatives. *Sc. Mar.*, **67**: 51-62.
- Fromentin, J.-M., et Fonteneau, A., 2001 - Fishing effects and life history traits: a case-study comparing tropical versus temperate tunas. *Fish. Res.*, **53**(2): 133-150.
- Fromentin, J.-M., Fonteneau, A., et Farrugio, H., 2000 - Biological key reference points and natural long-term fluctuations: the case of the Atlantic bluefin tuna. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 2072-2084.
- Fromentin, J.-M., Myers, R. M., Bjørnstad, O., Stenseth, N. C., Gjøsæter, J., et Christie, H., 2001 - Effects of density-dependent and stochastic processes on the stabilization of cod populations. *Ecology*, **82**(2): 567-579.
- Fromentin, J.-M., et Planque, B., 1996 - *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. 2) Role of the North Atlantic Oscillation on *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **134**: 111-118.
- Fromentin, J.-M., et Ravier, C., 2002 - The east atlantic and mediterranean bluefin tuna stock: looking for sustainability in a context of large uncertainties and strong political pressures. In *Proceeding of the World Conference on the Scientific and Technical Bases for the sustainability of fisheries*, Miami, Florida, 16-30 novembre 2001.
- Fromentin, J.-M., Stenseth, N. C., Gjøsæter, J., Bjørnstad, O., Falk, W., et Johannessen, T., 1997 - Spatial patterns of the temporal dynamics of three gadoids species along the Norwegian Skagerrak coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **155**: 209-222.
- Fromentin, J.-M., Stenseth, N. C., Gjøsæter, J., Johannessen, T., et Planque, B., 1998 - Long-term fluctuations in cod and pollack along the Norwegian Skagerrak coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **162**: 265-278.
- Furnestin, J., et Dardignac, J., 1962 - Le thon rouge du Maroc (*Thunnus thynnus* Linné). *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes*, **26**(4): 381-398.
- Ganiage, J., 1960 - *Une Entreprise italienne de Tunisie au milieu du XIXème siècle, correspondance commerciale de la thonaire de Sidi Daoud*. Presses universitaires de France, Paris.
- Garcia, R., Gimeno, L., Hernandez, E., Prieto, R., et Ribera, P., 2000 - Reconstructing the North Atlantic atmospheric circulation in the 16th, 17th and 18th centuries from historical sources. *Climate research*, **14**: 147-151.
- Gavaris, S., 1988 - An adaptive framework for the estimation of population size. *Can. Atl. Fish. Sci. Advisory Comm. (CAFSAC) Res. Doc.*, **88/29**.
- Gerhard, E., 1858 - *Auserlesene Griechische Vasenbilder, Hauptsächlich Etruskischen Fundorts*. Reimer, Berlin.
- Gian-Reto, W., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., et Bairlein, F., 2002 - Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**: 389-395.
- Girs, A. A., 1974 - *Macrocirculation method for long-term meteorological prognosis*. Hydrometizdat, Leningrad.
- Glueck, M. F., et Stockton, C. W., 2001 - Reconstruction of the North Atlantic Oscillation, 1429-1983. *Int. J. Climatol.*, **21**(12): 1453-1465.
- Gourret, P., 1894 - *Les pêcheries et les poissons de la Méditerranée*. J.B. Baillière et Fils, Paris.
- Gruvel, A., 1926 - *L'industrie des Pêches sur les Côtes tunisiennes*. Bulletin de la station Océanographique de Salammbô, Imp. J. Alocio, Tunis, **4**.
- Gulland, J. A., 1965 - Estimation of mortality rates. *Annex to Arctic Fisheries Working Group Report ICES C.M*, **3**.
- Gunn, J., et Block, B. A., 2001 - Advances in acoustic, archival, and satellite tagging of tunas. In B. A. Block, et E. D. Stevens (Eds.), *Tuna: physiology, ecology and evolution*. Academic press. New York, pp. 167-224.
- Gurney, W. S. C., et Nisbet, R. M., 1985 - Fluctuation periodicity, generation separation, and the expression of larval competition. *Theor. Popul. Biol.*, **28**: 150-180.
- Hamre, J., Lozano, F., Rodriguez-Roda, J., et Tiews, K., 1966 - *Second report from the bluefin tuna working group. On the development of the bluefin tuna fisheries from 1950-64 to 1969 and further observations on size composition of bluefin tuna catches*. CPIEM, Statistical News Letters, **26**.
- Hamre, J., Lozano, F., Rodriguez-Roda, J., et Tiews, K., 1968 - *Third report from the bluefin tuna working group. Observations on the size composition of bluefin tuna catches from 1965-66*. CPIEM, Statistical News Letters, **38**.
- Hamre, J., Maurin, C., Rodriguez-Roda, J., et Tiews, K., 1971 - *Fourth report of the bluefin tuna working group. Observations on the size composition of bluefin tuna catches from 1967 to 1969*. ICES, Copenhagen, Cooperative research report Series A, **23**.

- Hansen, L. P., Jonsson, N., et Jonsson, B., 1993 - Oceanic migration in homing Atlantic salmon. *Anim. Behav.*, **45**(4): 927-941.
- Harden Jones, F. R., 1968 - *Fish migration*. Edward Arnold, Londres.
- Hassell, M. P., Latto, J., et May, R. M., 1989 - Seeing the wood for the trees: detecting density-dependence from existing life-table studies. *J. Anim. Ecol.*, **58**: 883-892.
- Hastie, T. J., et Tibshirani, R. J., 1990 - *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall, New-York.
- Healey, M. C., et Groot, C., 1986 - Marine migration and orientation of ocean-type chinook and sockeye salmon. In M. J. Dadswell, R. J. Klauda, C. M. Moffitt, R. L. Saunders, R. A. Rulifson, et J. E. Cooper (Eds.), *Int. Symp. on Common Strategies of Anadromous and Catadromous Fishes*, Boston, Massachusetts, USA, **1**, pp. 298-312.
- Heers, J., 1961 - *Gênes au XV^{ème} siècle. Activité économique et problèmes sociaux*. Affaires et gens d'affaires, 24, EPHE, 6^{ème} section.
- Heldt, H., 1926 - Thon rouge - Résumé de nos connaissances actuelles sur le thon rouge (*Orcygnus thynnus* L.) (1^{ère} partie). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **1**: 99-120.
- Heldt, H., 1930 - Le thon rouge et sa pêche (5^{ème} rapport). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **5**: 131-152.
- Heldt, H., 1931 - Le thon rouge et sa pêche (6^{ème} rapport). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **6**: 175-288.
- Heldt, H., 1932 - Le thon rouge et sa pêche (7^{ème} rapport). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **7**: 203-318.
- Heldt, H., 1937 - Le thon rouge et sa pêche (9^{ème} rapport). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **10**: 235-315.
- Heldt, H., 1938 - Le thon rouge et sa pêche (10^{ème} rapport). *Rapp. P.-v. Réun. CIESM.*, **11**: 310-358.
- Hersart de la Villemarqué, J., 1995 - *La pêche morutière française de 1550 à 1950*. Statistiques, climat et société. Repères Océans. IFREMER, Nantes.
- Hilborn, R., et Mangel, M., 1997 - *The ecological detective*. Princeton University Press, Princeton.
- Hilborn, R., et Walters, C. J., 1992 - *Quantitative fisheries stock assessment. Choice, dynamics and uncertainty*. Chapman & Hall, New-York.
- Hjort, J., 1914 - Fluctuations in the great fisheries of northern Europe. Viewed in the light of biological research. *Rapp. P.-v Réun. CPIEM*, **20**: 1-228.
- Hjort, J., 1926 - Fluctuations in the year classes of important food fishes. *J. CPIEM*, **1**: 5-38.
- Holm, S., 1979 - A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scand. J. Stat.*, **6**: 65-70.
- Hotelling, H., 1933 - Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J. Educ. Psychol.*, **24**: 417-441, 489-520.
- Hurrell, J. W., 1995 - Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitations. *Science*, **269**: 676-679.
- Hurrell, J. W., 1996 - Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on northern hemisphere temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **23**: 665-668.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., et Visbeck, M., 2001 - The North Atlantic Oscillation. *Science*, **291**: 603-604.
- Hutchings, J. A., 2000 - Collapse and recovery of marine fishes. *Nature*, **406**: 882-885.
- Hutchings, J. A., et Myers, R. A., 1994 - What can be learned from the collapse of a renewable resource? Atlantic cod, *Gadus morhua*, of Newfoundland and Labrador. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **51**: 2126-2146.
- Ibanez, F., et Davuin, J. C., 1988 - Long-term changes (1977-1987) in a muddy fine sand *Abra alba* - *Melinna palmata* community from the Western English Channel: Multivariate time-series analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **49**: 65-81.
- ICCAT, 1966 - *Convention of the International Convention for the Conservation of Atlantic Tuna*. ICCAT, Madrid.
- ICCAT, 1997 - 1996 SCRS detailed report on bluefin tuna. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **46**(1): 1-301.
- ICCAT, 1999 - 1998 SCRS detailed report on bluefin tuna. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **49**(2): 1-191.
- ICCAT, 2000a - Report of the meeting of the ICCAT Ad Hoc Working Group on Precautionary Approach (Dublin, Irlande, 17-21 mai 1999). *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 1941-2057.
- ICCAT, 2000b - *Glossaire de termes de pêche*. ICCAT, Madrid. <http://www.iccat.es/>.
- ICCAT, 2002 - Report of the ICCAT workshop on environment and tuna recruitment. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, sous presse.
- ICCAT, 2003 - 2002 SCRS detailed report on bluefin tuna. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, sous presse.
- ICES, 1998 - Report of the study group on the precautionary approach to fisheries management. *ICES CM 1998/ACFM:10 Ref. D*.
- Jackson, J. E., 1986 - *A user's guide to principal components*. John Wiley, New York.
- Jennings, S., Reynolds, J. D., et Mills, S. C., 1998 - Life history correlates of responses to fisheries exploitation. *Proc. Roy. Soc. London Ser. B*, **265**: 333-339.
- Jones, P. D., Jonsson, T., et Wheeler, D., 1997a - Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, **17**: 1433-1450.
- Jones, P. D., et Moberg, A., 2003 - Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *J. Clim.*, **16**: 206-223.
- Jones, P. D., New, M., Parker, D. E., Martin, S., et Rigor, I. G., 1999 - Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Rev. Geophys.*, **37**: 173-199.
- Jones, P. D., Osborn, T. J., et Briffa, K. R., 1997b - Estimating sampling errors in large-scale temperature averages. *J. Clim.*, **10**(10): 2548-2568.
- Jones, P. D., Osborn, T. J., Briffa, K. R., Folland, C. K., Horton, E. B., Alexander, L. V., Parker, D. E., et Rayner, N. A., 2001 - Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time-series. *J. Geophys. Res. Atm.*, **106**(D4): 3371-3380.
- Kell, L. T., Die, D., Restrepo, V., Fromentin, J.-M., Ortis de Zarate, V., et Pallares, P., 2003 - An evaluation of management strategies for Atlantic tuna stocks. *Sc. Mar.*, **67**: 353-370.
- Kell, L. T., Fromentin, J.-M., Gauthiez, F., et Restrepo, V., 2000 - A simulation framework to evaluate management strategies for Atlantic tunas: a preliminary example based on east Atlantic bluefin. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 2095-2116.

- Kendall, B. E., Briggs, C. J., Murdoch, W. W., Turchin, P., Ellner, S. P., McCauley, E., Nisbet, R. M., et Wodd, S. N., 1999 - Why do population cycle? A synthesis of statistical and mechanistic modelling approaches. *Ecology*, **80**(6): 1789-1805.
- Kendall, M. G., 1948 - *Rank correlation method*. Charles Griffin & Co, Londres.
- Kjørboe, T., et MacKenzie, B., 1995 - Turbulence-enhanced prey encounter rates in larval fish: effects of spatial scale, larval behaviour and size. *J. Plank. Res.*, **17**: 2319-2331.
- Klyashtorin, L., 1998 - Long-term climate change and main commercial fish production in the Atlantic and Pacific. *Fish. Res.*, **37**: 115-125.
- Knell, R. J., 1998 - Generation cycles. *Trend Ecol. Evol.*, **13**: 186-190.
- Koenig, W. D., et Knops, J. M. H., 1998 - Testing for spatial autocorrelation in ecological studies. *Ecography*, **21**: 423-429.
- Kohn, R., et Ansley, C. F., 1986 - Estimation, prediction, and interpolation for ARIMA models with missing data. *Journal of the American Statistical Association*, **81**: 751-761.
- Korsmeyer, K. E., et Dewar, H., 2001 - Tunas metabolism and energetics. In B. A. Block, et E. D. Stevens (Eds.), *Tuna: physiology, ecology and evolution*. Academic press, New York, pp. 36:71.
- Köster, F., et Möllmann, C., 2000 - Trophodynamic control by clupeid predators on recruitment success in Baltic cod? *ICES J. Mar. Sci.*, **57**: 310-323.
- Krebs, C. J., 1972 - *Ecology. The experimental analysis of distribution and abundance*. Harper and Row, New-York.
- Laloë, F., 1989 - Un modèle global avec quantité de biomasse accessible dépendant de la surface de pêche. Application aux données de la pêche d'albacores (*Thunnus albacares*) de l'Atlantique Est. *Aquat. Living Resourc.*, **2**: 231-239.
- Lamb, P. J., et Randy, A. P., 1987 - North Atlantic Oscillation: concept and an application. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **68**: 1218-1225.
- Lance, G. N., et Williams, W. T., 1967 - A general theory of classificatory sorting strategies. I Hierarchical systems. *Computer J.*, **9**: 373-380.
- Lasker, R., 1975 - Field criteria for survival of anchovy larvae: the relation between inshore chlorophyll maximum layers and successful first feeding. *Fish. Bull.*, **3**: 453-461.
- Larkin, C.E., 1977 - An epitaph for the concept of maximum sustainable yield. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **106**: 1-11.
- Legendre, P., et Fortin, M. J., 1989 - Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, **80**: 107-138.
- Legendre, P., et Legendre, L., 1998 - *Numerical Ecology*. Developments in Environmental Modelling, 20. Elsevier, Amsterdam.
- Lehodey, P., Bertignac, M., Hampton, J., Lewis, A., et Picaut, J., 1997 - El Nino Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, **389**: 715-718.
- Leroy Ladurie, E., 1983 - *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, Paris.
- Lioka, C., Kani, K., et Nhhala, H., 2000 - Present status and prospects of technical development of tunas sea-farming. In E. Chioccioli (Ed.), *Seminar of the Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM) Network on Technology of Aquaculture in the Mediterranean (TECAM)*, Cahiers du CIHEAM, Options Méditerranéennes, Zaragoza, Espagne, 47, pp. 275-284.
- Liorzou, B., 1989 - Espèces et pêcheries concernées dans les eaux tempérées. In J.-Y. Le Gall (Ed.), *Téledétection satellitaire et pêcheries thonières océaniques*. FAO, **302**, pp. 3-8.
- Little, R. J. A., et Rubin, D. B., 1987 - *Statistical analysis with missing data*. Wiley, New York.
- Ljungman, A., 1882 - Contribution towards solving the question of the secular periodicity of the great herring fisheries. *United States Commission on Fish and Fisheries*, **7**: 497-503.
- Lohmann, K. J., Hester, J. T., et Lohmann, C. M. F., 1999 - Long-distance navigation in sea turtles. *Ethology Ecology and Evolution*, **11**: 1-23.
- Lohmann, K. J., et Lohmann, C. M. F., 1996 - Detection of magnetic field intensity by sea turtles. *Nature*, **380**(6569): 59-61.
- Lozano Cabo, F., 1958 - Applications des échosondeurs à l'étude des migrations de thon. *CGPM Tech. Pap.*, **8**.
- Lundberg, P., Ranta, E., Ripa, J., et Kaitala, V., 2000 - Population variability in space and time. *Trend Ecol. Evol.*, **15**(11): 460-464.
- Lutcavage, M. E., Brill, R. W., Skomal, G. B., Chase, B. C., Goldstein, J. L., et Tutein, J., 2000 - Tracking adult North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the northwestern Atlantic using ultrasonic telemetry. *Mar. Biol.*, **137**: 347:358.
- Lutcavage, M. E., Brill, R. W., Skomal, G. B., Chase, B. C., et Howey, P. W., 1999 - Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine: do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**: 173-177.
- Luterbacher, J., Schmutz, C., Gyalistras, D., et Xoplaki, E., 1999 - Reconstruction of monthly NAO and EU indices back to AD 1675. *Geophys. Res. Lett.*, **26**: 2745-2748.
- Luterbacher, J., et Xoplaki, E., 2001 - *500-year temperature and precipitation variability over the Mediterranean area and its connection to the large-scale atmospheric circulation in Mediterranean Climate*. Springer Verlag, New-York.
- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Dietrich, D., Jones, P. D., Davies, T. D., Portis, D., Gonzales-Rouco, J. F., von Storch, H., Gyalistras, D., Casty, C., et Wanner, H., 2002 - Extending North Atlantic Oscillation reconstructions back to 1500. *Atmos. Sci. Lett.*, **2**: 114-124.
- MacKenzie, B. R., et Leggett, W. C., 1991 - Quantifying the contribution of small-scale turbulence to the encounter rates between larval fish and their zooplankton prey: effects of wind and tide. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **73**: 149-160.
- MacKenzie, B. R., Miller, T. J., Cyr, S., et Leggett, W., 1994 - Evidence of a dome-shaped relationship between turbulence and larval fish ingestion rates. *Limnol. Oceanogr.*, **39**: 1790-1799.
- Maggio, T., 2000 - *Mattanza*. Perseus, Cambridge.
- Manley, G., 1974 - Central England temperatures: monthly means 1659-1973. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **100**: 389-405.

- Mann, M., Bradley, R., et Hughes, M., 1998 - Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, **392**: 779-787.
- Mann, M., Bradley, R., et Hughes, M. K., 1999 - Northern hemisphere temperatures during the past Millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, **26**(6): 759-762.
- Mann, M. E., 2001 - Large-scale climate variability and connections with Middle East during the past few centuries. *Clim. Change*, **55**: 287-314.
- Marsac, F., 1999 - Changements hydroclimatiques observés dans l'Atlantique depuis les années 50 et impacts possibles sur quelques stocks de thons et leur exploitation. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **49**: 346-370.
- Mather, F. J., Mason, J. M., et Jones, A. C., 1995 - Historical Document: Life History and Fisheries of Atlantic Bluefin Tuna. *NOAA Technical Memorandum, NMFS-SEFSC - 370*.
- Mather, F. J., et Schuck, H. A., 1960 - Growth of the bluefin tuna of the western North Atlantic. *Fish. Bull.*, **179**(61): 39-52.
- Matlab, 2001 - *Matlab 6.1, the language of technical computing*. MathWorks Inc., Natick, MA, USA.
- Maury, O., 2001a - A multi-fleet age-structured statistical model to assess fishery dynamics in a bayesian context. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **52**: 1739-1752.
- Maury, O., 2001b - PROCEAN: a production catch/effort analysis framework to estimate catchability trends and fishery dynamics in a bayesian context. *In IOTC working party on methods*, Sète.
- May, R. C., 1974 - Larval mortality in marine fishes and the critical period concept. *In J. H. S. Blaxter (Ed.), The early life history of fish*. Springer-Verlag. New-York, pp. 3-19.
- May, R. M., 1976 - Models for single population. *In R. M. May (Ed.), Theoretical ecology. Principles and application*. Blackwell Science publications. Oxford, pp. 5-29.
- McAllister, M. K., Babcock, E. A., Pikitch, E. K., et Prager, M. H., 2000 - Application of a non-equilibrium generalized production model to south and north atlantic swordfish: combining bayesian and demographic methods for parameter estimation. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **51**: 1523-1551.
- McCarthy, D., et Badcoc, A., 1986 - The length of the day since 1656. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **44**: 281-292.
- McCullagh, P., et Nelder, J. A., 1989 - *Generalized Linear models. Monographs on statistics and applied probability*. Chapman & Hall, New-York.
- McGowan, J. A., Cayan, D. R., et Dorman, L. M., 1998 - Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, **281**(5374): 210-217.
- Medina, A., Abascal, F. J., Megina, C., et Garcia, A., 2002 - Stereological assessment of the reproductive status of female Atlantic northern bluefin tuna during migration to Mediterranean spawning ground through the Strait of Gibraltar. *J. Fish. Biol.*, **60**: 203-217.
- Myers, R. A., et Cadigan, N. G., 1993 - Density-dependant juvenile mortality in marine demersal fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**: 1576-1590.
- Myers, R. A., Hutchings, J. A., et Barrowman, N. J., 1996 - Hypotheses for the decline of the cod in the North Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **138**: 293-308.
- Myers, R. A., MacKenzie, B. R., Bowen, K. G., et Barrowman, N. J., 2001 - What is the carrying capacity for fish in the ocean? A meta-analysis of population dynamics North Atlantic cod. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **58**: 1464-1476.
- NAFO, 1998 - Report for the scientific council workshop on the precautionary approach to fisheries management. *NAFO SCS Doc. 98/1*.
- Naintré, Oddenino, et Laurens, 1948 - *La pêche en mer*. Prisma, Paris.
- Neuparth, A. E., 1925 - Note sur les fluctuations de la pêche du thon (*Thunnus thynnus* L.) sur la côte sud du Portugal. *Rapp. P.-v Réun. CPIEM*, **35**: 51-56.
- Nishikawa, Y., Honma, M., Ueyanagi, S., et Kikawa, S., 1985 - Average distribution of larvae of oceanic species of scombroïd species, 1956 - 1981. *Bull. Far Sea Fish. Lab. S. Series*, **12**.
- Noël de la Morinière, S.-B.-J., 1815 - *Histoire générale des pêches anciennes et modernes*. Impr. royale, Paris.
- Oppien, Il AC - *Haliéutiques*. Réédition, Trad. E. J. Bourquin, Impr. A. Ponsot et P. Brodard, Coulommiers, 1877.
- Osborn, T. J., Briffa, K. R., Cook, E. R., Mann, M. E., 2000 - *The winter North Atlantic oscillation*. Poster, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich. <http://www.cru.uea.ac.uk/>.
- Otterlei, E., Nyhammer, G., Folkvord, A., et Stefansson, S. O., 1999 - Temperature- and size-dependant growth of larval and early juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*): a comparative study of Norwegian coastal cod and northeast Arctic cod. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**: 2099-2111.
- Ottersen, G., Planque, B., Belgrano, A., Post, E., Reid, P. C., et Stenseth, N. C., 2001 - Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*, **128**(1): 1-14.
- Ottersen, G., et Sundby, S., 1995 - Effects of temperature, wind and spawning stock biomass on recruitment of Arcto-Norwegian cod. *Fish. Oceanogr.*, **4**: 278-292.
- Parker, D. E., Jones, P. D., Bevan, A., et Folland, C. K., 1994 - Interdecadal changes of surface temperature since the late 19th century. *J. Geophys. Res.*, **99**: 14373-14399.
- Parona, P., 1919 - Il tonno e la sua pesca. *Memoria, R. Comitato Talassografico Italiano*, **68**.
- Pavesi, P., 1889 - *L'industria del tonno*. Relazione alla commissione reale per le tonnare, Ministero di Agricoltura, Industria e Commercio, Rome.
- Pella, J. J., et Tomlinson, P. K., 1969 - A generalized stock production model. *Bull. Inter. Am. Trop. Tuna Com.*, **13**: 420-496.
- Pelletier, D., 1991 - *Les sources d'incertitude en gestion des pêcheries. Evaluation et propagation dans les modèles*. Thèse de Doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Pepin, P., 1991 - Effect of temperature and size on development, mortality and survival rates of the pelagic early life history stages of marine fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **48**: 503-518.
- Peres-Neto, P. R., 1999 - How many statistical tests are too many? The problem of conducting multiple ecological inferences revisited. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **176**: 303-306.
- Pessoa, M. F., 1997 - *A pesca do atum em Portugal*. Université de Lisbonne, Lisbonne.
- Piccinetti, C., et Omiccioli, H., 1999 - Contribution à la connaissance des captures du thon rouge par les madragues. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **49**(2): 444-455.

- Piervitali, E., et Colacino, M., 2001 - Evidence of drought in western Sicily during the period 1565-1915 from liturgical offices. *Clim. Change*, **49**(1-2): 225-238.
- Pline l'Ancien, I BC – *Histoire naturelle*. Réédition, Trad. H. Zehnacker, Coll. Classique en Poche, Les belles lettres, Paris, 1999.
- Plusquellec, P.H., 1956 - Les madragues de Tunisie. *La pêche maritime*, **942**: 385-388.
- Porch, C.E., Kleiber, P., Turner, S.C., Sibert, J., et Bailey, R., 1996 - Can two-area mixing models capture enough of the population dynamics of Atlantic bluefin tuna to provide meaningful assessments? (some preliminary results). *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **45**: 182-207.
- Porch, C. E., et Restrepo, V., 1997 - *A user's manual for VPA-2BOX Version 2.0*, National Marine Fisheries Service, Miami.
- Postel, E., 1962 - Les thonidés d'Afrique du Nord. *Bull. Inst. Pêches Marit.*, **8**.
- Potts, G. W., et Wootton, R. J., 1984 - *Fish reproduction: strategies and tactics*. Academic Press, New York.
- Powell, J., 1996 - *Fishing in the Prehistoric Aegian*. Studies in Mediterranean Archeology and Literature, 137. Paul Aströms Förlag, Jonsered.
- Priestley, M. B., 1981 - *Spectral analysis and times series*. Academic Press, New York.
- Proctor, C. J., Baker, A., Barnes, W. L., et Gilmour, M. A., 2000 - A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland. *Clim. Dyn.*, **16**: 815-820.
- Punt, A. E., et Hilborn, R., 1996 - *Biomass dynamic model. User's manual*. FAO, Rome.
- Pusineri, C., Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2002 - Retrospective analysis of the bluefin tuna Nordic fisheries data. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **54**(2): 517-526.
- Ranta, E., Kaitala, V., et Lundberg, P., 1999 - A tale of big game and small bugs. *Science*, **285**(5430): 1022-1023.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2001a - Dynamique long terme de la population de thon rouge de Méditerranée et d'Atlantique Est. Description et implication en terme de gestion. In *Haliéutique : complexité et décision*, 5ème Forum halieumétrique, session 1 : "incertitudes et décisions". Lorient, France. *IFREMER, Actes de colloque*, **33**: 28-29.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2001b - Long-term fluctuations in the Eastern Atlantic and Mediterranean bluefin tuna population. *ICES J. mar. Sci.*, **58**(6): 1299-1317.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2001c - Trends in NE Atlantic and Mediterranean Bluefin Abundance. *PFRP Newsletter*, **6**(4): 1,5-7.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2002 - Eastern Atlantic bluefin tuna: What we learnt from historical time-series of trap catches. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **54**(2): 507-516.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2003a - Are the long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna population related to environmental changes? *Fish. Oceanogr.*, sous presse.
- Ravier, C., et Fromentin, J.-M., 2003b - Long-term fluctuations in bluefin tuna trap catches: Are they environmentally driven? *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, sous presse.
- Restrepo, V. R., Hoenig, J. M., Powers, J. E., Baird, J. W., et Turner, S. C., 1992 - A simple simulation approach to risk and cost analysis with applications to swordfish and cod fisheries. *Fish. Bull.*, **90**: 736-748.
- Ricker, W. E., 1954 - Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **11**: 559-623.
- Rivas, L. R., 1954 - A preliminary report on the spawning of the western North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Straits of Florida. *Bulletin of marine science of the Gulf and Caribbean*, Miami, **4**: 302-322.
- Rivas, L. R., 1978 - Preliminary models of annual life history cycles of the north atlantic bluefin tuna. In *The physiological ecology of tunas*. Academic press, New York.
- Rodrigo, F. S., Pozo-Vasquez, D., Esteban-Parra, M. J., et Castro-Diez, Y., 2001 - A reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index back to AD 1501 using documentary data in southern Spain. *J. Geophys. Res.*, **106**: 14805-14818.
- Rodriguez-Roda, J., 1964a - *Movimientos migratorios del atun, Thunnus thynnus (L.), deducidos por nuestras propias "marcaciones" en aguas españolas*. Publicaciones tecnicas de la junta de estudios de pesca, Direccion general de pesca maritima, Madrid. **3**: 279-304.
- Rodriguez-Roda, J., 1964b - Biología del Atun, *Thunnus thynnus (L.)*, de la costa sudatlantica de España. *Investigacion Pesquera*, **25**: 33-146.
- Rodriguez-Roda, J., 1964c - Talla, peso y edad de los atunes, *Thunnus thynnus (L.)*, capturado por la almadraba de Barbate (costa sudatlantica de España) en 1963 y comparacion con el periodo 1956 a 1962. *Investigacion Pesquera*, **26**: 3-47.
- Rodriguez-Roda, J., 1965 - Sobre las fluctuaciones en la produccion de atunes de las almadrabas sudatlanticas, *Publicaciones Tecnicas de la Junta de Estudios de Pesca*, Madrid. **4**: 205-209.
- Rodriguez-Roda, J., 1966a - El atun, *Thunnus thynnus (L.)*, de la costa sudatlantica de España en la campaña almadrabra del año 1964 y consideraciones sobre las fluctuaciones periodicas. *Investigacion pesquera*, **30**: 9-35.
- Rodriguez-Roda, J., 1966b - Estudio de los atunes, *Thunnus thynnus (L.)*, capturados en 1965, por la almadraba de Barbate (costa sudatlantica de España). *Investigacion Pesquera*, **30**: 483-496.
- Rodriguez-Roda, J., 1967a - Fecundidad del atun, *Thunnus thynnus (L.)*, de la costa sudatlantica de España. *Investigacion pesquera*, **31**(1): 33-52.
- Rodriguez-Roda, J., 1967b - El atun, *Thunnus thynnus (L.)*, del sur de España, en la campaña almadrabra del año 1966. *Investigacion Pesquera*, **31**(2): 349-359.
- Rodriguez-Roda, J., 1969 - El atun, *Thunnus thynnus (L.)*, en la campaña almadrabra del año 1967, y estudio de la evolucion de la pesqueria de Barbate. *Investigacion pesquera*, **33**(1): 87-96.
- Rodriguez-Roda, J., 1970a - El atun, *Thunnus thynnus (L.)*, del sur de España en la campaña almadrabra del año 1968 y su relacion con la temperatura y transparencia del agua del mar. *Investigacion pesquera*, **34**(2): 157-170.
- Rodriguez-Roda, J., 1970b - El atun, *Thunnus thynnus (L.)*, del sur de España en la campaña almadrabra del año 1969 y su relacion con la temperatura y transparencia del agua del mar. *Investigacion pesquera*, **34**(2): 503-514.

- Rodriguez-Roda, J., 1980a - Nuevas rutas en las migraciones transatlánticas del atún. *Iberica actualidad científica*, **207**: 8-10.
- Rodriguez-Roda, J., 1980b - Description of the spanish bluefin (*Thunnus thynnus*) trap fishery. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **11**: 180-183.
- Rogers, J. C., 1984 - The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, **112**: 1999-2015.
- Roule, L., 1914 - Etude préliminaire sur la biologie et la pêche du thon commun (*Orcynus thynnus* L.) dans la Méditerranée occidentale. In *V^{ème} congrès national des pêches maritimes*, Tunis, **1**, pp. 26-61.
- Roule, L., 1918 - Considérations sur la biologie du thon commun (*Orcynus thynnus* L.). *Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco*, **345**.
- Roule, L., 1924 - Etude sur les déplacements et la pêche du thon (*Orcynus thynnus* L.) en Tunisie et dans la Méditerranée occidentale. Bulletin de la station Océanographique de Salammbô, Imp. J. Aloicio, Tunis., **2**.
- Royama, T., 1992 - *Analytical population dynamics*. Chapman & Hall, New-York.
- Rubino, S., 1995 - *La tonnara Saline, tradizioni e riti di una tonnara*, Alghero.
- San Feliu, J. M., 1978 - La capture des thons dans les régions sud-atlantiques et méditerranéennes de l'Espagne. In *Le Thon rouge en Méditerranée. Biologie et aquaculture*, Actes de colloques du CNEXO, Sète, **8**, pp. 145-159.
- Sañez-Reguart, A., 1791-1795 - *Diccionario historico de las Artes de la pesca nacional*. Réédition Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1988.
- Santamaria, B. R., 1923 - *Diccionario de artes de pesca de España y sus posesiones*, Madrid.
- Santiago, J., 1998 - The North Atlantic Oscillation and recruitment of temperate tunas. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **48**(3): 240-249.
- Sara, R., 1964 - Data, observations and comments on the occurrence, behavior, characteristics and migrations of tunas in the Mediterranean. *Proceedings and Technical Papers, General Fisheries Council for the Mediterranean*, Rome. **7**(37): 371-388.
- Sara, R., 1973 - Sulla biologia dei tonni (*Thunnus thynnus* L.) modelli di migrazione e di comportamento. *Bolletino di Pesca, Piscicoltura e Idrobiologia*, **28**: 217-243.
- Sara, R., 1980 - La pêche du thon au thonaire en Méditerranée. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **9**: 129-144.
- Sarmiento, F. M., 1757 - *De los atunes y sus transmigraciones y conjeturas sobre la decadencia de las almadrabas y sobre los medios para restituirlos*. Caixa de Pontevedra, Madrid.
- Scaccini, A., et Paccagnella, V., 1965a - Considérations sur les tendances de la pêche au thon par les madragues italiennes. *Proc.gen.Fish.Coun.Medit.*, **8**: 391-394.
- Scaccini, A., et Paccagnella, V., 1965b - Observations sur l'approchement à la côte de thons pendant la période de course en rapport à la pêche par les madragues. *Rapp. P.-v. Réun. CIESM*, **18**(2): 201-206.
- Schaefer, K. M., 2001 - Reproductive biology of tunas. In B. A. Block, et E. D. Stevens (Eds.), *Tuna: physiology, ecology and evolution*. Academic press. New York, pp. 225-270.
- Schaefer, M. B., 1954 - Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. *Bull. Inter-Am. Trop. Tuna Comm.*, **1**: 27:56.
- Schmutz, C., Luterbacher, J., Gyalistras, D., Xoplaki, E., et Wanner, H., 2000 - Can we trust proxy-based NAO index reconstructions? *Geophys. Res. Lett.*, **27**(8): 1135-1138.
- Schwartzlose, R. A., Alheit, J., Bakun, A., Baumgartner, T., Cloete, R., Crawford, R., Fletcher, W., Green-Ruiz, M. Y., Hagen, E., Kawasaki, T., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S., MacGill, A., Matsuura, Y., Nevarez-Martinez, M., Parrish, R., Roy, C., Serra, R., Shust, K., Ward, M., Zuzunaga, J., 1999 - Worldwide large-scale fluctuations of sardine and anchovy populations. *S. Afr. J. mar. Sci.*, **21**: 289-347.
- Scordia, S., 1938 - Per la biologia del tonno (*Thunnus thynnus* L.). XV. Le migrazioni dei tonni entro il Mediterraneo. *Memorie di Biologia Marina e di Oceanografia*, **5**(8): 1-50.
- Sella, M., 1929a - Biologia e pesca del tonno (*Thunnus thynnus* L.). In *Convegno di Biologia marina applicata alla pesca*, Messina.
- Sella, M., 1929b - Migrazioni e habitat del tonno (*Thunnus thynnus*, L.) studiati col metodo degli ami, con osservazioni su l'accrescimento, sul regime delle tonnare ecc. *Memoria, R. Comitato Talassografico Italiano*, **156**: 511-542.
- Sen, A., et Srivastava, M., 1990 - *Regression analysis: theory, methods and applications*. Springer-Verlag, New-York.
- Serra, C., Burgueno, A., et Lana, X., 2001 - Analysis of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) in the period 1917-1998. *Int. J. Climatol.*, **21**(5): 617-636.
- Silva Lopez, J. B., 1841 - *Corografia on memoria economica, estatistica e topografica lo Reina do Algarve*. Réédition, Col. Temas e Estudos Algarvios, Editions Algarve em Foco, 1988.
- Silverman, B. W., 1986 - *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall, New-York.
- Sokal, R. R., 1986 - Spatial data analysis and historical processes. In E. Diday, Y. Escoufier, L. Lebart, J. Pages, Y. Schektman, et R. Tomassone (Eds.), *Data analysis and informatics*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, **6**, pp. 29-43.
- Sokal, R. R., et Rohlf, F. J., 1995 - *Biometry* (Third edition). W.H. Freeman & Co, New-York.
- Sole, P. A., 1965 - *Los picaros de Conil y Zahara. Estudio historico sobre los jesuitas y las almadrabas del duque de Medina Sidonia en la segunda mitad del siglo XVI*. Editorial Jerez industrial, Cadix.
- Southward, A. J., Boalch, G. T., et Maddock, L., 1988 - Fluctuations in the herring and pilchard fisheries of Devon and Cornwall linked to change in climate since the 16th century. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **68**: 423-445.
- S-Plus, 2001 - *S-plus 6 Guide to statistics*, Vol. 1 and Vol. 2. MathSoft, Inc., Seattle, Washington.
- Stacey, N. E., 1989 - Control of the timing of ovulation by exogenous and endogenous factors. In G. W. Potts, et R. J. Wootton (Eds.), *Fish reproduction: Strategies and tactics*. Academic press, New York, pp. 207-222.
- Steele, J. H., et Henderson, E. W., 1984 - Modeling long-term fluctuations in fish stocks. *Science*, **224**: 985-987.
- Stenseth, N. C., Bjørnstad, O. N., Falck, W., Fromentin, J.-M., Gjøsæter, J., et Gray, J. S., 1999 - Dynamics of coastal cod populations: intra- and inter-cohort density-dependence and stochastic processes. *Proc. Roy. Soc. London Ser. B*, **266**: 1645-1654.
- Stephenson, F. R., et Morrison, L. V., 1984 - Long-term changes in the rotation of the Earth: 700 BC to AD 1980. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **313**: 47-70.

- Stevick, P. T., McConnell, B. J., et Hammond, P. S., 2002 - Patterns of movement. In A. R. Hoelzel (Ed.), *Marine mammal biology: an evolutionary approach*. Blackwell Science, Oxford
- Stratouli, G., 1996 - Die Fischerei in der Ägäis während des Neolithikums zur Technik und zum potentiellen Ertrag. *Prähistorische Zeitschrift*, **71**(1): 1-27.
- Thomazi, A., 1947 - *Histoire de la pêche des âges de la pierre à nos jours*. Payot, Paris.
- Tiews, K., 1962 - Synopsis of biological data on bluefin tuna *Thunnus thynnus* (Linnaeus) 1758 (Atlantic and Mediterranean). In *World scientific meeting on the biology of tunas and related species*, La Jolla, California
- Tiews, K., 1964 - Der Thunbestand (*Thunnus thynnus* L.) in der Nordsee, seine Wanderungen, seine transatlantischen Beziehungen und seine Nutzung durch die deutsche Fischerei. *Arch. Fisch.*, **14**(3): 105-148.
- Tiews, K., 1978 - On the disappearance of bluefin tuna in the North Sea and its ecological implications for herring and mackerel. *Rapp. P.-v Réun. CPIEM*, **172**: 301-309.
- Toresen, R., et Oestvedt, O. J., 2000 - Variation in abundance of Norwegian spring-spawning herring (*Clupea harengus*, Clupeidae) throughout the 20th century and the influence of climatic fluctuations. *Fish Fish.*, **1**(3): 231-256.
- Tukey, J. W., 1977 - *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Turchin, P., 1999 - Population regulation : a synthetic view. *Oikos*, **84**(1): 153-159.
- Turchin, P., 2002 - *Complex population dynamics: a theoretical/empirical synthesis*. Princeton University Press, Princeton.
- Tyler, A. V., 1995 - Warm-water and cool-water stocks of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*): a comparative study of reproductive biology and stock dynamics. Climate change and northern fish populations. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, **121**: 537-545.
- Velleman, P. F., et Hoaglin, D. C., 1981 - *Applications, basics, and computing of exploratory data analysis*. Duxbury, Boston.
- Venables, W. N., et Ripley, B. D., 1999 - *Modern applied statistics with S-Plus*; 3rd edition. Springer-Verlag, New-York.
- Vilela, K., 1960 - Estudos sobre a biologia dos atuns em Portugal. *Bol. Pesca*, **69**: 11-34.
- Walker, G. T., 1924 - Correlations in seasonal variations of weather. *Mem. Indian Meteor. Dept.*, **24**: 275-332.
- Walker, M. M., 1984 - Learned magnetic field discrimination in Yellowfin tuna *Thunnus albacares*. *J. Comp. Physiol. A*, **155**: 673-679.
- Walker, M. M., Diebel, C. E., Haugh, C. V., Pankhurst, P. M., Montgomery, J. C., et Green, C. R., 1997 - Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature*, **390**(6658): 371-376.
- Walker, M. M., Kirschvink, J. L., Chang, S. B. R., et Dizon, A. E., 1984 - A candidate magnetic sense organ in the Yellowfin tuna *Thunnus albacares*. *Science*, **224**: 751-753.
- Watson, G. S., 1966 - Smooth regression analysis. *Sankha*, **Ser. A 26**: 359-378.
- Wei, W. W. S., 1990 - *Times series analysis. Univariate and multivariate methods*. Addison Wesley, Redwood City, Californie.
- Wheeler, D., 1995 - Early instrumental weather data from Cadiz: a study of late eighteenth and early nineteenth century records. *Int. J. Climatol.*, **15**: 801-810.
- Williamson, M., 1972 - *The analysis of biological populations*. Edward Arnold, Londres.
- Zagoruiko, N. G., et Yolkina, V. N., 1982 - *Inference and data tables with missing values, Handbook of statistics*. North Holland Publishing Company, Amsterdam, **2**, pp. 493-500.
- Zar, J. H., 1984 - *Biostatistical analysis*. 2nd ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- Zupanovic, S., Mugahid, A. R., et Gerges, M. A., 1983 - Some ecological aspects of bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) caught by trap nets in the Libyan waters. *Bulletin of the Marine Research centre Tripoli*, **4**: 5-44.

ANNEXES

Annexe A

Méthode d'estimation des données manquantes

Les données manquantes constituent un problème récurrent en écologie quantitative. De nombreux jeux de données sont “truffés” de données manquantes, qui résultent le plus souvent d'un défaut d'échantillonnage à une date donnée (e.g. équipement de mesure momentanément hors d'usage, mauvaise conditions météorologiques, spécimens perdus ou mal conservés, manque temporaire d'argent et/ou de personnel de terrain, etc...). Cependant, la plupart des méthodes d'analyse spatio-temporelle requièrent la contiguïté.

Les difficultés engendrées par les données manquantes (NA, nous utiliserons ici le code S-Plus, 2001) sont peu souvent abordées dans la littérature. Legendre et Legendre (1998) proposent trois voies pour traiter le problème. La plus simple consiste à supprimer, dans une matrice de donnée, toute ligne ou colonne contenant une NA, ce qui n'a pas grand sens dans le cas d'une série temporelle. Une seconde alternative consiste à modifier les méthodes numériques de telle sorte que les NA ne soient prises en compte au cours des calculs (voir e.g. les manuels des différents logiciels d'analyse de données comme S-plus, SAS ou Matlab). Cette approche peut être pertinente pour des analyses telles que les régressions ou corrélations mais ne l'est pas pour les analyses requérant la contiguïté, comme les analyses spectrales, l'ajustement de modèles autorégressifs, le lissage,... Estimer les données manquantes (*imputation*, Little et Rubin, 1987) devient alors la seule solution.

Le lissage (par moyenne mobile, filtre de kernel, splines et polynômes) est la méthode communément utilisée pour compléter un tableau à données manquantes (Watson, 1966). Mais d'autres méthodes, basée sur un processus autorégressif telles que les modèles ARIMA, peuvent être utilisées et même se révéler plus puissantes pour reproduire les fluctuations inter-annuelles d'une série temporelle (Ansley, 1979 ; Kohn et Ansley, 1986).

Cette annexe présente une approche empirique du problème, appliquée au tableau de captures historiques de thon rouge par les madragues méditerranéennes et du proche atlantique. L'objectif est de déterminer (i) quelle est la méthode la plus appropriée pour compléter le jeu de donnée sans altérer les relations sous-jacentes entre les données, et (ii) jusqu'à combien de données manquantes adjacentes peuvent être estimées de manière satisfaisante.

Matériel et méthodes

- Les séries de captures par les madragues

La plupart des séries de captures par les madragues “possèdent” des données manquantes. Ces NA, de 1 à plusieurs années, ont deux principales origines :

- la madrague n'a pas été calée une année donnée pour différentes raisons (guerre, manque de personnel et/ou de crédit, mauvaises conditions environnementales...),

- les données n'ont pas encore été retrouvées ou sont définitivement perdues.

Tenter d'estimer des périodes manquantes de plus de 5 années consécutives n'est pas raisonnable (Fromentin *et al.*, 1997). Aussi, l'étude se réduira à l'estimation des données manquantes de 1 à 5 années adjacentes. 7 séries à long terme sont sélectionnées et percées au hasard de 1 à 5 données consécutives. La procédure est répétée 2 fois pour tester l'influence de la situation de la donnée manquante sur les estimations. Les séries sont sélectionnées sur 2 critères, leur longueur et leur origine géographique :

- Favignana et Formica proviennent de la côte ouest sicilienne ; fav1 et for1 correspondent aux données des XVII-XIX^{ème} siècles, fav2 et for2 à celles de la période 1878-1960.

- Porto Scuso (ps) provient du sud-ouest de la Sardaigne et s'étend de 1825 à 1960.

- Sidi Daoud (sd) est la principale série tunisienne et s'étend de 1863 à 1955.

- Medo das Casas (mdc) provient de la côte sud du Portugal et s'étend de 1852 à 1932.

Toutes les séries sont exprimées en nombre de thons.

- Les méthodes d'estimation des données manquantes

La méthode ZET, qui estime les NA à partir d'une procédure itérative basée sur des régressions linéaires entre séries temporelles, n'est pas appropriée ici car l'indépendance entre séries doit être préservée pour tester ultérieurement leur synchronisme (Zagoruiko et Yolkina, 1982). Quatre méthodes sont comparées :

- la médiane mobile, méthode robuste pour lisser une série temporelle (Tukey, 1977 ; Velleman et Hoaglin, 1981). Une médiane mobile d'ordre 2, soit une fenêtre de lissage de 5 ans, est utilisée.

- le filtre de kernel (Watson, 1966 ; Silverman, 1986 ; Venables et Ripley, 1999) qui est un filtre de lissage local moyen.

- un filtre spline (Hastie et Tibshirani, 1990; S-Plus, 2001), qui se comporte approximativement comme un filtre de kernel mais qui minimise un compromis entre l'ajustement et le degré de lissage. Le degré de lissage est choisi ici automatiquement par validation croisée par la fonction “*smooth.spline*” de S-Plus (2001).

- un modèle ARIMA(p,d,q) (modèle mixte intégré (opérateur de différence d'ordre d), autorégressif (d'ordre p), et de moyenne mobile (d'ordre q), Box et Jenkins, 1976). L'identification de l'ordre p du modèle est faite en utilisant les fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle de S-Plus (2001). Ensuite, le modèle final est sélectionné en utilisant le critère d'information de Akaike (AIC, Akaike *et al.*, 1979), qui pénalise la déviance par deux fois le nombre de paramètres. Le modèle est ajusté sur le logarithme des séries standardisées pour éviter l'estimation de nombres de thons négatifs. Les

modèles sélectionnés sont un ARIMA (2,1,2) pour les 2 séries for1 et mdc, un ARIMA (2,1,1) pour les 5 autres.

Pour comparer la qualité des estimations des différentes méthodes, une "mesure d'erreur" est calculée comme la somme des carrés des écarts entre valeur estimée et valeur vraie, SS :

$$SS = \sum [(y_i - \hat{y}_i)^2]$$

Un pourcentage d'erreur est alors défini comme :

$$\varepsilon = \frac{\sum |(y_i - \hat{y}_i)|}{\sum y_i} \times 100$$

Tous les calculs sont réalisés avec S-Plus (2001).

Résultats

La déviance entre les valeurs vraies et les estimations a tout d'abord été appréciée globalement (Fig. A. 1). Lorsque seule une année est manquante, toutes les méthodes conduisent à approximativement au même niveau d'erreur (bien que l'ARIMA procure une estimation sensiblement meilleure). Lorsque le nombre de NA consécutives augmente, les méthodes de lissage (médiane mobile, filtre de kernel et spline) d'une part et la méthode autorégressive d'autre part montrent des performances différentes. Dès 2 NA consécutives, l'erreur des estimations par les méthodes de lissage s'accroît rapidement (de 1 à 2 NA, SS est multiplié par >6). Parmi les méthodes de lissage, la médiane mobile fournit une estimation sensiblement meilleure que celle du filtre de kernel, les splines conduisant globalement aux moins bonnes estimations. La méthode ARIMA fournit de loin les meilleures estimations jusqu'à 3, voir 4 NA consécutives, l'erreur augmentant rapidement entre 3 et 5 NA.

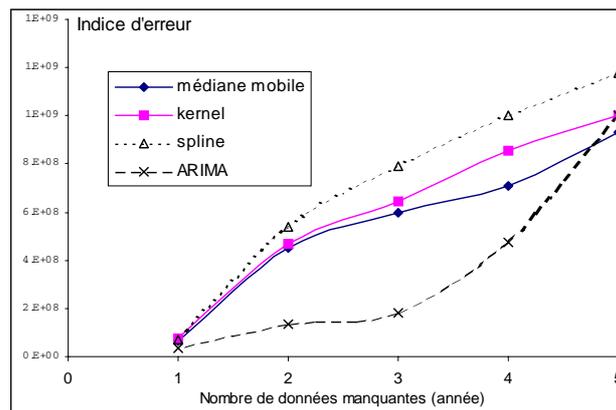


Fig. A. 1 : Résultats de l'étude empirique sur les méthodes d'estimation de données manquantes.

L'indice d'erreur est la somme des carrés des écarts entre valeurs estimées et valeurs observées.

L'étude est réalisée sur 7 séries, "percées" au hasard de 1 à 5 données contiguës.

Un ARIMA est retenu pour estimer 1 à 3 données manquantes adjacentes, sauf lorsque l'ajustement n'est pas jugé satisfaisant. Le choix d'un filtre de kernel apparaît alors la meilleure alternative (la médiane mobile conduit parfois à de meilleures estimations mais se révèle bien plus sensible au voisinage).

Le cas d'une unique NA est le cas le plus fréquent dans les séries de captures par les madraques. La précision de ces estimations a donc été plus particulièrement étudiée (Fig. A. 2). Les résultats sont très variables entre les méthodes et entre les séries. Néanmoins, les estimations restent tout à fait satisfaisantes dans la plupart des cas et les erreurs sont généralement (dans 80% des cas) inférieures à 35%. L'erreur maximale atteint 100 à 140% pour deux séries complétées par des méthodes de lissage, for11 et fav21. L'ARIMA fournit de meilleures estimations que le kernel et le spline. Pour les autres séries, toutes les méthodes apparaissent plus ou moins équivalentes. En comparant 2 jeux d'allocation (au hasard) de NA, les résultats sont différents. Par exemple, pour les séries for1 et fav2, la plupart des méthodes conduisent à une large erreur pour un des tirages mais à de faibles pour l'autre (Fig. A. 2). Ce résultat souligne l'importance du voisinage dans la précision des prédictions.

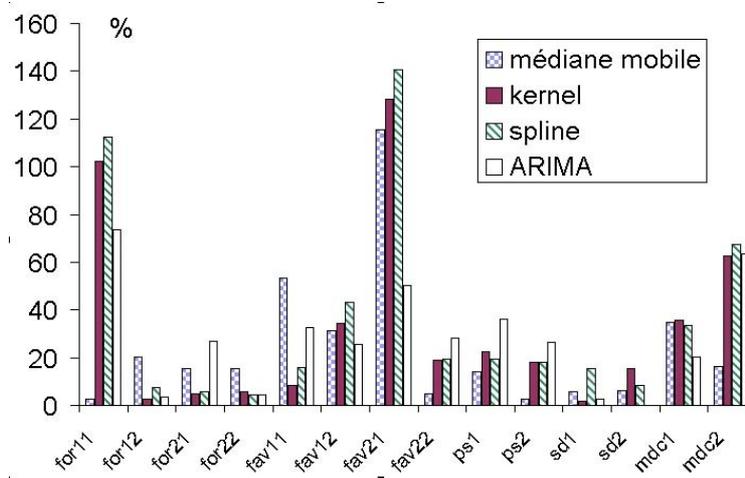


Fig. A. 2 : Erreurs d'estimation (%) d'une valeur manquante par cinq méthodes sur les 2 tirages des 7 séries.

La Fig. A. 3 présente les erreurs d'estimation pour 1 à 5 NA lors des 2 tirages. Comme attendu, les résultats confirment que l'ARIMA procure les meilleures estimations (e.g. fav11, fav21, mdc1) ou se comporte de manière similaire aux méthodes de lissage (e.g., ps2, mdc2). Sur ces 14 exemples, seules 3 exceptions sont notables (for11, fav22 et ps1) : les meilleures estimations pour 3 à 5 NA consécutives sont alors obtenues avec une médiane mobile. Cependant, la médiane mobile fournit également dans certains cas (e.g., for22, ps2) les erreurs les plus importantes. Le kernel et le spline fournissent des résultats comparables (le kernel étant sensiblement meilleur), généralement moins précis que les 2 précédentes méthodes. Dans la plupart des exemples, les erreurs s'accroissent nettement lorsque plus de 3 NA sont estimées (e.g., for21, fav11, sd1 ou fav22). L'erreur maximale est atteinte pour 5 NA consécutives, atteignant de 100 (fav12) à presque 3000 % (for11). La comparaison des 2 tirages (panneau droit et gauche de la Fig. A. 3) confirme l'importance du voisinage dans la précision des estimations et la performance des différentes méthodes. Par exemple, pour le premier tirage dans la série ps, la médiane mobile est plus performante que les autres alors qu'elle est insatisfaisante pour le 2^{ème} tirage. L'ARIMA cependant, semble fournir des résultats plus stables.

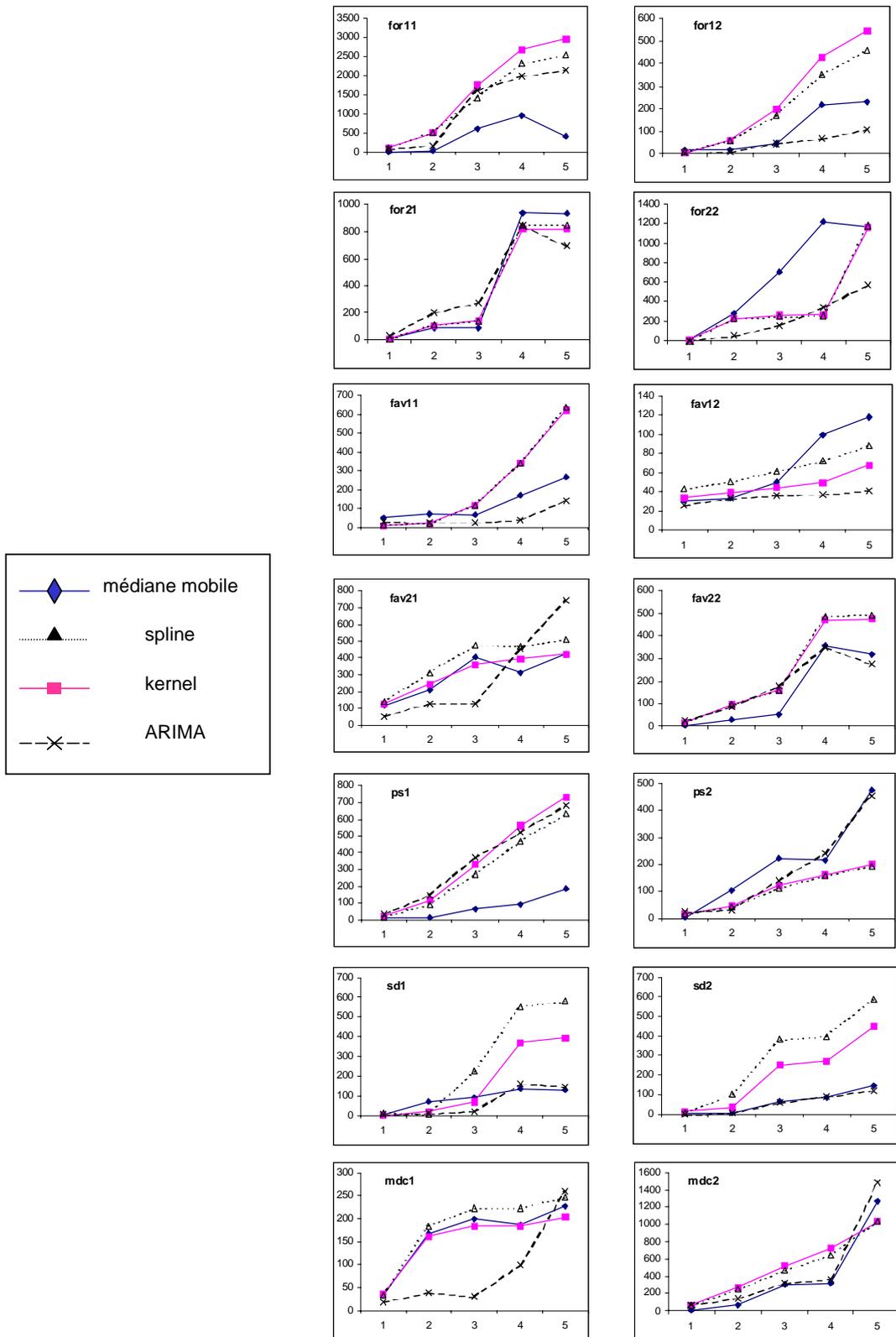


Fig. A. 3 : Erreurs d'estimation (%) d'une à cinq valeurs manquantes sur les 2 tirages (premier tirage : panneau de gauche ; second tirage : panneau de droite) des 7 séries.

L'erreur des estimations des NA peut sembler importante. Le pourcentage d'erreur est lié à la valeur absolue de la NA et doit être relativisé en comparaison des variations inter-annuelles des séries. for11, pour laquelle l'erreur est la plus importante (elle atteint près de 3 000 % lorsque 5 NA sont estimées), montre que les valeurs prédites restent toujours dans la gamme de variations des points voisins (Fig. A. 4). Sur cette période, la variabilité inter-annuelle des captures est très importante (C.V. = 0,90), si bien que les estimations de valeurs extrêmes, comme c'est le cas ici, conduisent inévitablement à des erreurs importantes. Cet exemple montre clairement qu'une attention particulière doit être portée sur le voisinage des NA lors de l'opération de complétion et que toute procédure "automatique" doit être bannie.

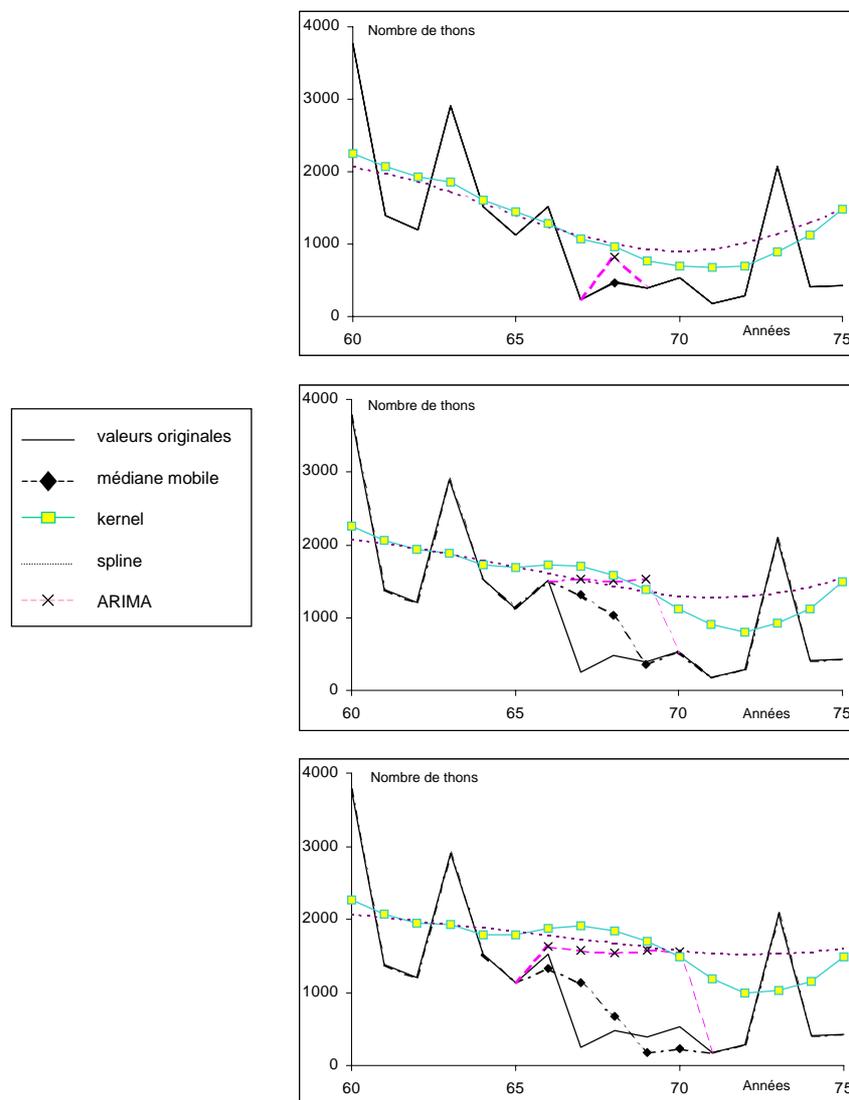


Fig. A. 4 : Estimations calculées par une médiane mobile, des filtres kernel et spline, et un modèle ARIMA, pour une à cinq valeurs manquantes dans la série for1.

Avant et après la donnée manquante, les valeurs originales, la médiane mobile et l'ARIMA sont confondues. Pour plus de clarté, les symboles de ces deux dernières ne sont pas affichés.

Discussion – Conclusion

Les erreurs dans les estimations de NA apparaissent finalement dépendantes de : (i) le nombre de NA consécutives, (ii) la méthode utilisée et (iii) le voisinage des NA.

Le fait que l'erreur augmente avec le nombre de NA est un résultat trivial. Mais, plus intéressant, la limite pour laquelle l'erreur reste raisonnable peut être déterminée. Pour la plupart des séries, les erreurs augmentent nettement entre 2 et 4 NA successives. De plus, de nombreuses conditions particulières telles que l'amplitude des variations inter-annuelles, des changements dans la variance locale et l'importance de l'autocorrélation et de la tendance influencent le niveau d'erreur. Réaliser une estimation jusqu'à 3 NA semble donc un compromis raisonnable alors que compléter une période de 4 à 5 ans apparaît irréaliste dans la plupart des cas. Pour estimer jusqu'à 3 NA consécutives, la méthode qui donne les meilleurs résultats dans la plupart des cas (10 sur 14) est l'ARIMA. Cette méthode combine l'information d'un filtre de lissage (une moyenne mobile) avec l'information d'un modèle auto-régressif. Ainsi, l'ARIMA apparaît la plus à même de reproduire à la fois les variations inter-annuelles (généralement mal estimées par le kernel et le spline) mais également les tendances. Cette propriété est particulièrement intéressante pour les séries de captures par les madragues qui présentent les 3 types de variations.

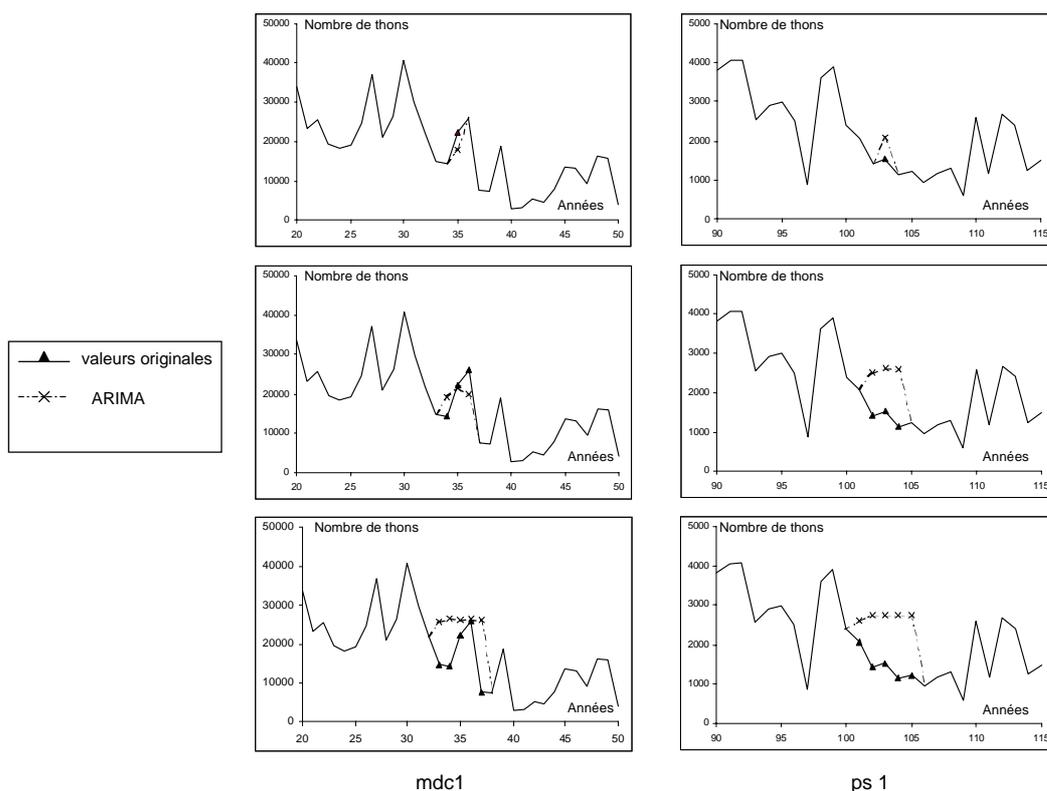


Fig. A. 5 : Estimations des modèles ARIMA comparées avec les valeurs originales pour une, trois et cinq valeurs manquantes consécutives sur les séries mdc1 (panneau de gauche) et ps1 (panneau de droite).

L'erreur des estimations dépend également du voisinage. Si l'ARIMA procure les meilleures estimations, elle présente néanmoins quelques limites. En premier

lieu, les estimations de l'ARIMA ne sont pas satisfaisantes lorsque le processus autorégressif de la série n'est pas assez important. De plus, les estimations de l'ARIMA deviennent moins précises que celles des filtres quand les changements dans la variance locale sont importants (for21 et ps1). Dans le cas mdc1, la variance locale reste constante, alors qu'elle change dans le cas ps1 (Fig. A. 5). En conséquence, les estimations de l'ARIMA sont proches des vraies valeurs pour mdc1, mais pas pour ps1. Pour cette dernière série, percée là où la variabilité diminue, l'ARIMA prédit une trop forte variation inter-annuelle, en suivant la période précédente. Cette méthode doit donc être appliquée avec précaution aux séries démontrant un tel comportement.

En conséquence, nous choisirons d'utiliser un modèle ARIMA pour estimer 1 à 3 NA consécutives, à moins que le modèle ne s'ajuste pas de manière satisfaisante. Appliquer un filtre de kernel apparaît alors la meilleure alternative. Même si la médiane mobile fournit parfois de meilleures estimations, elle ne semble pas suffisamment fiable car très dépendante du voisinage.

Annexe B

Séries environnementales à long terme

Pour tester une hypothétique influence du climat sur les fluctuations à long et/ou moyen terme des abondances de thon rouge en Méditerranée, il était nécessaire disposer de séries environnementales aussi anciennes que possible.

Sur la période pré-instrumentale (avant le XIX^{ème} siècle), à défaut de relevés météorologiques réguliers et fiables, des indices permettent de caractériser qualitativement les conditions climatiques voire de reconstruire des séries informatives sur la période historique. En effet, les événements du climat ayant frappé l'imagination de leurs contemporains ont été régulièrement rapportés dans la littérature : sécheresse « *effroyable* », gelées « *épouvantables* », « *grands* » hivers, « *déluges* » de pluie (Leroy Ladurie, 1983) ... Des auteurs ont pu ainsi estimer par exemple les températures printanières et estivales à partir des dates des vendanges (Leroy Ladurie, 1983), les périodes de sécheresse en Italie à partir des sermons ecclésiastiques (Piervitali et Colacino, 2001), la circulation Nord Atlantique des 16^{ème}, 17^{ème} et 18^{ème} siècles à partir de la durée des traversées des navires espagnoles vers les Amériques (Garcia *et al.*, 2000) ou même de la rigueur des hivers en Angleterre à partir du nombre de suicides ! Mais ce matériel événementiel est, par nature, hétérogène, discontinu et subjectif. De nouvelles méthodes ont donc été développées, permettant d'établir avec rigueur des séries d'éléments météorologiques annuelles, continues, quantitatives et homogènes. La dendroclimatologie⁽¹⁾, par exemple, repose sur le principe suivant : toute coupe transversale dans un d'arbre fait apparaître une série d'anneaux concentriques représentant la croissance annuelle de l'arbre. Chacun des anneaux pris à part a une valeur climatologique; il est le reflet des conditions météorologiques qui ont présidé sa croissance au cours de l'année de sa formation. Une année favorable est signée par un anneau large et épais, une année défavorable par un liséré mince et étroit. Ainsi l'anneau de croissance donne une note climatologique à son année de formation. En portant sur un graphique en abscisse la suite des années, en ordonnées l'épaisseur des anneaux, on obtient la courbe de croissance de l'arbre, dont les fluctuations, correctement interprétées, sont révélatrices des fluctuations climatiques inter-annuelles. Une autre de ces méthodes consiste à analyser les enregistrements prélevés dans les calottes glaciaires. L'accumulation de glace par an est révélatrice des conditions climatologiques régnant cette année - là. L'étude du taux de croissance des stalagmites, contrôlé par les précipitations, constitue également une autre approche (Proctor *et al.*, 2000).

⁽¹⁾ Pour faire une comparaison avec une technique plus connue des halieutes, la sclérochronologie repose sur un principe analogue à la dendroclimatologie ; elle étudie les pièces calcifiées (les otolithes et les écailles notamment) pour reconstruire l'histoire individuelle des organismes vivants.

La période post-instrumentale est logiquement mieux documentée à la fois en quantité et en qualité avec des séries de pression (Tab. B.2, Jones *et al.*, 1997a), de précipitations (Jones *et al.*, 1997a ; Brunetti *et al.*, 2001), de températures (Balling *et al.*, 1998 ; Brunetti *et al.*, 2001). On s'est également intéressé à l'impact de l'oscillation nord atlantique (NAO, Encadré 9), à l'origine d'une part importante de la variabilité inter-annuelle de la circulation atmosphérique Nord Atlantique (Rogers, 1984 ; Hurrell, 1996).

Les séries historiques de températures et de NAO intéressant la région méditerranéenne et Est Atlantique sont présentées dans les Tab. B. 1, B. 2 et B. 3 ; les lecteurs intéressés pourront également consulter les données de Bradley *et al.* (1985).

Tab. B.1 : Séries historiques de températures intéressant la région méditerranéenne/Est Atlantique
(par ordre chronologique de publication).

Auteurs	Lieu	Période	Résolution temporelle	Variables	
Météorologie Nationale	Paris	1757-1985	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Manley (1974)	Centre Angleterre	1659-1995	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Leroy Ladurie (1983)	France	1599-1791	Annuelle	Indice construit à partir des dates de vendange	
Wheeler (1995)	Cadix	de 1788 à 1816	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Chlistovsky <i>et al.</i> (1997)	Milan	1763-1995	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Balling (1998)	57 stations européennes	de 1751 à 1995	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Mann <i>et al.</i> (1998, 1999) http://www.people.Virginia.EDU/~mem6u/mbh98.html	Hémisphère Nord	1000-1980	Annuelle	Reconstructions multi-indices (données dendrochronologiques, enregistrements glaciaires, mesures instrumentales)	
D'Arrigo <i>et al.</i> (1999)	Hémisphère Nord	1671-1973	Annuelle	Reconstruction à partir de données dendrochronologiques	
Jones <i>et al.</i> (1999), Jones et Moberg (2003) http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/	Hémisphère Nord	1856-2001	Mensuelle	Reconstruction à partir de données dendrochronologiques	
Alcoforado <i>et al.</i> (2000)	Sud Portugal	1675-1715	Annuelle	Reconstruction à partir de sources documentaires municipales et ecclésiastiques	
Brunetti <i>et al.</i> (2000, 2001), http://www.isao.bo.cnr.it/~climstor/topics.html	Stations d'Italie continentale, de Sardaigne et de Sicile	de 1865 à 1996	Mensuelle	Mesures instrumentales	
Crowley et Lowery (2000)	Hémisphère Nord	1000-1987		Reconstruction multi-indices	
Briffa <i>et al.</i> (2001) http://www.cru.uea.ac.uk/cru/people/briffa/	Hémisphère Nord	1400-2000	Estivale (avril - septembre)	Reconstruction à partir de données dendrochronologiques	
Luterbacher et Xoplaki (2001)	Europe du Sud Méditerranée	1590-2000	1500-1995	Hivernale (décembre à février)	Reconstruction multi-indices
Serra <i>et al.</i> (2001)	Barcelone	1917-1998	Quotidienne	Mesures instrumentales	
Esper <i>et al.</i> (2002)	Hémisphère Nord	1000-1993	Annuelle	Reconstruction à partir de données dendrochronologiques	

Tab. B.2 : Indices NAO calculés (par ordre chronologique de publication).

Auteurs	Période calculée	Résolution temporelle	Variables utilisées
Rogers (1984), complété par Cook <i>et al.</i> (1998)	1874-1980	Hivernale (décembre à février)	SLP ⁽¹⁾ Ponta Delgada - Akureyri
Hurrell (1995), Hurrell <i>et al.</i> (2001)	1864-2000	Hivernale (décembre à mars)	SLP Lisbonne - Stykkisholmur/Reykjavik
Jones <i>et al.</i> (1997a) http://www.cru.uea.ac.uk/	1823-1996	Mensuelle Saisonnaire	Pression à Gibraltar - Température et pression de différentes stations islandaises
Hurrell http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html#oseas	1865-2000	Mensuelle Saisonnaire Annuelle	SLP Ponta Delgada - Stykkisholmur/Reykjavik

Tab. B.3 : Indices NAO reconstruits (par ordre chronologique de publication).

Auteurs	Période reconstruite	Résolution temporelle	Variables prédictrices
Appenzeller <i>et al.</i> (1998)	1648-1990	Annuelle (avril à mars)	Enregistrements d'accumulation de glace au Groenland
Cook <i>et al.</i> (1998) http://www.ldeo.columbia.edu/programs/index.html	1701-1980	Hivernale (décembre à février)	Données dendrochronologiques de l'est des Etats-Unis et d'Europe
Luterbacher <i>et al.</i> (1999)	1675-1990	Mensuelle	Mesures instrumentales de pression, température et précipitation et données documentaires
Proctor <i>et al.</i> (2000)	907-1993	Annuelle	Taux de croissance des stalagmites du nord ouest de l'Ecosse
Rodrigo <i>et al.</i> (2001)	1501-1997	Hivernale (décembre à février)	Précipitations reconstruites à partir de documents historiques d'Andalousie
Glueck et Stockton (2001)	1429-1983	Hivernale (décembre à février)	Données dendrochronologiques du Maroc et de Finlande, séries annuelles de $\delta^{18}\text{O}$ et enregistrements d'accumulation de neige du GISP2 ⁽²⁾
Cullen <i>et al.</i> (2001)	1701-1979		Reconstruction multi-indices (mesures instrumentales, données dendrochronologiques, enregistrements glaciaires)
Mann (2001)	1750-1979	Hivernale	Variabilité de la température annuelle (elle-même issue d'une reconstruction multi-indices)
Cook <i>et al.</i> (2002)	1400-1979	Hivernale (décembre à février)	Données dendrochronologiques de l'est de l'Amérique du Nord, du Maroc et d'Europe, et enregistrements glaciaires du Groenland

⁽¹⁾ SLP, pour *Sea-Level Pressure* : pression au niveau de la mer.

⁽²⁾ Le *Greenland Ice Sheet Project 2* (GISP2), initié en 1988, est un programme financé par l'*Arctic System Science* (ARCSS) qui étudie des enregistrements glaciaires pour constituer des archives à haute résolution de plus de 110 000 ans sur les changements global du climat.

Annexe C

Paramétrisation, limites et performance de la VPA

Les analyses de populations virtuelles (VPA) sont réalisées en utilisant l'algorithme classiquement employé à l'ICCAT, VPA-2BOX (Porch et Restrepo, 1997), basé sur la méthode ADAPT (Gavaris, 1988).

Paramétrisation de la VPA

La VPA est surparamétrée (voir partie 4, chapitre II.1.3) ; des hypothèses doivent donc être faites sur certains paramètres. L'intérêt d'ADAPT réside dans les suppositions qu'il permet de faire sur les mortalités par pêche du dernier âge et de la dernière année (F terminaux).

Il est ainsi possible de réduire le nombre d'estimations en postulant une relation entre les F des deux derniers groupes d'âges. Ces postulats reposent la connaissance que l'on a de la pêcherie. Pour chaque année, le F du dernier âge (A) est alors calculé comme

$$F_{A,t} = r_t \cdot F_{A-1,t}$$

où r_t est le "F-ratio", posé par l'utilisateur. Ici, comme c'est généralement l'usage dans les groupes d'évaluation thon rouge de l'ICCAT, les F-ratios ne sont pas estimés et sont posés égal à 1 pour tous les âges.

L'estimation des F de la dernière année est faite par une procédure de *tuning*. Le *tuning* utilise l'information fournie par des indices d'abondance pour déterminer le F terminal de la dernière année grâce à une fonction de minimisation entre les indices d'abondances observées et les abondances prédites par la VPA :

$$\min \sum_i \sum_t (I_{i,t} - \hat{I}_{i,t})^2 = \min \sum_i \sum_t (I_{i,t} - q_i N_{a_i,t})^2$$

où q représente la capturabilité et I les indices d'abondance relative associés aux âges a .

Lorsque l'on ne dispose pas d'information d'abondance relative associée à un âge particulier la dernière année, l'expérience montre qu'il est inutile de tenter d'estimer un F pour cet âge (les estimations ne sont généralement pas satisfaisantes car trop corrélées). ADAPT permet alors à l'utilisateur de forcer ces F qui ne sont pas directement estimés à être liés à d'autres F pour lesquels on dispose d'information, de

manière analogue aux F -ratios ci-dessus. Pour cela, ADAPT requiert en entrée un vecteur de sélectivité aux âges S et un vecteur $ref(a)$ spécifiant à quels âges sont liés les F :

$$F_{a,T} = \frac{S_a}{S_{ref(a)}} F_{ref(a),T}$$

Comme les groupes de travail de 1998 et 2002 à l'ICCAT, les sélectivités adoptées sont (Tab. C. 1) :

Tab. C. 1 : Sélectivités adoptées dans le modèle d'évaluation

a	ref(a)	S
1	2	0.6
2	2	1
3	2	1
4	4	1
5	4	1
6	4	1
7	4	1
8	8	1
9	8	1
10+	8	1

Les F terminaux des âges 2, 4 et 8 sont ainsi estimés directement. Les F terminaux des âges 1 et 3 sont posés égaux au F terminal de l'âge 2. Ceux des âges 5, 6, 7 sont posés égaux à celui de l'âge 4, ceux des âges 9 et 10+ égaux à celui de l'âge 8.

Limites et performances de la VPA

ADAPT est connu pour présenter deux problèmes récurrents : une sur-estimation des F terminaux ainsi qu'une mauvaise estimation des paramètres lorsque la pression de mortalité ($F+M$) sur la population est faible. Avant toute analyse, une première opération a donc consisté à tester les limites de la VPA.

- Méthodes

Trois premiers scénarios sont simulés pour apprécier le degré de fiabilité des estimations de la VPA pour différents niveaux de mortalité ($F+M$, Fig. C. 1). Dans les 3 cas, la mortalité par pêche F est posée relativement faible ($F \in [0,04 ; 0,33]$, $\bar{F} = 0,33$) et identique. En revanche, la mortalité naturelle diffère :

- scénario 1 : les mortalités naturelles posées comme paramètres dans le modèle de dynamique de population (M_{sim}) et dans la VPA (M_{vpa}) sont égales à M_{BFT} . La mortalité totale ($Z=F+M$) est alors relativement faible.

- scénario 2 : M_{sim} est égale à deux fois M_{BFT} alors que M_{vpa} est égale à M_{BFT} . La mortalité totale simulée ($Z=F+M_{sim}$) est alors importante mais le paramétrage de la VPA assigne une mortalité naturelle faible.

- scénario 3 : M_{sim} et M_{vpa} sont égales à deux fois M_{BFT} . La mortalité totale est importante et le paramétrage attribue l'augmentation de Z à l'augmentation de M .

- Résultats

Lorsque la pression de mortalité ($F+M$) sur la population est faible (scénario 1), les mortalités par pêche estimées par la VPA (F_{vpa}) sont légèrement supérieures aux mortalités par pêche simulées (F_{sim} , Fig. C. 1). La SSB estimée par la VPA est supérieure d'environ 10% à la SSB attendue. Ainsi, lorsque Z est faible, la VPA surestime la mortalité par pêche et la biomasse du stock. Lorsque la pression de mortalité sur la population est forte mais que $M_{vpa} = 0,5 M_{sim}$ (scénario 2), les mortalités par pêche estimées par la VPA apparaissent largement supérieures aux mortalités par pêche simulées : la VPA traduit logiquement l'augmentation de Z par un accroissement des F . La SSB est alors largement surestimée par la VPA ($SSB_{vpa}=2$ à $2,5 SSB_{sim}$, Fig. C. 1). Finalement, lorsque la pression de mortalité sur la population est importante et le paramétrage de la VPA conforme à celui de la simulation (scénario 3), les mortalités par pêche estimées sont très proches des F attendues et la SSB est estimée de manière satisfaisante (moins de 4 % d'erreur, Fig. C. 1). Ainsi, lorsque Z est significative, la VPA estime de manière fiable les mortalités par pêche et la SSB.

Par ailleurs, de légères erreurs d'estimation sont notables sur les F des dernières années (Fig. C. 1). Pour les diagnostics, les tendances plus que les dernières valeurs de F devront donc être prises en compte.

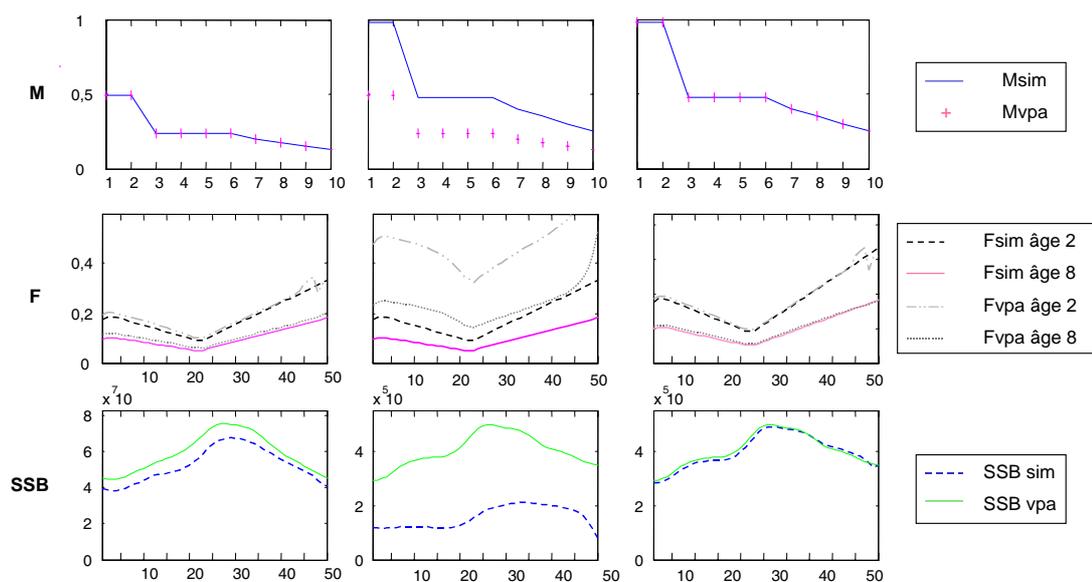


Fig. C. 1 : Influence du niveau de mortalité sur les estimations de la VPA

Graphes du haut : mortalité naturelle simulée et implémentée dans la VPA ;

Graphes du milieu : mortalités par pêche simulées et estimées par la VPA ;

Graphes du bas : biomasse du stock reproducteur simulée et estimée par la VPA.

Il apparaît ainsi que les estimations de la VPA sont fiables dès lors que Z est significative ($Z=2M$).

RESUME

L'objectif de ce travail est de collecter les captures historiques de thon rouge par les madragues méditerranéennes et proche atlantiques pour (i) caractériser les fluctuations à long terme (LT) de la population migrante en Méditerranée, (ii) étudier leur déterminisme et (iii) évaluer leurs implications en terme de gestion des pêcheries. 54 séries de plus de 20 ans, dont 3 s'étendent sur près de 4 siècles, sont validées. Les captures varient dans le temps suivant de larges cycles pseudo-séculaires, des variations périodiques d'une vingtaine d'années et des fluctuations inter-annuelles. On montre que les fluctuations à moyen et LT des captures, synchrones à l'échelle de l'étude, peuvent être considérées comme de bons indices des tendances des abondances de la population de thons rouges migrants en Méditerranée. Les fluctuations LT des captures n'apparaissent statistiquement pas liées à celles de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), ni à celles de la longueur du jour (LOD, un indicateur de l'indice de circulation atmosphérique ACI). En revanche, les fluctuations LT sont significativement et négativement corrélées à celles des températures, laissant supposer que des changements migratoires puissent en être à l'origine. Finalement, un cadre de simulation est élaboré pour tester les conséquences des fluctuations sur les évaluations de stock. Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des variations du recrutement, la VPA apparaît capable de reconstruire la dynamique de la population mais les prédictions sont biaisées lorsqu'il n'est pas tenu compte des fluctuations naturelles. Dans l'hypothèse de fluctuations liées à des changements migratoires, la VPA est incapable de reproduire la dynamique de la population. Dans une approche de précaution, les quotas qui en découlent peuvent se révéler au mieux inappropriés, au pire dangereux s'ils sont définis par rapport à un point de référence.

TITLE

Long-term fluctuations in bluefin tuna: validity, origins and consequences.

ABSTRACT

The goal of this work is to collect bluefin tuna catches from the ancestral Mediterranean and Atlantic trap fisheries to (i) characterise long-term fluctuations in bluefin tuna population migrating in the Mediterranean, (ii) analyse their determinism et (iii) assess their implications for fisheries management. 54 time-series more than 20 years long, among which 3 span about four centuries, are validated. Trap catches vary in time following 100-year-long periodic fluctuations, 20-year cycles and inter-annual variations. It is argued that the medium- to long-term fluctuations in trap catches, synchronous all around the western Mediterranean and adjacent North Atlantic, could be considered as a proxy for those in abundance. Long-term fluctuations in trap catches did not appear statistically linked to those in North Atlantic Oscillation (NAO), either to those in the Length of the Day index (LOD, a proxy of the atmospheric circulation index ACI). In contrary, they were negatively and significantly related to long-term trends in temperature, which leads to suppose that changes in migration patterns could be a possible underlying process. Finally, a simulation framework is built to test the consequences of such fluctuations on stock assessment. In the hypothesis of fluctuations linked to variations in the recruitment, VPA appears able to reconstruct the fluctuations but the predictions may be biased if natural fluctuations are not taking into account. In the hypothesis of fluctuations linked to changes in migration pattern, VPA is not able to reconstruct the population dynamics. In a precautionary approach, quotas which follow may be unsuitable in the best case, at worst dangerous if they are defined in comparison with a reference point.

DISCIPLINE

Halieutique

MOTS-CLEFS

Thunnus thynnus ; madrague ; Méditerranée ; Atlantique Est ; séries temporelles ; tendances à long terme ; fluctuations périodiques ; dynamique de population ; relation thon/environnement ; température ; NAO ; migration ; modèle global ; VPA ; points biologiques de référence ;

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

Laboratoire Ressources Halieutiques – IFREMER – Centre de Recherches Halieutiques Méditerranéen et Tropical – Avenue Jean Monnet – 34 200 Sète