# Approche acoustique de la dynamique et la distribution spatiale des ressources halieutiques de petits pélagiques dans l'upwelling sénégalo-mauritanien

Abdoulaye Sarré

▶ **To cite this version:**

Abdoulaye Sarré. Approche acoustique de la dynamique et la distribution spatiale des ressources halieutiques de petits pélagiques dans l'upwelling sénégalo-mauritanien. Sciences de la Terre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2017. Français. NNT : 2017BRES0062 . tel-01691658

**HAL Id: tel-01691658**
**https://theses.hal.science/tel-01691658**

Submitted on 24 Jan 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE SCIENCES
BRETAGNE DE LA MER
LOIRE ET DU LITTORAL

Thèse préparée à l'Université de Bretagne Occidentale

pour obtenir le diplôme de DOCTEUR délivré de façon partagée par
L'Université de Bretagne Occidentale et l'Université de Bretagne Loire

*Spécialité : Biologie Marine*

**École Doctorale Sciences de la Mer et du Littoral**

présentée par

Abdoulaye SARRE

# Approche acoustique de la dynamique et la distribution spatiale des ressources halieutiques de petits pélagiques dans l'upwelling sénégalo-mauritanien

**Thèse soutenue le 07 septembre 2017**

devant le jury composé de :

Luis Tito-de-Morais,

Chercheur, IRD, Directeur UMR Lemar de IUEM / examinateur

Jean Guillard

Docteur en sciences, INRA, CARRTEL / rapporteur

Reidar Toresen

Chercheur, IMR, Norvége / rapporteur

Hamet Diaw Diadhiou

Chercheur HDR, ISRA/CRODT, Sénégal / examinateur

Patrice Brehmer

Chercheur HDR, IRD, France / Directeur de thèse

UBO
Université de Bretagne Occidentale

**Dedicace**

**A Ibou, Madiop et Amy**

***Ce travail est pour vous…***

...

**Remerciements**

Sans aucune équivoque possible, ce travail ne verrait le jour sans l'appui de la Direction Générale de l'ISRA et de mon Directeur de thèse.

Je tiens donc en premier à remercier le Directeur Général de l'ISRA, Monsieur Aliou FALL pour avoir autorisé et soutenu ce travail, ainsi que le Directeur scientifique de l'ISRA, Monsieur El hadj Traoré. Un accent particulier au Secrétaire Général de l'ISRA, Monsieur Alassane Ndiaye ; Alassane, je n'oublierai jamais ton soutien, gage d'une amitié raffermie depuis les bancs de l'ESP. Que d'obstacles administratifs résolus de main de maitre durant cette thèse et principalement grâce à toi. Merci au Directeur du CRODT Massal Fall pour son soutien.

A mon Directeur de thèse Patrice Brehmer de l'IRD, je trouve difficilement les mots pour le remercier. Au-delà d'un simple appui, il s'est plutôt agi d'un acharnement, et sur tous les plans aussi bien scientifique, administratif que logistique. Sur le plan scientifique, un acharnement pour me faire produire un manuscrit irréprochable et des articles scientifiques de haute facture. Je ne saurais compter le nombre de weekends et de jours fériés que nous avons du passé ensemble pour y arriver. Sur le plan administratif, aucun effort n'a été ménagé de sa part pour résoudre avec moi la pléthore d'obstacles administratifs que cette thèse a pu générer, compte tenu du temps limité qui m'était assigné pour l'achever. Sur le plan logistique, il s'est encore acharné à trouver avec moi tous les moyens matériels pour réaliser notre aventure commune, souvent au prix de sacrifices personnels ! Patrice, encore merci ! Le compagnonnage vécu dans le cadre de cette thése restera indéniablement gravé dans ma mémoire.

Derrière Patrice, une équipe soudée, aimable, compétente et toujours disponible a été de cette aventure et m'a hautement soutenu : l'équipe acoustique de l'IRD de Brest ! D'abord Anne Lebourges-Dhaussy et Yannick Perrot avec qui j'ai passé des moments de labeur passionnants pour finaliser l'outil Matecho. Je continue à admirer la clairvoyance technique de Yannick toujours apte à trouver la solution devant les multitudes de bugs générés par des situations aussi diverses que compliquées compte tenu du nombre énorme de campagnes à éplucher, du mono au multifréquencielle, du BI500 au RAW, du pélagique à l'ecosystémique. Bravo Yannick et merci encore pour tout ! Je continue à louer la grande maitrise de l'acoustique par Anne dont les nombreux conseils et orientations durant cette thèse m'ont été d'un secours inestimable. Il est dommage Anne que le temps n'ait pas permis d'approfondir un sujet aussi intéressant que la discrimination multifréquencielle des groupes fonctionnels dans l'espace CCLME, car ton apport serait incontournable, ce n'est que partie remise. Toujours dans cette équipe de choc à Brest, Gildas Roudaut et Nolwenn Behagle pour qui cette thèse était finalement devenue un challenge à parachever avec succès et surtout dans le temps. A mon arrivée à Brest en mai 2017, il fallait finaliser les analyses, terminer la rédaction du manuscrit, le réviser en profondeur, le tirer proprement en plusieurs exemplaires et l'envoyer d'urgence aux rapporteurs… et tout ceci en un mois ! Cela a été possible grâce à vous, chapeau ! Encore Merci Gildas, encore merci Nolwenn.

Dans cette équipe de Brest, je voudrais confondre dans mes remerciements Jérémie Habasque, Christelle Guenneguez, François Baurand, Dominique Lopez, Daniel Corre, Denis Diverres, Fabrice Roubaud, Jacques Grelet et Yves Gouriou. Mes pensées vont également au jeune informaticien Cédric. En ce début de semaine du mois de juillet, quelles ne furent ma surprise et ma peine d'apprendre que le serviable Cédric, qui s'inquiétait tant pour moi à cause d'une machine moribonde que je trainais pour faire une thèse, nous avait quitté pour toujours durant le weekend. Cédric, repose en paix !

L'hospitalité bretonne ! On ne peut l'occulter dans ces lignes de remerciements. On connaissait la téranga* sénégalaise, à Brest j'ai découvert la téranga bretonne. D'abord avec Anne qui m'a tiré de la solitude de la résidence ARPEJ pour me faire profiter de son logement à Brest. Merci encore Anne, Philippe, Mathilde et Meylan. Ensuite des gens exceptionnels, vivant une contrée exceptionnelle, avec une téranga exceptionnelle, je veux parler de Lampaul Plouarzel ! La famille Roudaut qui m'a fait découvrir les plaisirs de la godille et de la vie paisible à Lampaul. Encore merci Gildas, Mathilde, Paol et Félix (l'artiste) sans oublier leurs amis Gwen et Thierry. Toujours à Lampaul, une chaleur remarquable rencontrée au sein de la famille Baurand ; François, l'envi me revient encore de parcourir avec toi à pied le long sentier bordant la côte de Lampaul, humer l'air frais emporté depuis l'ile de Ouessant. Transmets mes remerciements à Natanael et Doriane. A toute la communauté qui vit à Lampaul je dis sincèrement Trugarez !

Tous mes remerciements à Monsieur Luis Tito de Morais pour avoir accepter de présider mon jury de thése mais surtout pour avoir consacrer de son temps précieux à la correction de mon manuscrit. Merci encore Luis. A mes rapporteurs, Jean Guillard et Reidar Toresen j'exprime toute ma reconnaissance. Malgré leurs nombreuses responsabilités, ils ont accepté d'évaluer ce travail de thèse. Merci Jean, Thanks a lot Mr Reidar. C'est ici pour moi l'occasion de réitérer ma gratitude à Mr Reidar qui fut parmi mes maitres dans l'évaluation des stocks. Par ailleurs, je suis ravi que Hamet Diaw Diadhiou ait accepté de prendre part à mon jury de thèse. Hamet dieureudieuf encore pour ton amitié, ton ouverture et tes témoignages qui résonnent encore en moi telle une invite à toujours dépasser mes limites. Merci à Alassane Samba pour son appui.

A Monsieur Fred Jean, le Directeur de l'école doctorale, j'adresse toute ma reconnaissance. De part votre clairvoyance, j'ai su assez très vite choisir la meilleure orientation pour aborder et finaliser cette thèse. Merci pour votre générosité. Sans oublier dans votre secrétariat, l'aimable, efficace et compréhensive Elisabeth Bondu.

Cette thèse a été financée en grande partie par le projet Préface et l'IRD. Je tiens à les remercier vivement. Une touche spéciale pour le Professeur Noel Keenlyside Coordonnateur de PREFACE qui est allé jusqu'à mettre la main dans la pâte en contribuant remarquablement dans un des papiers de cette thèse. J'associe à ces remerciements la gentille Mahaut. Merci de tout cœur également à Christelle Guenneguez et Sonia de l'IRD pour avoir trouvé à chaque fois qu'il le fallait la solution la plus appropriée devant les obstacles administratifs qui se sont dressés.

Je salue encore la patience, l'abnégation et la compétence d'une personne qui s'est investie sans ménage dans cette entreprise, à mes cotés avec Patrice. Je veux nommer Hervé Demarcq, l'infatigable et généreux Hervé. Toujours disponible pour discuter et explorer avec moi l'océan dans toutes ses profondeurs, le satellite dans toutes ses orbites. Merci encore Hervé.

A mes amis du Planning Acoustic Group Salah, Ahmed, Najib, Ebou, Ahmedou, Merete sans oublier Chbani et Ebaye, je dis encore merci pour vos encouragements durant ce parcours. Ce travail est quelque part le votre, l'aboutissement d'un long compagnonnage dans l'acoustique, l'apothéose d'un travail régional dans l'unisson et la persévérance. Une marque spéciale pour Jens-Otto Kradstad toujours disponible, toujours prêt à apporter sa contribution. Thanks a lot Jens.

Aux amis de « Mon Case » qui se reconnaitront et qui ont toujours cru en moi, la liste est longue, je dis merci pour votre soutien sans faille. Une pensée pieuse pour Ibra Sokhna Ndiaye, Aliou Ba et Malick Diallo arrachés trop tôt à notre affection.

Je tenais spécialement à réserver les dernières lignes de reconnaissance à ma seconde famille, le personnel du CRODT à qui je réitère toute ma gratitude. Vos prières et conseils m'ont accompagné tout au long de cette entreprise et je ne pourrais vous remercier assez. A vous tous, Djiga, Cheikh, Lim, Diabel, Anis, Mor, Ndeye, Kankou, Nabou, Raky, Simone, Fatou, Aicha, Fambaye, Rama, Cathy, Ndiaga, Adama, Modou(s), Jean, Omar, Tam, Saliou, à tous et à toutes je dis dieureudieuf.

Merci du fond du cœur à mes neveux (rires) Moustapha Déme et Saliou Niang: votre appui moral a beaucoup impacté la trajectoire prise par cette thése.

Enfin ma famille qui m'a aidé, encouragé et soutenu sous toutes les formes. A ma mère Seynabou, a mon défunt pére Baye Taiba, mes frères et sœurs, mon épouse Khady, mes enfants Amy, Madiop et Ibou. A mes neveux et 'goros' Younouss, Omar, Serigne, Elaj et Pape, sans oublier Ngoor Pape Moussa, un très grand merci. Je suis fier d'appartenir à cette famille d'exception…

….. du fond du cœur

**Résumé**

Le long des côtes nord-ouest africaines, la fourniture pour les populations locales en poisson est importante tant du point de vue socio-économique que culturel. Dans cette région, dont les eaux sont reconnues pour être parmi les plus riches au monde, les petits poissons pélagiques côtiers constituent les ressources marines les plus importantes. Ces ressources sont suivies au niveau régional en s'appuyant sur les méthodes hydroacoustiques d'évaluation de stocks. La région a été le champ d'une multitude de campagnes de prospection acoustique depuis plusieurs décennies, en particulier depuis les années 70 au Sénégal. Ces campagnes ont ainsi permis de fournir aux autorités locales une base scientifique solide en matière de prise de décision à des fins d'aménagement des pêcheries pélagiques mais aussi afin de mettre à disposition des expertises fiables lors des négociations d'accords de pêche avec les partenaires étrangers. Ces évaluations sont encadrées au niveau régional par la FAO des nations unies à travers un « Acoustic Planning Group » pour trouver ensemble des réponses aux nombreux défis que pose l'utilisation de cet outil. Parmi ces défis, la représentativité de ces campagnes de prospection acoustique par rapport aux stocks ciblés. Dans ce travail de thèse, une contribution est faite à ce propos pour la zone sénégalaise où notre étude rassure sur cette représentativité sur la couverture spécifique de Sardinella aurita par les campagnes classiques d'écho prospection. Par contre d'autres types de campagnes ou outils sont nécessaires pour prendre en compte l'ensemble des stocks de plusieurs autres petits pélagiques dont la S. maderensis.

Par ailleurs, les pêcheurs de par leurs expériences empiriques interpellent les scientifiques sur les changements dans la répartition des espèces de poissons clés pour la sécurité alimentaire. Nous reportons dans ce travail des déplacements vers le nord du Grand Ecosystème Marin du Courant des Canaries dans la répartition des sardinelles, déplacements attribués à un changement environnemental et à la redistribution de l'intensité et de la productivité des upwellings, diminuant ainsi l'abondance de la sardinelle dans la région côtière intertropicale et l'augmentant dans la région sous-tropicale. Pour la première fois en utilisant des séries chronologiques d'observation indépendantes à la méso-échelle, nous montrons un changement robuste vers le nord dans la distribution de S. aurita depuis 1995 et l'attribuons au fort réchauffement de l'océan dans la région Nous reportons en effet que ce réchauffement correspond à la plus forte augmentation de la température de la surface de la mer de toutes les régions tropicales du monde. De plus les changements spatiaux observés dans la biomasse de S. aurita sur plusieurs centaines de kilomètres au cours des 20 dernières années sont du même ordre de grandeur que ceux enregistrés pour les isothermes de surface dans l'habitat pélagique sous-régional de la sardinelle. De tels changements auront une incidence sur les considérations politiques dans la gestion de la sécurité alimentaire dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest et devraient être pris en considération en ce qui concerne les plans d'adaptation aux changements climatiques. En termes de perspectives, ces changements sur la ressource sont mis en parallèle avec l'évolution du compartiment micronectonique. Enfin nous préconisons dans le futur de prendre en considération les zones de faible profondeur pour les évaluations de stock dans la région nord ouest africaine en particulier lorsque que le plateau continental est large comme au Sud du Sénégal pour des espèces telles que S. maderensis.

**Abstract**

Along the coast of North-West Africa, fish supply is important at both socio-economic and cultural levels. In this region which is known to have waters among the richest over the word, the small pelagic fish are the most abundant marine resources. These resources are monitored using hydoacoustic stock assessment methods. The region had been the field of numerous acoustic surveys since several decades, specifically since 1973 in Senegal. These surveys have allowed providing to local authorities a sound scientific basis for deciding about the management of pelagic fisheries but also providing relevant expertise for negotiations of fishing agreements with foreign partners. These acoustic assessment surveys are coordinated at regional level by FAO (United Netions) within the « Acoustic Planning Group » to find together answers to the several challenges relate to the use of hydroacoustic tool. A specific challenge is to know the representativity of these surveys versus the stocks targeted. In this work, we confirm this representativity for Sardinella aurita stock while for S. maderensis and other pegaic species, conventional acoustic surveys cannot cover the whole stock

Furthermore, reports by fishermen emphasize changes in the distribution of food security key fish species. Northward shifts in the distribution of sardinella in the Canary Current Large Marine Ecosystem are recorded in this work and have been attributed to a northward environmental shift and the redistribution of upwelling intensity and productivity, resulting in the abundance of sardinella decreasing in the intertropical coastal region and increasing in the sub-tropical one. Here for the first time using independent observational time series, we report a robust northward shift in S. aurita since 1995 and attribute it to the strong ocean warming in the region, with the highest increase in sea surface temperature of all tropical regions worldwide. The observed spatial shifts in biomass that occurred over several hundred kilometers in the last 20 years are of the same order of magnitude as those recorded for surface isotherms in the sub-regional pelagic habitat of sardinella. Such changes will impact policy considerations in the management of food security in several West African countries and should be considered with respect to “Intended Nationally Determined Contributions”. In terms of perspectives, these changes on the resource are compared with the changes in the micronektonic compartment. Finally we recommend in the future for the stock assessments in the North West Africa (NWA), to consider the shallow depth areas specifically when the continental shelf is wide as in the South of Senegal, for species such as S. maderensis.

...

**Liste des acronymes et abréviations :**

| | |
|---|---|
| **ADCP** | Acoustic Doppler Current Profiler |
| **ANACIM** | Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie |
| **AWA** | Ecosystem Approach ti the management of fisheries and the marine environment in West African waters |
| **CCLME** | Canary Current Large Marine Ecosystem |
| **CCMP** | Cross-Calibrated Multi-Platform |
| **CNRS** | Centre National de la Recherche Scientifique |
| **COPACE** | Comité des pêches pour l'Atlantique Centre-Est |
| CPUE | Prise par unité d'effort |
| **CRODT** | Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye |
| **CSRP** | Commission Sous Regionale des Pêches |
| **DFN** | Dr Fridtjof Nansen |
| **DPSP** | Direction de la Protection et de la Surveillance des Pêches |
| **EAMME** | Ecosystemic Approach of Management of Marine Environment |
| **FAO** | Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| **FCFA** | Franc de la communauté financière africaine |
| **IFREMER** | Institut Français pour l'Exploitation de la Mer |
| **IMR** | Institute of Marine Research, Norvége |
| **INDP** | Institut National pour le Développement des Pêches, Cap Vert |
| **INIP** | Instituto Nacional de Inspecção do Pescado, Angola |
| **INRH** | Institut National de Recherches Halieutiques, Maroc |
| **IOW** | Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde, Allemagne |
| **IRD** | Institut de Recherche pour le Développement, France |
| **ISRA** | Institut Sénégalais de Recherches Agricoles |
| **IUPA** | Institut Universitaire de Pêche et d'Aquaculture |
| **LME** | Large Marine Ecosystem |
| **MFMR** | Ministry of Fisheries and Marine Resources, Namibie |
| **NCC** | Nature Climate Change |
| **N/O** | Navire Océanographique |
| **NORAD** | Norwegian Agency for Development |
| **NWA** | North West Africa |
| **PREFACE** | Enhancing PREdiction oF Tropical Atlantic ClimatE & its impact |
| **SIMFAMI** | Species Identification Method From Acoustic Multifrequency Information |
| **SST** | Température de surface de l'eau |
| **TAPS** | Tracor Acoustic Profiler System |
| **UCAD** | Université Cheikh Anta DIOP de Dakar |
| **UE** | Union Européenne |
| **UAC** | Université d'Abomey-Calavi, Bénin |
| **WWF** | Organisation Internationale de Conservation de la Nature |
| **ZEE** | Zone Economique Exclusive |

**Sommaire**

Résumé ..... 7
Abstract ..... 8
Sommaire ..... 10
Liste des Tableaux ..... 13
Listes des Figures ..... 14
Avant propos ..... 18
1 Chapitre I : Contexte général ..... 26
1.1 Importance des petits pélagiques en Afrique de l'Ouest ..... 26
1.2 Contexte bio-écologique et habitats des petits pélagiques ..... 28
1.2.1 Topographie de la région nord-ouest africaine ..... 28
1.2.2 Géomorphologie du plateau continental sénégalais ..... 29
1.2.3 Hydrologie du plateau continental ..... 31
1.2.4 Caractéristiques du milieu estuarien ..... 35
1.2.5 Evolution des facteurs environnementaux ..... 37
1.2.6 bio-écologie des sardinelles de la zone nord-ouest africaine ..... 47
1.3. Suivi des stocks de petits pélagiques en Afrique occidentale : historique des campagnes hydroacoustiques et développements récents ..... 50
1.3.1. L'outil acoustique comme moyen de suivi des stocks de poissons pélagiques ..... 50
1.3.2. Historique des campagnes hydroacoustiques au Sénégal ..... 59
1.3.3. Harmonisation des resultats acoustiques issus des navires de la région ..... 64
1.3.3.1. Les intercalibrations de navires d'évaluation de stock en Afrique du Nord Ouest 65
1.3.3.2. L'intercalibration de 2015 entre les navires Fridtjof Nansen et Itaf Deme ..... 65
1.3.3.3. L'harmonisation dans l'interprétation des échogrammes ..... 67
1.4. Conclusion ..... 71
2. Chapitre 2 : Dynamique et distribution spatiale des ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest et évulation direct par acoustique ..... 74
2.1. Répartition et schémas migratoires des deux sardinelles ..... 74
2.1.1. Schémas migratoires de Sardinella aurita ..... 74
2.1.2. Schémas migratoires de Sardinella maderensis ..... 77
2.2. Les ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest, potentialités, pêcheries et exploitation ..... 78
2.2.1. Flottilles en œuvre du Maroc au Senegal ..... 79
2.2.2. Débarquements ..... 80
2.3. Dynamique des pêcheries de sardinelles au Sénégal ..... 83
2.3.1. Effort de pêche des flottilles ciblant les sardinelles ..... 83

2.3.2. Evolution des débarquements de sardinelles ..... 86
2.3.3. Indicateurs de l'état d'exploitation des sardinelles ..... 90
2.4. Evaluation des stocks de petits pélagiques par acoustique ..... 96
2.4.1. Calcul des biomasses lors des campagnes du N/O Itaf Déme et du N/O Fridtjof Nansen 96
2.4.2. Variabilité spatiale et temporelle de la biomasse de petits pélagiques en Afrique de l'Ouest 98
2.5. Améliorations nécessaires sur les évaluations par campagnes acoustiques ..... 107
2.5.1. Comparabilité des résultats de campagnes acoustiques dans la région ..... 107
2.5.2. Incertitudes sur les valeurs de TS (Target Strength) utilisées ..... 108
2.5.2.1. Tentatives de réactualisation du TS en 2007 à Nouadibou ..... 108
2.5.2.2. Tentatives de réactualisation du TS en 2015 au Maroc ..... 109
2.5.3. Représentativité des campagnes acoustiques par rapport aux stocks ciblés ..... 110
2.5.3.1. Contexte ..... 110
2.5.3.2. Spatial distribution of main clupeid species in relation to acoustic assessment surveys in the continental shelves of Senegal and The Gambia ..... 110
2.6. Conclusion ..... 123
3. Chapitre 3. Impact du changement climatique sur la distribution des petits pélagiques en Afrique de l'Ouest ..... 126
3.1. Contexte de l'étude ..... 126
3.2. Intense warming causes a spatial shift of small pelagic fish: early warning for food security in North-West Africa ..... 126
3.3. Déplacement du barycentre des biomasses de sardinelles depuis 1995. ..... 146
3.4. Les observations supplémentaires du décalage latitudinal de la sardinelle ronde ..... 146
3.4.1. Résultats des campagnes acoustiques du navire marocain ..... 147
3.4.2. Evolution des captures de sardinelles de la flotte russe au Maroc : ..... 147
3.4.3. Changement de comportement des pêcheurs sénégalais ..... 148
3.5. Conclusions ..... 149
4. Conclusion générale, discussions et perspectives d'études ..... 154
4.1. Rappel d'éléments de contexte ..... 154
4.2. Conclusion générale, discussions et apports de cette thèse ..... 154
4.3. Perspectives d'étude sur la variabilité du micronecton ..... 159
4.3.1. Introduction : Les couches diffusantes ..... 159
4.3.2. Méthodes ..... 160
4.3.2.1. Compilation des données disponibles ..... 160
4.3.2.2. Outil de traitement ..... 161
4.3.3. Résultats ..... 162
4.4. Perspectives générales d'études ..... 164

5. Liste des références bibliographiques ..... 168
6. Annexes ..... 183
6.1. Réglage du sondeur Simrad EK500 durant les campagnes à bord du N/O Fridtjof Nansen ..... 183
6.2. Articles antérieurs de l'auteur ..... 184
6.2.1. Towards coordinated acoustic surveys in North West Africa: Results of Parallel surveys and Intercalibrations ..... 184
6.2.2. Contribution to acoustic targets identification in Northwest Africa by statistical schools properties ..... 215

**Liste des Tableaux**

Tableau 1-1 Biomasses estimées aux cours des campagnes du 'RV Dr Fridtjof Nansen' sur le plateau continental Sénégal - Gambie en milliers de tonnes de 1981 à 2015. ..... 28
Tableau 1-2 Liste des paramètres Echoview collectés et liés aux espèces cibles observées sur les echogrammes. ..... 68
Tableau 2-1 Allocation des valeurs $s_A$ aux grands groupes. ..... 97
Tableau 2-2 : Tailles modales rencontrées par le N/O F. Nansen au Sénégal de 1995 à 2006 pour Sardinella maderensis. ..... 103
Tableau 4.3.2.1-1 Récapitulatif des données de campagnes hydroacoustiques disponibles. 160
Tableau 4.3.3-1 valeurs moyennes sA ($m^2$ $nm^{-2}$) par zone et par année. ..... 162

**Listes des Figures**

Figure 1-1 La zone d'étude : Espace du grand écosystème du Courant de Canaries « CCLME » en Afrique de l'ouest (à gauche) et la carte marine du Sénégal, isobath de 10 à 1000 mètres (à droite) (Anonyme, 2006) ..... 27
Figure 1-2 Géomorphologie du plateau continental sénégalais, Source : Domain (1980)..... 30
Figure 1-3 Types des fonds marins de la région du CCLME (Source FAO, 2015) ..... 31
Figure 1-4 (gauche) Schéma conceptuel d'un upwelling (remontée d'eau profonde) côtier sous l'influence du vent (wind) et de la rotation de la terre (source: nwfsc.noaa.gov/). (droite) climatologie de la température de surface de la mer (SST Modis. Echelle de couleur en degrés Celsius) de février à avril sur le Sud Sénégal (Ndoye et al., 2017), l'upwelling (résurgence d'eau marquée à 17-19°C) est clairement visible et très caractéristique de notre zone d'étude. ..... 32
Figure 1-5 Zones d'upwelling côtier en atlantique nord-est africain. Source : (Roy et al, 1992)..... 34
Figure 1-6 Température moyenne de l'air dans trois stations météorologiques.(Source : Direction de la Météorologie Nationale)..... 37
Figure 1-7. Evolution des SST au Sénégal et dans la région NWA (Diop et al, 2016)..... 38
Figure 1-8 : Température moyenne de l'eau de mer dans quatre stations côtières..... 39
Figure 1-9 Evolution des SST sur les côtes nord-ouest africaines (gauche) subdivisées en cinq zones d'études (droite), à 100 et 200 km de la côte, entre janvier 1982 et janvier 2010. ..... 39
Figure 1-10 Anomalies de températures SST au niveau mondial sur la période 1982-2015 (1982-2011: AVHRR data, 1912-2015: MODIS data) avec la valeur 0.5°C décade iso-contourée au niveau de la région d'étude..... 40
Figure 1-11 Changements intervenus dans la configuration des isothermes depuis les années 1980. ..... 40
Figure 1-12 Pluviométrie moyenne dans trois stations météorologiques de 1950 à 2000. (Source : Dir. Nat.Météo.)..... 41
Figure 1-13 Evolution spatio-temporelle des isohyètes au Sénégal de 1940 à 1994. Source : Niang-Diop et al., 2005. ..... 42
Figure 1-14 : Salinité moyenne de l'eau de mer dans quatre stations côtières. (Source :CRODT, 2006)..... 43
Figure 1-15 Vitesse moyenne du vent dans trois stations météorologiques. Source : Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal..... 43
Figure 1-16 Evolution de la vitesse du vent observée de 1981 à 2010 (a) Source : Sambou et al., (2012) et de 2010 à 2015 (b). Source : (Diop et al, 2016). ..... 44
Figure 1-17 Evolution de la composante méridienne de la vitesse du vent le long des côtes de l'Afrique du Nord-Ouest moyennée mensuellement (moyennes mobiles sur 13-termes) à partir des données composites du satellite CCMP.(Sarre et al, In process). ..... 45
Figure 1-18 Saisonnalité de l'upwelling dans les côtes sénégalaises (Roy et al, 1992). ..... 45
Figure 1-19 Indice d'upwelling côtier au niveau des côtes sénégalaises. (Sambou et al., 2012) ..... 46
Figure 1-20 Augmentation moyenne du niveau de la mer sur la Petite côte au Sénégal de 1981 à 2010. (Source : Sambou et al., 2012) ..... 47
Figure 1-21 Evolution du la chlorophylle-a à partir des données spatiales SeaWiFS et des données corrigées du satelitte MODIS Aqua. (Sarre et al, In process). ..... 47
Figure 1-22 Sardinella aurita (en haut) et Sardinella maderensis (en bas) (Photos CRODT). ..... 48

Figure 1-23 Illustration de l'intercalibration entre deux navires (Source :MacLennan and Simmonds, 1992)..... 56
Figure 1-24 : Parcours des navires durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015..... 65
Figure 1-25 : Valeurs d'intégration $S_A$ des deux navires durant l'intercalibration entre le N/ODFN et le N/O Itaf Deme en octobre 2015..... 66
Figure 1-26: Correlation entre les des deux navires durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015..... 66
Figure 1-27 : Valeurs d'intégration $S_A$ des deux navires, avec valeurs extrèmes excluses, durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015. ..... 66
Figure 1-28 : Corrélation entre les des deux navires durant l'intercalibration entre le DFN et le RV Itaf Dème en octobre 2015, avec les valeurs extrêmes des $S_A$ exclues. ..... 67
Figure 1-29 Kurtosis et skewness de quelques distributions. ..... 68
Figure 1-30 Bancs typiques de chinchard noirs (Trachurus trecae), proche du fond (echo rougeatres) entre 50 et 100 m de fond, au Sénégal. ..... 70
Figure 1-31 Analyse en Composante Principale PCA: Projection des descripteurs statistiques (a) et des echogrammes (b) sur le plan factoriel F1XF2. ..... 70
Figure 2-1 Distribution géographique de S. aurita (zone rouge) Source : www.Fisbase.org. 74
Figure 2-2 Migrations (10°N à 24°N) saisonnières des petits pélagiques (Sardinella aurita, Trachurus trachurus, Trachurus trcae, et Decapturus ronchus) d'après Boëly (1979) ; Fréon (1988a) et Pauly (1993). ..... 76
Figure 2-3 Cycle migratoire d'adultes de Sardinella aurita dans le sud du CCLME. ..... 76
Figure 2-4 Répartition géographique de la Sardinella maderensis (Lignes rouges), Source : www.Fisbase.org. ..... 77
Figure 2-5 Cycle migratoire de Sardinella maderensis (d'après Fréon, 1986). ..... 78
Figure 2-6 Captures au Sénégal par espèces et par année (en tonnes) de 1990 à 2014 (FAO, 2015)..... 81
Figure 2-7 Captures dans la région, par espèces (sardine exclue) et par année (en tonnes) de 1990 à 2014 (FAO, 2015)..... 83
Figure 2-8: Nombre d'unités de pêche artisanale selon l'engin de pêche (Source : Thiao, 2012)..... 84
Figure 2-9 : Effort de pêche artisanale selon l'engin de pêche. (Source : Thiao, 2012). ..... 85
Figure 2-10 : Nombre de bateaux sardiniers opérationnels. Source : Thiao, 2012. ..... 86
Figure 2-11 : Importance des sardinelles dans la pêche artisanale. Source : Thiao, 2012. ..... 87
Figure 2-12 : Relation entre les captures des deux espèces de sardinelle. Source : Thiao, 2012. ..... 87
Figure 2-13 : Importance des sardinelles dans la pêche industrielle. (Source CRODT 2011).88
Figure 2-14 : Débarquements de sardinelle ronde selon le centre de pêche. Source : Thiao, 2012. ..... 89
Figure 2-15 : Débarquements de sardinelle plate selon le centre de pêche. Source : Thiao, 2012. ..... 90
Figure 2-16 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde (Sardinella aurita) dans la zone sénégalaise et pour la pêche artisanale depuis 1990 (Sarré, 2012)..... 90
Figure 2-17 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde Sardinella aurita dans la zone sénégalaise et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012). ..... 91
Figure 2-18 : Evolution des indices d'abondance des sardinelles en Mauritanie pour la pêche industrielle depuis 1996 (Sarré, 2012). ..... 92

Figure 2-19 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde Sardinella aurita dans la zone marocaine et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012). ..... 92
Figure 2-20 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone sénégalaise et pour la pêche artisanale depuis 1990 (Sarré, 2012). ..... 93
Figure 2-21 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone sénégalaise et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012). ..... 93
Figure 2-22 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone marocaine et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012). ..... 94
Figure 2-23 : Evolution de la taille moyenne (longueur totale) de la sardinelle ronde par centre (1981-2010) (Thiao, 2012). ..... 95
Figure 2-24 : Evolution de la taille moyenne (longueur totale) de la sardinelle plate par centre (1981-2010) (Thiao, 2012). ..... 95
Figure 2-25 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone sénégambienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2015 (Sarré, 2012). ..... 99
Figure 2-26 : Occurrence des tailles modales de S. aurita en zone sénégambienne de 1995 à 2006 (TL en cm) (Sarré, 2012). ..... 99
Figure 2-27 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone mauritanienne par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012). ..... 100
Figure 2-28 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone sénégalaise par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008 (Sarré, 2012). ..... 100
Figure 2-29 : Evolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010. (Sarré, 2012). ..... 101
Figure 2-30 : Evolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 101
Figure 2-31 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone marocaine par le N/O Fridtjof de 1995 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 102
Figure 2-32 : Evolution des biomasses de sardinelles estimées par le N/O Al Amir de 2007 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 102
Figure 2-33 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone sénégambienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012). ..... 103
Figure 2-34 : Occurrence des tailles modales de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006 (TL en cm) (Sarré, 2012). ..... 103
Figure 2-35 : Evolution des structures de tailles de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006, Vue agrandie des adultes en présence. (Sarré, 2012). ..... 105
Figure 2-36 : Evolution des structures de tailles de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006, Vue agrandie des juvéniles en présence (Sarré, 2012). ..... 105
Figure 2-37 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone sénégalaise par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008. (Sarré, 2012). ..... 105
Figure 2-38 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone mauritanienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012). ..... 106
Figure 2-39 : Evolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 106
Figure 2-40 : Evolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 107
Figure 2-41 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone marocaine par le N/O Fridtjof de 1995 à 2010 (Sarré, 2012). ..... 107
Figure 3.3-1 Shifts des barycentres de 1995 à 2015. ..... 146

Figure 3.4.1-1 Carte de distribution des sardinelles durant la campagne d'évaluation acoustique du navire marocain R.V. ''Al Amir Moulay Abdallah'' en septembre 2015. ..... 147
Figure 3.4.2-1 Captures des flottes russes et ukrainiennes aux Maroc depuis 2005 ..... 148
Figure 3.4.3-1 Evolution des rendements de pêche (cpue) des sardinelles dans toute la zone. ..... 148
Figure 4.3.1-1Couche diffusante obervée durant la campagne 2011 du Fritdjof Nansen (lat10°26 N)..... 159
Figure 4.3.3-1 Distribution relative du micronecton sur la région pour les années 1995, 1996, 1997, 1999, 2002 et 2015, Pour une année donnée, le diamètre des cercles dans une région donnée indique l'abondance relative du micronecton dans cette région par rapport aux autres. ..... 163
Figure 4.3.3-2 Shifts des barycentres (en bleu ; courbe de tendance en jaune) du micronecton de 1995 à 2015. ..... 163

**Avant propos**

En réceptionnant le navire NO Itaf Dème en 2000 avec un équipement Simrad EK60 flambant neuf pour les évaluations des ressources pélagiques du Sénégal par procédés hydroacoustiques, c'était une nouvelle aventure mais aussi un nouveau challenge qui s'ouvraient pour moi, étant le seul dans mon pays à avoir embrassé cette discipline sophistiquée mais combien passionnante de l'échointegration, défi à relever car les autorités ont besoin de connaitre et de suivre régulièrement l'état des ressources pélagiques sur le plateau continental sénégalais et l'outil acoustique est incontournable pour une telle problématique. Très vite les résultats ont été prometteurs pour la prise en charge effective des évaluations de petits pélagiques au Sénégal, et ceci grâce à la conjugaison d'un ensemble de facteurs stimulants ayant balisé mon parcours. D'abord, la chance d'avoir côtoyé et travaillé avec des spécialistes de renom dans l'acoustique tels que Emile Marchal de l'IRD dont je retiendrai la rigueur scientifique, l'endurance et la tendance à 'douter de tout ', Egil Ona (IMR, Norvège) qui a guidé mes premiers pas dans les mesures complexes des index de réflexion des poissons, mais surtout les acousticiens du RV Fridtjof Nansen, Reidar Toresen (IMR, Norvège) et Jens Otto Krakstad (IMR, Norvège) qui ont failli m'embarquer déjà en 2007 dans une thèse à Bergen si le Norad (Norwegian Agency for Development) avait accepté de me financer, vœux non exaucé simplement parce que les ressortissants francophones ne sont pas éligibles pour cet organisme de financement. Ensuite la chance d'avoir rencontré dans la région nord-ouest africaine un groupe confronté aux mêmes problèmes en acoustique et dont j'ai été le Chairman durant plusieurs années sous la tutelle de la FAO, cadre enrichissant où toutes les problématiques liées à la recherche par l'acoustique ont été débattues annuellement au sein du Planning Group Acoustique NWA (Nord West Africa) avec notamment des investigations sur le terrain telles que les tentatives de réactualisation, à bord du navire mauritanien Al Awam, de la valeur du TS (Target Strenght) de la sardinelle utilisé dans les évaluations en Afrique de l'Ouest. Enfin et surtout une passion que j'ai cultivée et entretenue tout au long de ces deux dernières décennies à travers des forums, réunions scientifiques, formations complémentaires en acoustique sous-marine mais aussi la grande opportunité d'avoir été désigné comme chef de mission lors d'une trentaine de campagnes scientifiques d'évaluation des ressources halieutiques nationales ou internationales depuis le Sénégal jusqu'au Golfe de Guinée (11 au Sénégal, 3 en Guinée-Bissau, 1 en Guinée-Conakry, 6 en Sierra Léone, 1 en Côte d'Ivoire, 1 au Ghana, 1 au Bénin, 1 au Togo, 1 en Mauritanie et 3 en Gambie) avec le navire sénégalais NO Itaf Déme ; ce processus enrichissant m'a conféré tout naturellement une expérience remarquée au niveau régional et m'a ainsi conduit à être sollicité par l'UEMOA (Union Economique Monétaire Ouest Africaine) pour transférer les connaissances acquises dans l'évaluation des petits pélagiques par méthodes hydroacoustiques aux chercheurs du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Ghana, Bénin, Togo) à travers des séances de formation que j'ai animées en juillet 2012 dans chacun de ces pays.

Le déclic qui a alors été à l'origine de cette thèse fut l'arrivée au CRODT de deux grands projets internationaux orientés vers la gestion des ressources marines en Atlantique Tropical et en Afrique de l'Ouest respectivement, le projet PREFACE (Enhancing PREdiction oF Tropical Atlantic ClimatE & its impact) coordonné par le Pr Noel Keenlyside (UiB).et le projet AWA (Ecosystem Approach to the management of fisheries and the marine environment in West African waters) coordonné par le Dr Patrice Brehmer et Gerd Kraus. Les problématiques soulevées dans ces projets trouvaient partiellement des réponses par le biais des séries acoustiques consistantes que j'ai pu collectées tout au long de mon parcours et c'est avec enthousiasme que j'ai accepté d'y participer par le biais de cette thèse.

En effet, le projet PREFACE se propose à travers le Work Package 12 (WP12) d'identifier les effets des pressions environnementales et anthropogéniques sur les composantes clés des écosystèmes pélagiques et des pêcheries en zone tropicale de l'Afrique du Nord en impliquant l'ensemble des partenaires de la sous-région à savoir CRO, IMR, INDP, INIP, INRH, IOW, IRD,ISRA, MFMR, UAC, UCT, v-TI. Le projet se propose d'examiner les relations entre la distribution du macrozooplancton sur diverses échelles spatiales et les paramètres environnementaux, essentiellement à partir d'une analyse comparée des 3 Large Marine Ecosystem (LME) africains de l'Atlantique (Canaries, Guinée, et Benguela). La dynamique des populations de poissons exploités (sardinelles, chinchards et thons) est étudiée, en partie grâce à ce projet de thèse, en termes de disponibilité des proies et de variabilité de l'habitat. En s'appuyant alors sur les séries d'observations sur une trentaine d'années, le projet cherche à établir des rapports entre la variabilité océanographique à grande échelle et les changements dans la diversité des pélagiques exploités. Une attention particulière est accordée à la réponse des espèces principalement exploitées aux conditions climatiques de l'Atlantique Tropical. Par ailleurs, les modèles d'utilisation de l'habitat par les thons sont analysés pour les îles du Cap-Vert en utilisant les statistiques des captures et les nouvelles données obtenues à travers les expériences de marquage. Le projet teste l'hypothèse selon laquelle les variations de la zone de minimum d'oxygène affectent la dynamique des populations de thon obèse BET (bigeye tuna) et du thon jaune YFT (yellow fin tuna) et donc aura un impact sur la résistance des deux espèces à d'autres agents stressants.

Tandis que le projet AWA, impliquant l'Allemagne, la France, les pays nord-ouest africains et ceux du Golfe de Guinée, est parti d'un constat pessimiste sur l'environnement marin en Afrique de l'ouest pour tenter de trouver des réponses à proposer aux décideurs pour inverser sinon réduire les tendances négatives lourdes de conséquences pour les écosystèmes en présence et ceci à travers une approche écosystémique de la gestion de l'environnement marin' (EAMME, acronyme anglais) dans les eaux ouest africaines. En effet, l'océan Atlantique joue un rôle majeur pour les pays côtiers d'Afrique de l'Ouest. Les ressources halieutiques, le développement sociétal et le secteur du tourisme sont confrontés à des changements importants liés à la variabilité du climat et au réchauffement global de leur écosystème. La surexploitation des ressources vivantes combinées au rapide changement climatique génèrent une forte pression sur les écosystèmes marins. L'érosion côtière et l'élévation prévisible des températures de surface de la mer due au changement climatique sont des facteurs déterminants pour les mesures de gestion du littoral comme la mise en place d'aires marines protégées. La concentration en chlorophylle est un facteur limitant pour le développement des larves de poissons, ayant de plus un impact important, via la turbidité, sur l'absorption océanique des radiations solaires. Enfin, la zone de minimum d'oxygène, typique de l'Est des océans tropicaux, peut significativement restreindre l'habitat marin quand elle s'étend vers la surface. L'effondrement des stocks de poissons est devenu un phénomène courant dans les eaux riches et hautement productives de l'Ouest-africain, avec à l'heure actuelle, peu de signes de résilience. Ce constat provoque l'inquiétude des responsables politiques et des scientifiques impliqués dans l'évaluation des stocks et la gestion des pêcheries, mais aussi des populations pour lesquelles la pêche offre sécurité alimentaire et ressources économique. Le projet propose de mettre en place un partenariat stratégique capable de développer une vision et la base scientifique pour une approche écosystémique de la gestion de l'environnement marin dans les eaux ouest africaines. L'EAMME nécessite une approche multidisciplinaire combinant écologie marine, océanographie physique, bio géochimie et une composante de modélisation. L'objectif à long terme de ce partenariat est de développer une plateforme d'observation et de modélisation des

océans permettant de surveiller, simuler et prévoir les variations de paramètres clés (température, niveau de la mer, chlorophylle et oxygène) et des principales ressources marines vivantes au large du continent Ouest Africain et jusqu'au Cap Vert. Le projet cherche à identifier les principaux processus qui régissent la dynamique des écosystèmes et à différencier les effets de la pêche de ceux dus aux variations climatiques. Une meilleure compréhension des interactions entre la physique des océans, l'écologie marine et les perturbations d'origine anthropique est nécessaire pour développer des outils 'EAMME' et favoriser une utilisation plus rationnelle et durable des ressources marines vivantes. L'approche méthodologique dans ce projet se fonde sur l'analyse de séries chronologiques d'observations, l'organisation de missions à la mer auxquelles j'ai participé, la réalisation de simulations numériques incluant des études de processus, diverses approches statistiques et la recherche d'indicateurs écosystémiques. Elle est basée sur les données nouvelles et historiques avec l'objectif d'étudier la dynamique saisonnière et à long terme des écosystèmes marins. L'objectif final est le développement d'outils adaptatifs d'aide à la décision dans le cadre de l'EAMME et le contexte du changement global.

De longues séries de données acoustiques collectées à bord du navire de recherche norvégien Dr Fridtjof Nansen et du navire sénégalais N/O Itaf Dème sont disponibles et offrent l'opportunité, par discrimination multi-fréquentielle, de classer et de connaitre la distribution du macrozooplancton qui joue un rôle clé dans les écosystèmes pélagiques, tant du point de vue écologique que biogéochimique, et conditionne fortement la dynamique des petits pélagiques, les distributions verticale et horizontale de ces ressources étant largement tributaires de leur environnement trophique. Le zooplancton est une composante clé du régime alimentaire des pélagiques et alors déterminer sa distribution temporelle et spatiale ainsi que son abondance est devenu un défi (Lavery et al., 2007).

C'est dans ce cadre global que s'inscrit ce projet de thèse qui à terme doit contribuer à une meilleure compréhension des interactions entre la dynamique des petits pélagiques, la production secondaire, les paramètres environnementaux et les perturbations d'origine anthropique, et ainsi contribuer à une gestion plus rationnelle et durable des ressources pélagiques au Sénégal.

La problématique de ce travail de thèse peut se résumer essentiellement aux questionnements suivants : Quelles évolutions a subi la répartition spatio temporelle des petits pélagiques en Afrique occidentale en général et au Sénégal en particulier lors des trente dernières années ? Quels facteurs déterminants ont été à l'origine des changements dans leur dynamique ?

Pour tenter de répondre à cette problématique, on se propose dans cette thèse, principalement de suivre les modifications importantes intervenues dans la distribution et la structuration des bancs de petits poissons pélagiques exploités (Brehmer et al., 2007) à travers les séries d'observations sur une trentaine d'années offertes par les nombreuses campagnes de prospections acoustiques réalisées dans la région et ensuite d'initier une étude sur l'évolution du macro zooplancton à travers l'information très riche recueillie contenues dans ces campagnes en s'appuyant sur des méthodologies déjà éprouvées et ayant donné des résultats pertinents pour d'autres écosystèmes notamment celui du Humboldt, pour finalement établir des rapports entre la variabilité à grande échelle du macrozooplanton et les changements dans la diversité des pélagiques exploités.

Les objectifs spécifiques visés concernent : i) l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des petits pélagiques durant ces trente dernières années au Sénégal ; ii) l'identification des facteurs déterminants à l'origine des changements intervenus dans la dynamique et l'habitat des

petits pélagiques dans l'espace du Courant des Canaries et dans un contexte de changement climatique iii) une ébauche descriptive de la distribution spatiale du macrozooplanton.

Ce travail de thèse ayant fait l'objet d'articles publiés et soumis, ceux-ci sont directement intégrés au texte de ce manuscrit.

Le chapitre 1 traite de l'importance des petits pélagiques en Afrique de l'Ouest et des enjeux qu'ils représentent pour les populations de la région avec un accent sur les sardinelles qui occupent une place de choix dans cet écosystème. Le contexte écologique où les petits pélagiques évoluent en Afrique de l'Ouest est retracé aussi bien au niveau continental qu'estuarien en décrivant la topographie, la géomorphologie et l'hydrologie dans la zone. Les petits pélagiques étant évalués dans la zone par méthodes hydroacoustiques, cet outil privilégié de suivi des stocks pélagiques est décrit dans ce chapitre ainsi que l'historique des campagnes hydroacoustiques au Sénégal et les actions menées au niveau régional pour l'harmonisation des résultats acoustiques issus des navires de la région.

Le chapitre 2 traite de la dynamique et la distribution spatiale des ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest en revenant d'abord sur les schémas migratoires spécifiques des deux sardinelles. Les potentialités, pêcheries et exploitation des petits pélagiques sont passées en revue avant de décrire largement l'évolution des indicateurs de l'état d'exploitation des deux sardinelles. La variabilité spatiale et temporelle de la biomasse de petits pélagiques analysée à partir de l'ensemble des campagnes acoustiques conduites dans la région par les navires nationaux et internationaux depuis 1995 est étudiée et pour le cas spécifique des campagnes d'échointegration au Sénégal, leur représentativité par rapport aux stocks ciblés est étudiée et présentée en fin de chapitre.

Le chapitre 3 traite de l'impact du changement climatique sur la distribution des petits pélagiques en Afrique de Ouest. Les perturbations intervenues dans la répartition spatiale des principales espèces est mise en parallèle avec l'évolution des divers paramètres environnementaux dans la région est et a fait l'objet d'un article soumis et présenté dans ce chapitre.

Enfin, la dernière partie de ce manuscrit (Chapitre 4) dégage la conclusion générale tirée de ce travail de thèse avant d'initier une étude exploratoire sur la discrimination et la variabilité des couches diffusantes sur l'ensemble de la région nord-ouest africaine, en mettant celles-ci en relation avec les résultats obtenus sur le compartiment « poisson ». Cette étude exploratoire a permis de dégager des perspectives pour améliorer ou parachever le chantier ouvert par ce travail de thèse vers une meilleure connaissance des ressources pélagiques dans la région ouest africaine à partir des données hydroacoustiques.

Même si un certain nombre de questions n'ont pas pu être abordées à la fin de ce travail de thèse, nous nous réjouissons tout de même d'avoir pu répondre à quelques-unes d'importance capitale pour les populations de la sous-région. Au-delà de son aspect purement orienté vers l'appui au management des ressources pélagiques au Sénégal, ce travail de thèse s'adresse entre autres à toute la communauté scientifique dans la sous-région de l'Afrique de l'Ouest, intéressée par la pratique de l'acoustique sous-marine, en particulier des générations futures appelées à reprendre le flambeau des évaluations et suivi des ressources pélagiques au Sénégal et dans la sous-région par les méthodes hydroacoustiques.

# Chapitre 1
# Contexte général

« Sou yaboy amoul wone yakh, badolo dou thi diott »
Dicton wolof
« Si la sardinelle *n'*avait *pas d'*arêtes, elle serait inaccessible au pauvre »

# 1 Chapitre I : Contexte général

## 1.1 Importance des petits pélagiques en Afrique de l'Ouest

Les pays de l'Afrique de l'Ouest, du Maroc au Nigéria, sont dotés de ressources pélagiques parmi les plus importantes au monde. La zone nord-ouest africaine a une productivité biologique élevée attribuée à l'upwelling côtier permanent ou saisonnier et à l'existence d'estuaires et archipels océaniques (les îles du Cap-Vert). Dans cette zone, les poissons pélagiques côtiers constituent, en tonnage débarqué, les ressources marines les plus importantes et partagées du fait de leur comportement migratoire. Au Sénégal et en Gambie, les clupéidés sont principalement représentés par les deux espèces de sardinelles (Sardinella aurita et Sardinella maderensis) et le bonga ou l'éthmalose (Ethmalosa fimbriata) qui vivent dans les estuaires et les zones côtières. Les sardinelles sont considérées comme les espèces pélagiques les plus représentatives au Sénégal. Les carangidés exploités dans la zone sont le chinchard noir (Trachurus trecae) et le chinchard jaune (Decapterus rhonchus). Le maquereau espagnol (Scomber japonicus) signalé sur toute la côte Ouest Africaine fait l'objet de captures insignifiantes. Parmi les espèces capturées secondairement dans les pêcheries pélagiques côtières, on peut citer : le pelon (Brachydeuterus auritus), le plat-plat (Chloroscombrus chrysurus), la ceinture ou poisson sabre (Trichiurus lepturus). Ces ressources pélagiques suivent un schéma migratoire dans l'espace CCLME (Canary Current Large Marine Ecosystem) située entre le Sud du Sénégal et le Nord du Maroc (Figure 1-1). Il s'agit donc de ressources partagées dont la gestion s'effectue à un niveau régional dans le cadre du Groupe de Travail COPACE (Comité des Pêches de l'Atlantique Centre – Est) qui se réunit chaque année sous la tutelle de la FAO. Les données les plus récentes font état d'une surexploitation du stock de sardinelle ronde Sardinella aurita et du chinchard noir Trachurus trecae, tout comme probablement celui de la sardinelle plate Sardinella maderensis. De même, le stock de chinchard blanc Trachurus trachurus et de maquereau Scomber japonicus est pleinement exploité (FAO 2016). Ces conclusions se fondent, pour une bonne partie, sur les évaluations acoustiques qui sont entreprises depuis plusieurs décennies, par l'Union soviétique dans le passé, les navires de recherche de la Norvège ('RV Dr Fridtjof Nansen'), et plus récemment, par les navires nationaux offerts par la coopération japonaise (N/O Itaf Deme du Sénégal, N/O Al Awam de la Mauritanie, N/O Al Amir du Maroc).

A l'échelle spécifique du Sénégal, les ressources halieutiques constituent un pilier de la politique de l'État en matière de sécurité alimentaire en couvrant près de 75% des besoins en protéines d'origine animale des populations sénégalaises, parmi celles-ci les ressources pélagiques côtières en occupent une place de premier plan et sont constituées principalement de sardinelles, chinchards, maquereaux et éthmaloses. En moyenne, elles représentent selon les années, près de 70 à 80 % des prises réalisées (Ba et al., 2017). Elles dominent dans les captures et constituent les ressources les plus abondantes. L'exploitation de ces ressources est assurée à la fois par des flottilles de pêche artisanale et industrielle même si les débarquements les plus importants de pélagiques côtiers sont le fait de la pêche artisanale.

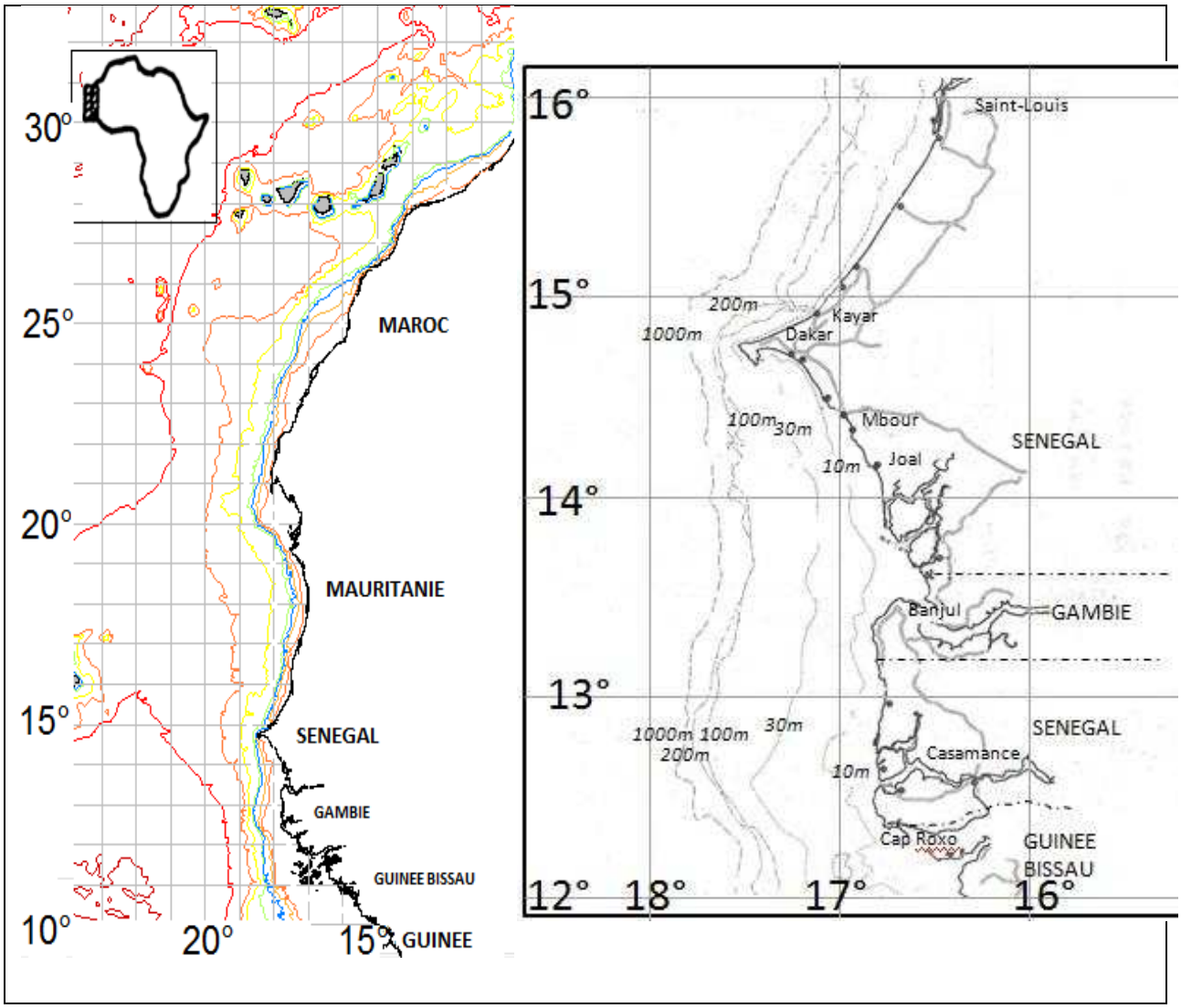



Figure 1-1 La zone d'étude : Espace du grand écosystème du Courant de Canaries « CCLME » en Afrique de l'ouest (à gauche) et la carte marine du Sénégal, isobath de 10 à 1000 mètres (à droite) (Anonyme, 2006)

Parmi les diverses populations de pélagiques présentes au Sénégal, les deux sardinelles occupent une place de choix et leurs biomasses estimées dans les campagnes pélagiques représentent très souvent à elles seules plus de la moitié de la biomasse totale des petits pélagiques au Sénégal). A titre indicatif, la dernière campagne effectuée en novembre 2015 au Sénégal par le 'RV Dr Fridtjof Nansen' fait état d'une biomasse totale de 370 000 tonnes de sardinelles, 138 000 tonnes de chinchards et 454 000 tonnes de carangidés et associés (Toresen et al, 2015) et le récapitule les estimations de biomasses sur les trente-cinq dernières années par le 'RV Dr Fridtjof Nansen' sur la zone sénégambienne (espace Sénégalo-Gambien).

Tableau 1-1 Biomasses estimées aux cours des campagnes du 'RV Dr Fridtjof Nansen' sur le plateau continental Sénégal - Gambie en milliers de tonnes de 1981 à 2015.

| Survey: | Sardinella | Carangids etc.* |
|---|---|---|
| AprMay-81 | 210 | 570 |
| Sept -81 | 360 | ** |
| FebMar-82 | 40 | 90 |
| NovDec-86 | 330 | 170 |
| FebMar-92 | 1 530 | 690 |
| NovDec-95 | 760 | 220 |
| NovDec-96 | 230 | 530 |
| NovDec-97 | 300 | 250 |
| NovDec-98 | 390 | 340 |
| NovDec-99 | 1 390 | 470 |
| NovDec-00 | 300 | 540 |
| JunJul-01 | 410 | 230 |
| NovDec-01 | 430 | 480 |
| JunJul-02 | 600 | 430 |
| NovDec-02 | 910 | 260 |
| JunJul-03 | 670 | 610 |
| NovDec-03 | 597 | 319 |
| NovDec-04 | 819 | 289 |
| NovDec-05 | 828 | 231 |
| NovDec-06 | 712 | 291 |
| October-15 | 373 | 592 |

La série illustre l'importance des deux sardinelles au Sénégal. Ceci explique que plusieurs études soient portées sur leur biologie (Conand, 1977 ; Boëly et al., 1982 ; Camarena-Lurhs, 1986 ; Fréon , 1988 ; Diouf et al., 2010 et Samba, 2011) et leur répartition géographique (Boëly et al, 1979, Bouaziz A., 2007). Dans le cadre de ce travail, on fera très souvent référence aux deux sardinelles vue leur place dans l'écosystème pélagique sénégalais. Le chapitre 2 reviendra en détail aussi bien sur leur dynamique et distribution spatiale ainsi que la dynamique des pêcheries qui les exploitent et leurs schémas migratoires.

Du point de vue économique, notons qu'au Sénégal la pêche constitue le premier secteur de l'économie nationale pourvoyeur de devises étrangères (environ 200 milliards de FCFA de recettes générées par an, soit 30% des recettes totales d'exportation), d'emplois (environ 600 000 personnes, soit 15% de la population totale active) et de protéines animales. Ces performances économiques et sociales sont dues en grande partie à la pêche artisanale qui est à l'origine de plus de 80% de la production nationale (350 000 tonnes) provenant essentiellement du segment pélagique (Ba et al., 2017).

## 1.2 Contexte bio-écologique et habitats des petits pélagiques

### 1.2.1 Topographie de la région nord-ouest africaine

Les vastes plateaux et les montagnes de l'Atlas, au Maroc, constituent la région la plus élevée, avec des sommets atteignant entre 3 000 et 4 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, et longent l'Atlantique. Ils sont séparés du littoral par une étroite plaine qui se prolonge au sud dans les vastes étendues de terres basses de la zone sahélienne.

Apparaissent ensuite les affleurements montagneux de la Mauritanie et quelques collines peu élevées dans le sud-est du Sénégal, dont le point culminant, près de Nepen Diakha, atteint 581 mètres au-dessus du niveau de la mer. La topographie côtière du delta du Sine Saloum, plus au sud, se caractérise par une faible altitude et un nombre croissant de plaines inondables vers le sud. Ensuite, la Gambie est presque entièrement composée de plaines alluviales flanquées de collines basses atteignant une altitude maximale de 53 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le nord de la Guinée-Bissau est également dominé par des plaines côtières basses ne dépassant pas 300 mètres au-dessus du niveau de la mer et recouvertes de savanes. Les îles du Cabo Verde et les îles Canaries ont au contraire un relief escarpé et accidenté, caractérisé par des roches volcaniques (FAO, 2015).

### 1.2.2 Géomorphologie du plateau continental sénégalais

La nature du sédiment de fond conditionne la répartition des espèces, certaines étant associées à des fonds sableux, d'autres à des fonds rocheux ou encore boueux.

Les côtes sénégalaises sont principalement orientées nord-sud. Avec une ouverture sur l'Océan Atlantique centre-est, le Sénégal bénéficie d'un littoral marqué par la presqu'île du Cap-Vert qui forme l'extrémité occidentale du continent à la pointe des Almadies, avec des îles (Gorée, Ngor), des îlots (les Madeleines) et une ample baie (Hann). Les côtes sénégalaises sont caractérisées par une grande diversité morphologique (Figure 1-2). La presqu'île du Cap-Vert la divise en trois grandes zones qui sont, du nord au sud (Domain, 1980) :

- La Grande Côte qui est une zone dunaire avec un hinterland occupé par une frange côtière à forte activité agricole (les Niayes). Cette zone, fortement marquée par le delta du fleuve Sénégal, se prolonge vers le nord par la côte sud mauritanienne qui présente le même biotope. Dans cette zone, le littoral est principalement sableux avec un relief peu marqué, caractérisé essentiellement par des massifs dunaires.
- La presqu'île du Cap-Vert, d'orientation est-ouest, est une zone à côte escarpée bordée de falaises, d'îles et de quelques plages sableuses.
- La Petite Côte et la Casamance forment une zone basse au sud, d'abord sableuse jusqu'à Joal, puis parsemée d'embouchures de fleuves (les fleuves Sine-Saloum, Gambie et Casamance et les rivières du sud) marquées par la mangrove.

Le plateau continental est limité par l'isobathe des 200 m (Domain, 1980). Sa superficie est de l'ordre de 28 700 km$^2$. De 27 milles nautiques au large de Saint-Louis, il se réduit à 5 milles au niveau de la presqu'île du Cap-Vert. Au sud du Cap-Vert, le plateau continental s'élargit progressivement pour atteindre 87 miles nautiques au niveau de la Casamance. Cet élargissement notable du plateau au sud de Dakar est d'un impact important sur les évaluations des ressources de poissons par les navires scientifiques, comme on le verra plus loin. Globalement, le plateau continental sénégalais est peu accidenté, avec toutefois, quelques canyons sous-marins dont le plus important sur la côte nord est la fosse de Kayar. Il existe également deux falaises sous-marines au sud de la presqu'île du Cap-Vert à 45 et 70 m de profondeur. La pente du plateau est assez douce jusqu'à l'isobathe 60 m et s'accentue par la suite.

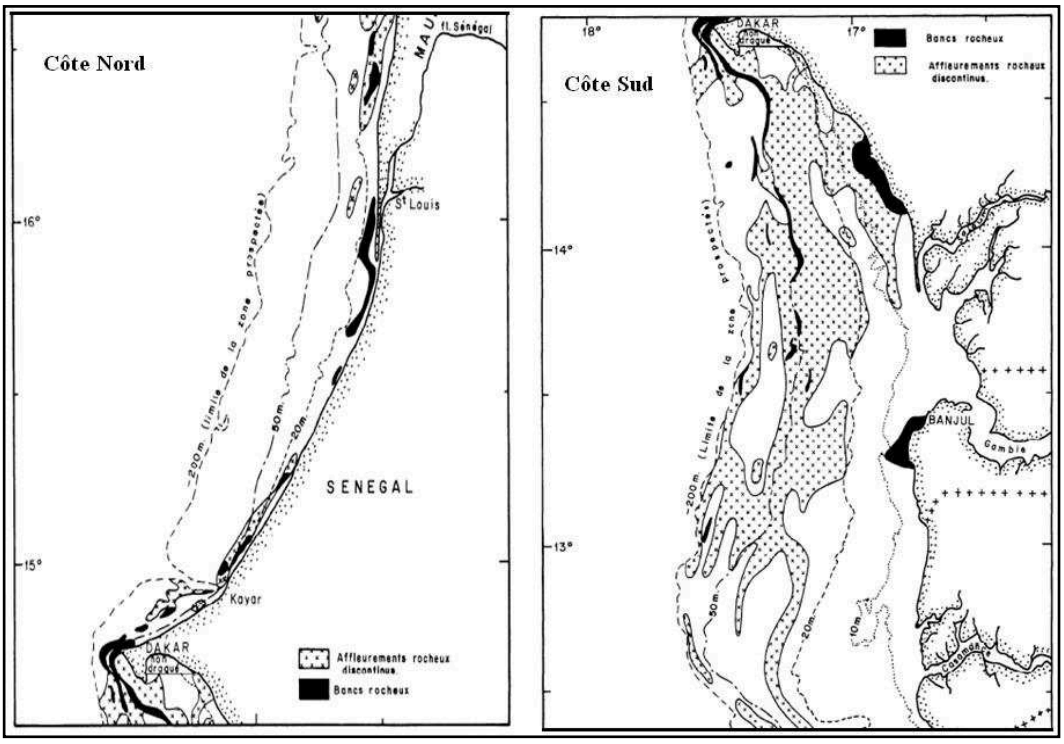



Figure 1-2 Géomorphologie du plateau continental sénégalais, Source : Domain (1980).

Des études plus récentes menées en 2015 ont été conduites par la FAO sur la nature des fonds, par le biais de deux campagnes écosystémiques organisées par les projets CCLME et EAF-Nansen en juin 2011 et novembre 2012 allant des eaux marines du plateau continental marocain, au nord, jusqu'à la Guinée, au sud. Cinq types de sédiment (boue, boue sableuse, sable vaseux, sable et graviers) ont donc été distingués, en utilisant le triangle de Folks (Folk, 1954). Les résultats sont présentés dans la Figure 1-3 ci-après. Deux autres classes n'appartenant pas à celle des sédiments (corail et roche) ont également été ajoutées et représentées.

On constate ainsi que la zone au sud de la presqu'île du Cap Vert est dominée par des fonds de types sableux, sablo-vaseux et de boue sableuse. La zone nord du Sénégal et la zone mauritanienne sont dominées par les types sablo-vaseux et sablo-boueux. Des coraux y sont identifiés. Dans la zone nord, le type de fond le plus important est sableux.

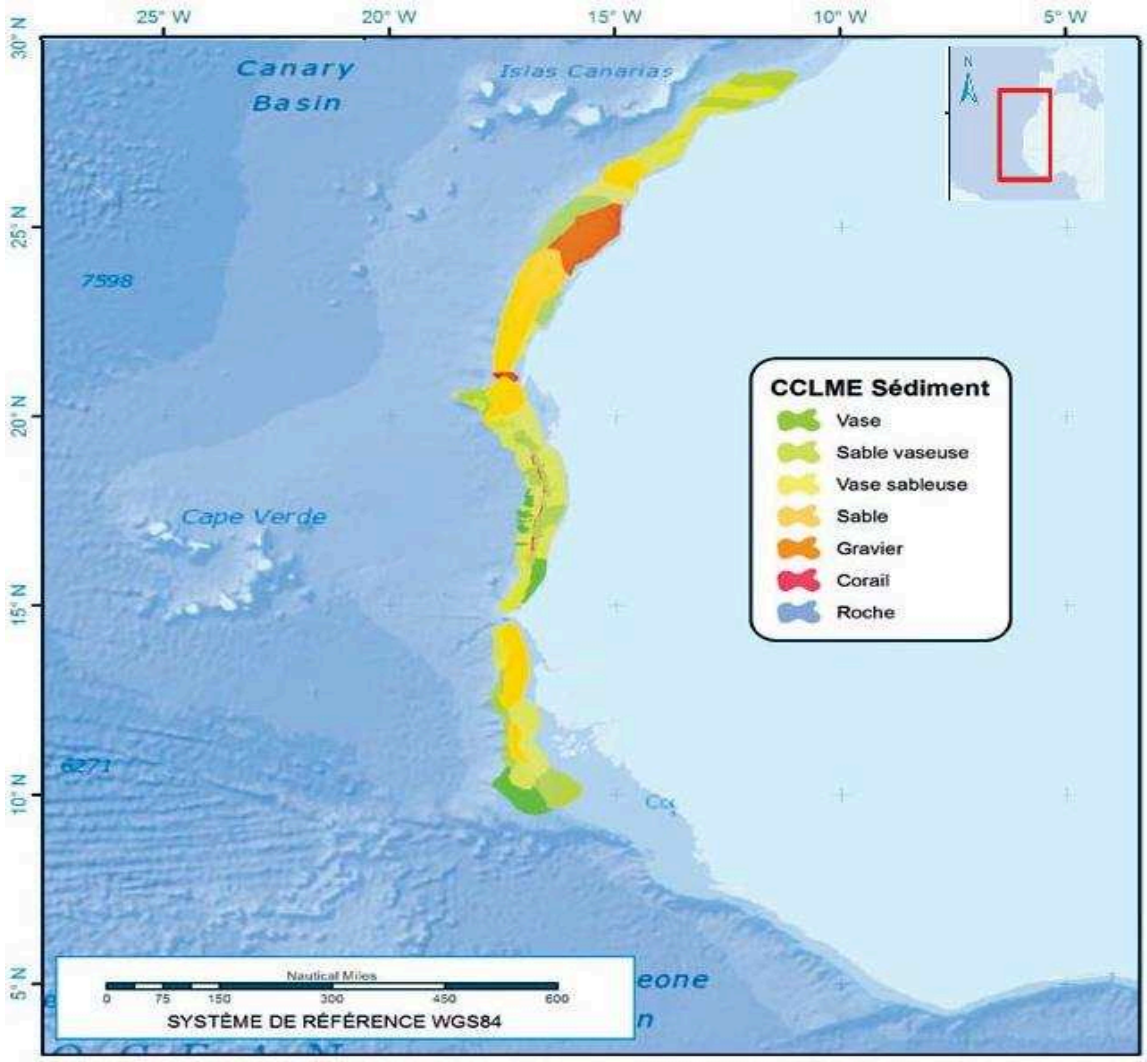



Figure 1-3 Types des fonds marins de la région du CCLME (Source FAO, 2015)

### 1.2.3 Hydrologie du plateau continental

#### 1.2.3.1 *Circulation horizontale des masses d'eaux*

Au large du Sénégal, les eaux de surface sont sous l'influence de deux principaux courants océaniques aux caractéristiques très différentes (Domain, 1980).

Venant du nord, le courant froid des Canaries dont une branche bifurque vers l'ouest au niveau du Cap Blanc pour former le courant nord équatorial, se déplace vers le sud tout le long de la côte de la Mauritanie et du Sénégal. Il s'agit d'un courant de dérive quasi permanent pendant toute la saison des alizés. Les eaux de surface subissant un entraînement mécanique sous l'influence du vent du nord. Il peut alors exister, surtout au sud du Cap-Vert, un contre-courant remontant le long de la côte.

Venant de l'ouest, le contre-courant équatorial chaud s'écoule vers l'est de la côte d'Afrique où il forme le courant de Guinée. En saison chaude, il peut cependant se diriger vers le nord. Ce courant est beaucoup plus variable que le précédent.

A côté des grands courants océaniques, il faut aussi noter que les côtes sénégalaises sont affectées par deux grands types de houles longues, issues des hautes latitudes des deux hémisphères (Niang-Diop et al., 2002). Les houles de nord-ouest (320°N à 20°E), issues de l'Atlantique nord, heurtent directement les plages de la côte nord alors qu'elles sont très

atténuées sur la côte sud suite à des diffractions successives réalisées autour de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. Ces houles sont particulièrement fortes pendant la saison sèche.

Les houles de sud-ouest (180°N à 230°E), issues de l'Atlantique sud, n'affectent que la côte sud de Dakar et ceci uniquement pendant l'hivernage (juillet à octobre).

En outre, le littoral peut être exceptionnellement atteint par des houles d'ouest (260°N à 270°E), se produisant en général entre octobre et décembre et qui seraient engendrées par des cyclones dans la mer des Caraïbes.

#### 1.2.3.2 *Circulation verticale des masses d'eaux*

Au mouvement horizontal des masses d'eaux du fait des courants océaniques et littoraux, s'ajoute une composante verticale associée principalement à une résurgence d'eaux profonde connue sous le nom d'upwelling. L'upwelling est un phénomène relativement complexe caractérisé par la remontée d'eaux profondes (Figure 1-4). Cette remontée se produit chaque fois que la force de Coriolis tend à écarter un courant côtier du littoral, c'est-à-dire si le courant se dirige vers l'équateur le long des rives orientales des océans, ou au contraire vers les pôles le long des rives occidentales. Le vent est l'un des principaux moteurs du phénomène d'upwelling. Le vent génère le phénomène d'upwelling en emmenant au large l'eau chaude (en surface) qui est alors remplacée par l'eau froide plus profonde. On distingue deux types d'upwelling dans l'écosystème nord-ouest africain : l'upwelling permanent et l'upwelling saisonnier.

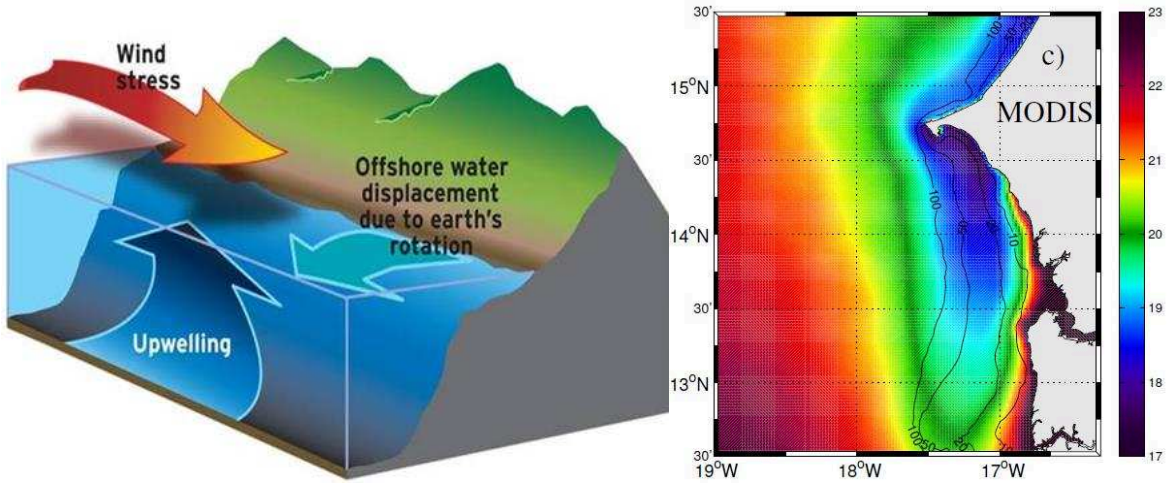



Figure 1-4 (gauche) Schéma conceptuel d'un upwelling (remontée d'eau profonde) côtier sous l'influence du vent (wind) et de la rotation de la terre (source: nwfsc.noaa.gov/). (droite) climatologie de la température de surface de la mer (SST Modis. Echelle de couleur en degrés Celsius) de février à avril sur le Sud Sénégal (Ndoye et al., 2017), l'upwelling (résurgence d'eau marquée à 17-19°C) est clairement visible et très caractéristique de notre zone d'étude.

##### 1.3.1.1.1. Upwelling permanent

La zone du Grand Courant des Canaries à l'extrême nord est une zone abritée. Alors qu'il existe un upwelling local de faible intensité au niveau de la côte nord du Portugal, l'orientation de la côte sud marocaine à l'intérieur du golfe de Cadix n'est propice à un upwelling qu'en fonction de la direction du vent (Nykjaer et Van Camp, 1994). Le sud du golfe de Cadix, sur la côte Atlantique, est une zone d'upwelling permanent tout au long de l'année, qui s'étend de 32° N à 20° N. L'upwelling dans cette région, qui s'intensifie vers la fin de l'été (de juillet à septembre), est dû aux vents soufflant constamment du nord au sud (Wooster et al., 1976).

#### 1.3.1.1.2. Upwelling saisonnier

La zone d'upwelling se développe au sud de 20° N en hiver (octobre), après le changement dans les systèmes de pression atmosphérique, et atteint son amplitude maximale (5° N) de janvier à mars, avant de se concentrer au nord (15° N) à la fin de l'été (septembre). L'upwelling migre également en suivant les méridiens au fur et à mesure de l'avancement de la saison, exportant des eaux « upwellées » riches en matières organiques et en plancton vers le large, grâce au développement de forts filaments d'upwelling (Barton et al., 1998). Le déplacement de l'upwelling du nord vers le sud et vers le large peut présenter des variations saisonnières et interannuelles importantes en raison de la variation saisonnière affectant les systèmes de pression atmosphérique.

Dans la région entre la Mauritanie et le Sénégal, des upwellings côtiers et en bordure du plateau continental peuvent se produire selon que le plateau continental est étroit ou large (Barton et al. 1977). L'upwelling en bordure du plateau se produit là où il existe une faible stratification thermique des eaux de surface, un large plateau et des vents favorables persistants qui produisent une séparation progressive de l'upwelling côtier et de celui du large. Dans cette région, les masses d'eau de l'Atlantique-sud central arrivent par le biais du contre-courant Nord-équatorial et sont advectées vers le nord entre le 15° N et 20° N par la recirculation cyclonique, produisant ainsi un front intense (Hernández-Guerra et al., 2005). Un sous-courant en direction du Pôle de 100 km de large et 300 mètres de profondeur a été observé dans cette région. Le flux de surface, normalement en direction de l'équateur, est également inversé entre les îles Canaries et le Maroc à la fin de l'automne et en hiver (Navarro-Pérez et Barton, 2001; Hernández-Guerra et al., 2005), probablement en raison d'un affaiblissement des alizés au sud de Cap Ghir. L'upwelling qui se développe en hiver dans les eaux côtières du flux en direction du nord est variable (Mittelstaedt, 1991).

Selon Roy et al (1992), les côtes sénégalaises sont marquées par l'affluence saisonnière d'eaux froides issues d'upwellings côtiers (Figure 1-5). Le long des côtes sénégalo-mauritaniennes, l'alizé contribue à repousser au large les eaux superficielles déjà fraîches et à permettre ainsi la remontée d'eaux profondes encore plus froides. Les remontées d'eaux froides profondes riches en sels minéraux sont permanentes au-dessus de 20° nord et saisonnières au sud de cette latitude (Figure 1-5). La manifestation des upwellings côtiers peut être repérée à travers les chutes de température de surface observées au niveau des stations côtières. De novembre à janvier, l'upwelling est dû au vent de direction nord-est et est légèrement plus intense sur la côte nord. En février, la dominante nord-ouest dans les alizés favorise la côte sud mieux exposée où l'upwelling devient plus intense.

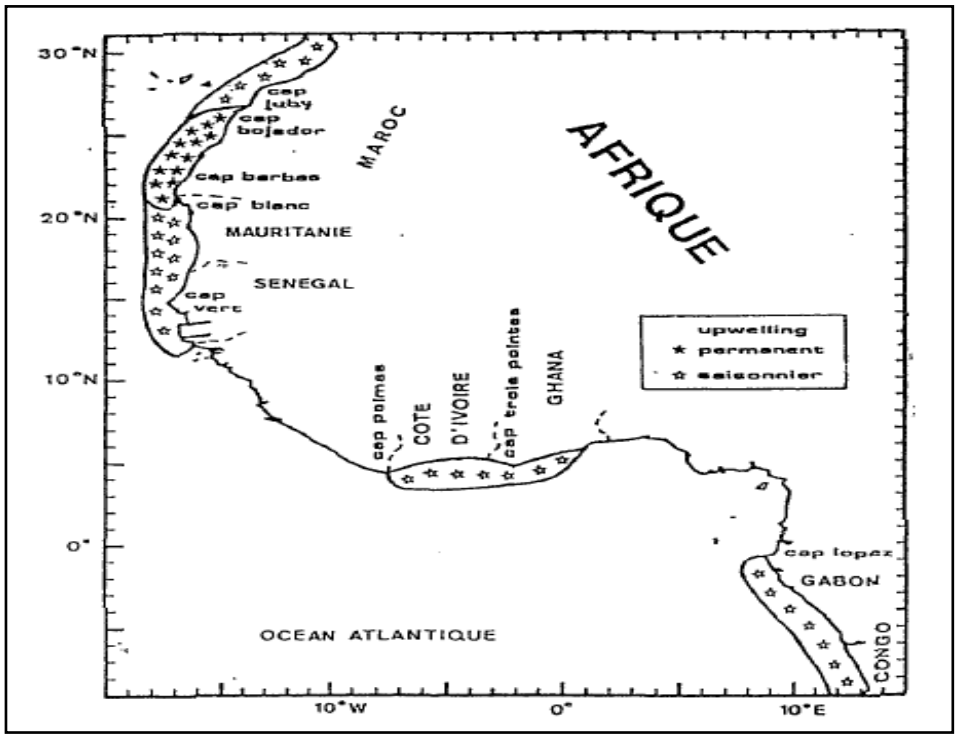



Figure 1-5 Zones d'upwelling côtier en atlantique nord-est africain. Source : (Roy et al, 1992).

La dynamique des masses d'eaux le long des côtes sénégalaises est responsable de la répartition saisonnière des eaux de surface. En prenant comme limites de température 24°C et de salinité 35g/l, elle permet de distinguer trois grandes catégories d'eaux (Domain, 1980 ; Laloë et Samba, 1990).

Les eaux canariennes froides (température inférieure à 20°C) et salées (entre 35 et 36 g/l). Elles se mélangent avec les eaux profondes de l'upwelling côtier.

Les eaux tropicales du contre-courant équatorial qui ont une température élevée (plus de 24°C) et des salinités fortes (environ 36 g/l). Leur épaisseur varie entre 30 et 50 m.

Les eaux guinéennes qui sont chaudes (plus de 24°C) et dessalées (moins de 35 g/l). Ces eaux résultent du mélange des eaux tropicales avec les eaux de pluie de la mousson et surtout avec les apports fluviaux côtiers. Cette dessalure se remarque notamment dans le sud où les pluies sont plus importantes et au voisinage de l'embouchure des différents cours d'eau (fleuves Sénégal, Gambie, Casamance, etc.).

L'évolution des sels minéraux, en l'occurrence le nitrate et le phosphate, a été également mise en relation avec la saisonnalité de la température (Oudot et Roy, 1991). Il a été constaté que le cycle annuel moyen du nitrate est en opposition de phase avec celui de la température. Les plus fortes concentrations de nitrates (plus de 16 µmol/l) sont observées entre le mois de février et le mois de mars pendant la saison d'upwelling et les plus faibles (moins de 3 µmol/l) de juin à novembre dans les eaux chaudes. L'amplitude annuelle moyenne dépasse 13 µmol/l. Les concentrations du nitrate ne sont jamais nulles, les plus faibles valeurs restant voisines de 3 µmol/l pendant la saison chaude. Le cycle annuel moyen du phosphate est en tout point comparable à celui du nitrate, les plus fortes teneurs (plus de 1,2 µmol/l) sont observées en période d'upwelling et les plus faibles en saison chaude (moins de 0,5 µmol/l).

#### 1.2.3.3 Filaments côtiers

Les filaments d'upwelling se forment le long de la côte Atlantique de l'Afrique nord-occidentale et ressurgissent à plusieurs centaines de kilomètres au large comme c'est le cas des filaments du Cap Ghir, Cap Juby, Cap Bojador et Cap Blanc. L'apparition de ces filaments est dans bien des cas le résultat de l'interaction entre les remontées d'eaux profondes et une particularité ou une irrégularité topographique côtière ou sous-marine comme la présence de caps ou de canyons sous-marins (Gabric et al., 1993; Hagen et al., 1996; Pelegrí et al., 2005; Karakas et al.,2006).

On pense que le filament du Cap Ghir exporte de grandes quantités de matières organiques vers le large en automne (Pelegrí et al., 2005, 2006). Il existe un gigantesque filament d'upwelling au niveau du Cap Blanc, sur la côte mauritanienne, à l'intersection entre le gyre subtropical et la circulation du gyre (Van Camp et al., 1991; Gabric et al., 1993; Fisher et al., 2009). La chlorophylle présente dans ce filament est transportée à 400 km au large. D'autres études de modélisation avancent que certaines particules peuvent être transportées jusqu'à 600 km au large (Fisher et al., 2009).

#### 1.2.3.4 Les effets des tourbillons insulaires

Les îles Canaries, qui sont situées sur la pente continentale, créent un obstacle au flux en direction du sud du courant des Canaries. La circulation à grande échelle est donc forcée lors du passage entre les îles et/ou entre les îles et le continent africain. Les îles Canaries favorisent ainsi la création de tourbillons dans leur sillage. Il existe un tourbillon cyclonique permanent au sud de Gran Canaria qui interagit avec le jet côtier atmosphérique (Barton et al., 1998, 2004). En outre, près du Cap Juby, des tourbillons sont observés, causés en aval par les îles Canaries (Arístegui et al., 1994), qui entraînent des eaux depuis le filament du Cap Juby jusqu'au large, accroissant ainsi les échanges entre les pentes (Barton et al., 2004). Les îles du Cabo Verde produisent également un fort panache d'upwelling en aval, qui est séparé de la côte du fait de la longue péninsule qui s'avance sur le plateau (Demarcq et Sambe, 1991). Le front entre les eaux qui remontent et celles qui se dirigent vers le Pôle est marqué par une convergence en surface (Mittelstaedt, 1991).

### 1.2.4 Caractéristiques du milieu estuarien

#### 1.2.4.1 Composition du complexe estuarien du Sénégal

A travers son réseau hydrographique continental, le Sénégal bénéficie d'un complexe estuarien formé par deux types de systèmes fluviaux (les systèmes locaux et les systèmes sous-régionaux) qui constituent l'essentiel des cours d'eaux permanents. Les systèmes locaux comprennent principalement les fleuves Saloum et Casamance qui prennent leur source et coulent presque exclusivement au Sénégal. Les systèmes sous-régionaux englobent les fleuves Sénégal et Gambie. Le fleuve Sénégal prend sa source en Guinée dans une zone relativement bien arrosée.

Quatre cours d'eau débouchent ainsi sur le littoral sénégambien :

- Deux fleuves aux débits appréciables : le Sénégal et la Gambie, avec des débits moyens en période de crue respectivement de 3515 $m^3/s$ et de 556 $m^3/s$ qui drainent vers la mer des quantités relativement importantes d'apports terrigènes. Il faut, toutefois signaler qu'avec l'édification du barrage de Diama, les apports terrigènes du

fleuve Sénégal ont fortement diminué et se limitent aux périodes d'ouverture de ce barrage.

- Deux autres fleuves, qui doivent plutôt être considérés aujourd'hui comme des estuaires inversés, le Sine-Saloum et la Casamance, et par lesquels ne transitent plus que des volumes négligeables d'eau douce. Ces cours d'eau, notamment le Sine-Saloum et la Casamance jouent un rôle important dans l'alimentation et la survie de juvéniles de crevettes et de poissons marins (Diouf, 1996).

#### 1.2.4.2 *Caractéristiques de l'estuaire du fleuve Sénégal*

Le bassin versant du fleuve Sénégal couvre une superficie de 220 000 km². Issu de la confluence de trois cours d'eau, le fleuve Sénégal, long de 1 800 km, parcourt un domaine sahélien dans une large vallée alluviale. L'estuaire du fleuve Sénégal s'étire sur une cinquantaine de kilomètres entre l'embouchure et le barrage anti-sel de Diama. A l'embouchure, l'estuaire se présente comme un chenal rectiligne, bordé en rive droite par le cordon dunaire que constitue la langue de Barbarie et en rive gauche par un réseau assez diffus de lagunes (mangrove fossile). Le régime du fleuve Sénégal, de type tropical, se caractérise par un cycle annuel comportant :

- une période de hautes eaux de 3 à 4 mois, avec une pointe de crue en octobre ;

- une période de basses eaux étalée sur 8 à 9 mois, progressivement décroissante de novembre-décembre à juin-juillet avec une remontée saline lors de la décrue.

#### 1.2.4.3 *Caractéristiques de l'estuaire du fleuve Sine*-Saloum

Le Sine Saloum est un ensemble de petits bassins côtiers et de bras de mers (bolongs), débouchant dans un estuaire complexe aux eaux très salées (Dacosta, 1993). Les autres cours d'eau ont des écoulements non pérennes sporadiques (Medd, 2015).

Le fleuve Saloum, long de 250 km, définit un bassin d'une superficie de 29 700 km² (Diouf, 1996) avec une faible pente (moins de 0,6 %). Il est localisé à une centaine de kilomètres au sud de Dakar, soit au centre ouest du Sénégal, vers la frontière nord gambienne. L'estuaire hyper halin du Saloum (entre 40g $l^{-1}$ et 70g $l^{-1}$ de l'aval vers l'amont) se caractérise par un fonctionnement d'estuaire inverse. A l'inverse du fleuve Sénégal, le Saloum présente la particularité d'une absence totale d'apport fluvial pendant une bonne partie de l'année, ce qui entraine une forte salinisation de ses eaux, même après la saison des pluies. C'est un milieu marqué par la présence de nombreuses vasières, des chenaux ou bolongs bordés de mangrove et des îles et îlots inhabités qui abritent une riche faune sauvage.

#### 1.2.4.4 *Caractéristiques de l'estuaire du fleuve Casamance*

Le fleuve Casamance traverse toute la région de Casamance d'est en ouest sur près de 350 km et couvre une superficie de 20 150 km² en territoire sénégalais. Il prend sa source aux environs de Fafakourou et présente des pentes longitudinales extrêmement faibles, pratiquement nulles, sur plus de 200 km à l'intérieur des terres. Son cours se compose de deux parties : un cours aval fortement influencé par la marée qui remonte jusqu'à Diana Malari (à 152 km de l'embouchure). Le calendrier de crue dépend des précipitations. Cependant, sur son bassin, le seul apport non négligeable en eau douce se localise aux environs de la frontière avec la Guinée. De l'embouchure aux sources, on passe d'un milieu marin à un milieu hyper halin.

Aujourd'hui, après plus de trois décennies de sécheresse et ses conséquences sur la diminution des écoulements de surface et les disponibilités en eaux souterraines, le biseau salé se fait sentir jusqu'à Kolda, au plus fort de la saison sèche.

### 1.2.5 Evolution des facteurs environnementaux

Une revue des conditions environnementales au Sénégal est faite ici pour les principaux paramètres caractéristiques de la zone sénégalaise. Afin de pouvoir aborder l'étude de la dynamique des petits pélagiques dans le système du Courant de Canaries, cette revue a été complétée par des extractions de données satellitaires à partir des capteurs de l'agence NOAA pour avoir une étendue globale des paramètres environnementaux sur la région depuis le sud du Sénégal jusqu'au nord du Maroc.

#### 1.2.5.1 Evolution des températures

1.3.1.1.3. *Température de l'air au niveau de la côte*

Les données de température de l'air disponibles à partir de Direction de la Météorologie Nationale couvrent la période 1950-2005 (Figure 1-6). Au cours de cette période, l'évolution de la température de l'air au niveau des trois grandes stations météorologiques de Saint-Louis (au nord), de Dakar (presqu'île du Cap Vert) et de Ziguinchor (au sud) montre de légères fluctuations (coefficients de variation inférieurs à 3%). Les valeurs les plus remarquables ont été observées durant les années 1969-1970 avec des niveaux de température exceptionnellement élevés dans les trois stations (jusqu'à 25,9° C à Saint Louis, 24,7° C à Dakar et 27,1° C à Ziguinchor). Sur le long terme, on note une tendance globalement croissante dans les trois stations. Ainsi, la température de l'air qui n'était qu'en moyenne de 23,2° C en 1950 à Dakar est passée à 25,2 après une cinquantaine d'années. Au cours de la même période, elle a pratiquement augmenté d'un degré à Ziguinchor.

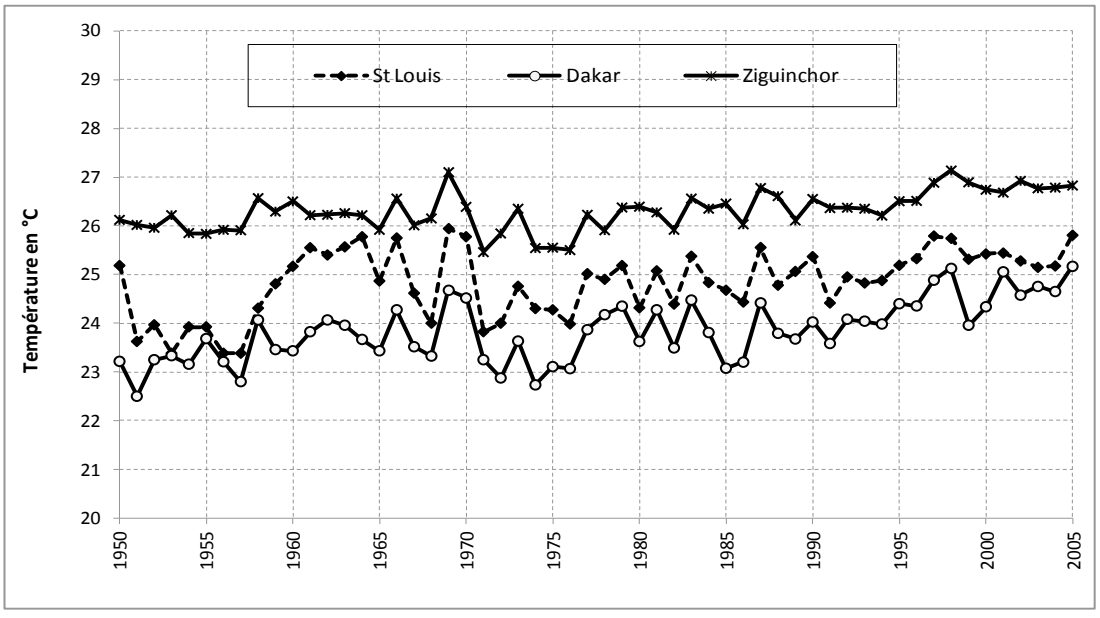



Figure 1-6 Température moyenne de l'air dans trois stations météorologiques.(Source : Direction de la Météorologie Nationale)

1.3.1.1.4. Evolution de la température de surface de la mer (SST)

A l'instar des températures terrestres, les SST sont sur une pente ascendante de 1980 à 2015. En subdivisant le littoral sénégalais en trois zones (Zone Nord : grande côte ; zone Centre : de

Dakar aux îles du Saloum ; et la Zone Sud: la région naturelle de la Casamance), nous constatons que le réchauffement des eaux côtières est plus important du Nord vers le sud (Figure 1-7). Ce constat justifie la remontée des espèces très sensibles à la température vers le nord ou leur éloignement de la côte.

L'analyse des SST montre une augmentation des températures sur toute l'année, pouvant ainsi affecter la répartition des ressources halieutiques et les saisons de pêche au Sénégal.

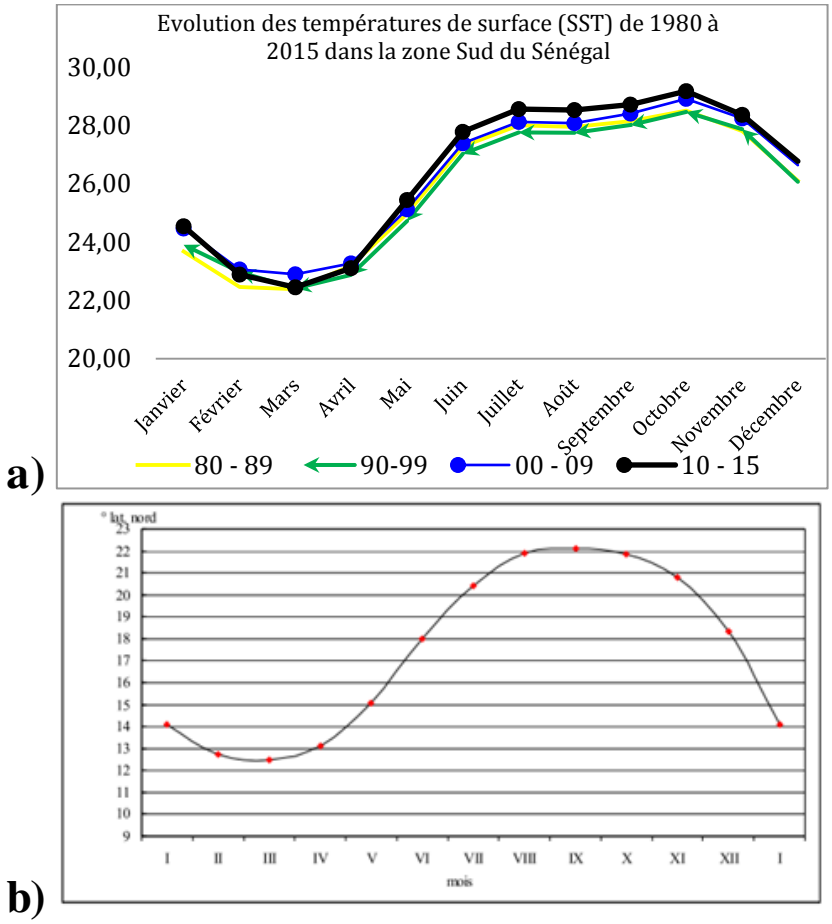



Figure 1-7. Evolution des SST au Sénégal et dans la région NWA (Diop et al, 2016).

D'un point de vue plus général sur les côtes sénégalaises, les températures de surface (SST) de l'eau de mer présentent une forte variabilité saisonnière, avec une oscillation de plus de 12°C (Rébert, 1983). Elles varient entre 16 et 18 °C en février-mars puis atteignent 26 à 28 °C de septembre à novembre. Une remontée persistante d'eaux froides mélangées à des eaux tropicales plus chaudes transportées par le contre-courant équatorial s'écoule progressivement sur toute la région de juin à novembre.

Au niveau du CRODT, quatre stations côtières étaient suivies régulièrement dans le passé pour collecter la température de surface de l'eau : à Saint Louis, Kayar, Thiaroye et Mbour. La série disponible s'étend de 1952 à1997 (Figure 1-8, Figure 1-2). Les données disponibles permettent cependant de bien décrire la tendance des SST au niveau de la côte jusqu'à la fin des années 90. Avec des coefficients de variation situés entre 2 % et 3 %, les fluctuations de la température de surface de l'eau de mer sont relativement faibles dans les quatre principales stations côtières de Saint Louis (Grande Côte), Kayar (Grande Côte), Thiaroye (Cap Vert) et Mbour (Petite Côte). En ce qui concerne la tendance générale des séries, dans toutes les stations le réchauffement des eaux semble être beaucoup plus manifeste depuis la fin des années 80.

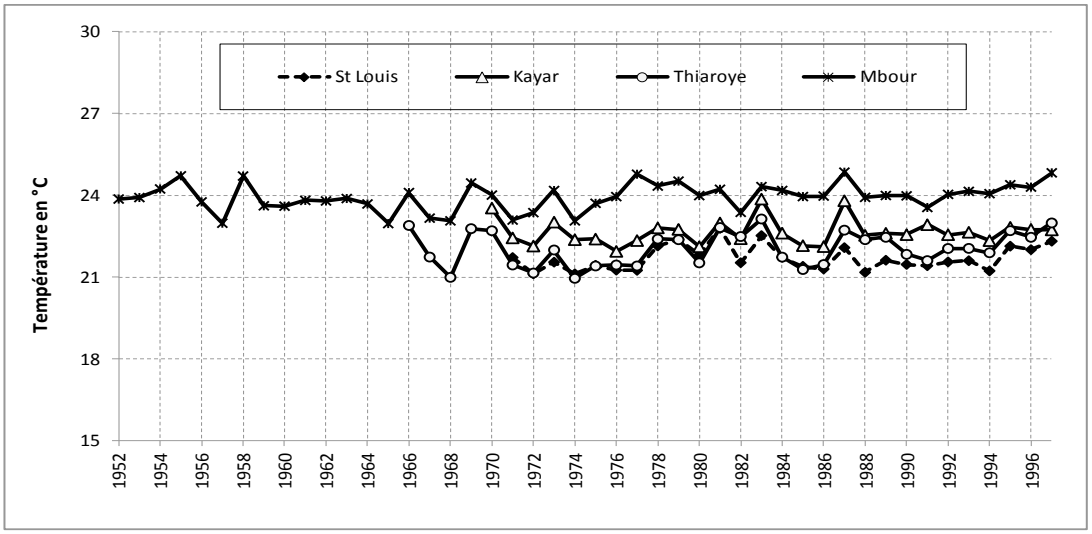



Figure 1-8 : Température moyenne de l'eau de mer dans quatre stations côtières.

L'évolution des paramètres environnementaux dans la région étant d'un intérêt particulier dans le cadre de ce travail, nous avons tenu à étendre les données ci haut sur l'évolution du vent au Sénégal à l'ensemble de la zone d'étude de cette thèse, c'est à dire jusqu'au Maroc, en procédant à des extractions de données satellitaires à partir des capteurs AVHRR and MODIS de l'agence NOAA. Les tendances sont nettes dans la région que nous avons subdivisée en 5 zones (Figure 1-9, droite) avec un réchauffement continu constaté sur toutes les zones étudiées (Figure 1-9, gauche)

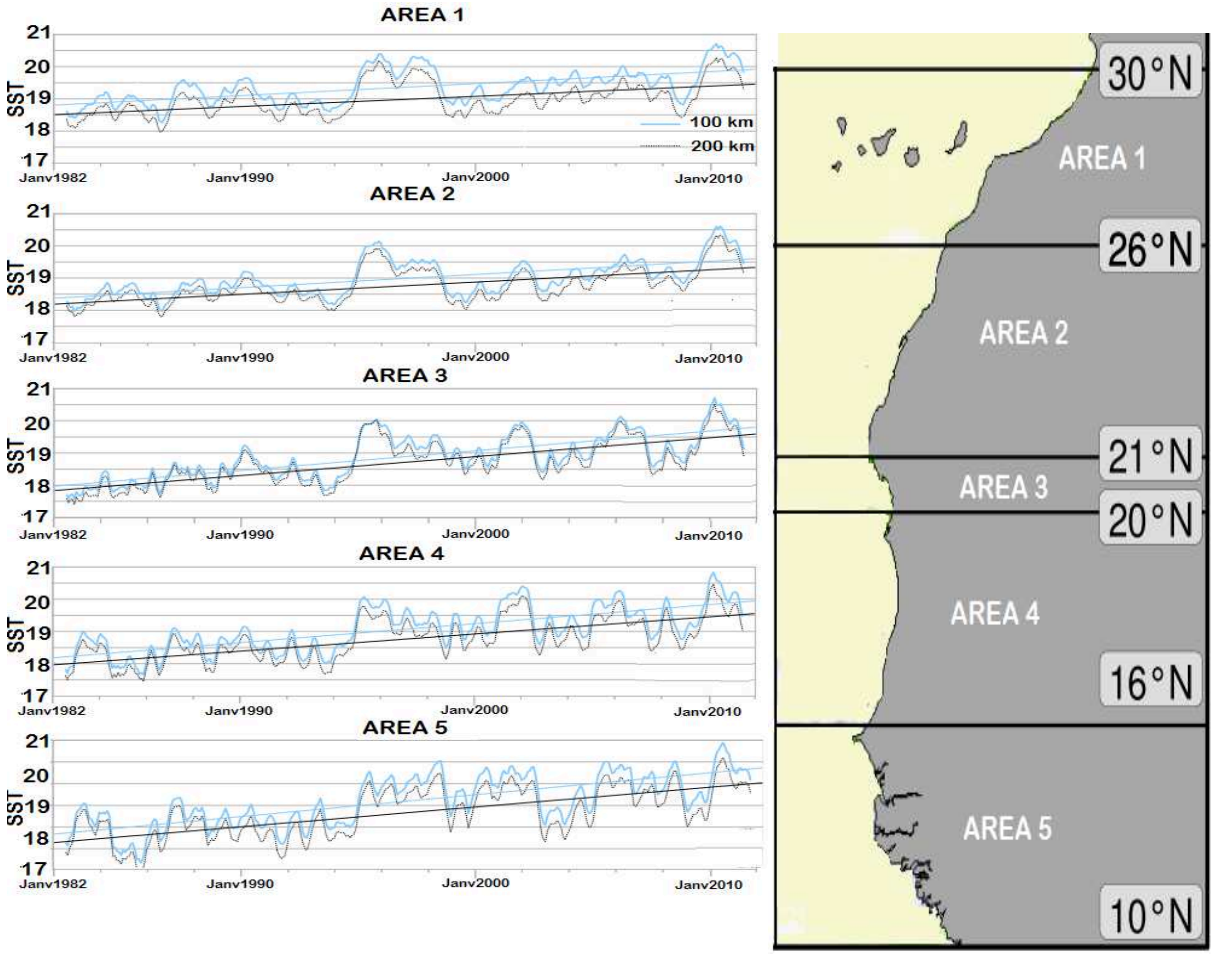



Figure 1-9 Evolution des SST sur les côtes nord-ouest africaines (gauche) subdivisées en cinq zones d'études (droite), à 100 et 200 km de la côte, entre janvier 1982 et janvier 2010.

A l'échelle mondiale, le réchauffement constaté se trouve être les plus important parmi les régions tropicales du globe, comme on peut le remarquer dans la
Figure 1-10 montrant les anomalies de SST depuis 1982, exceptionnelles au sud du Cap Blanc.

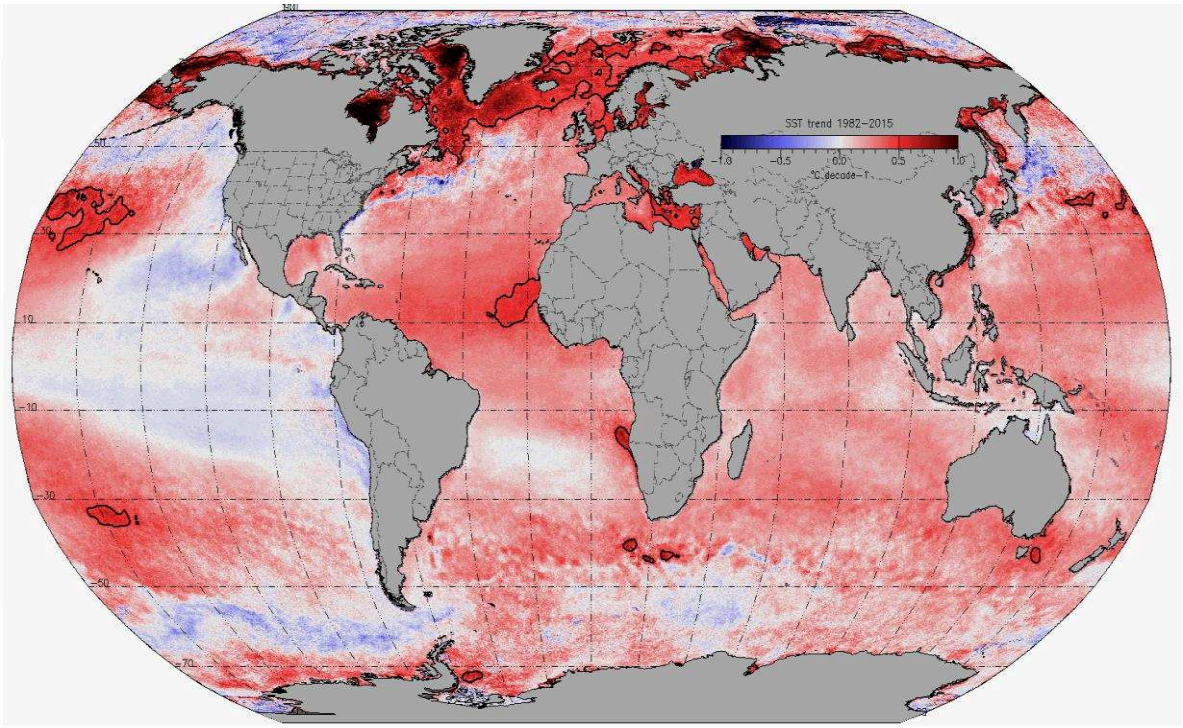
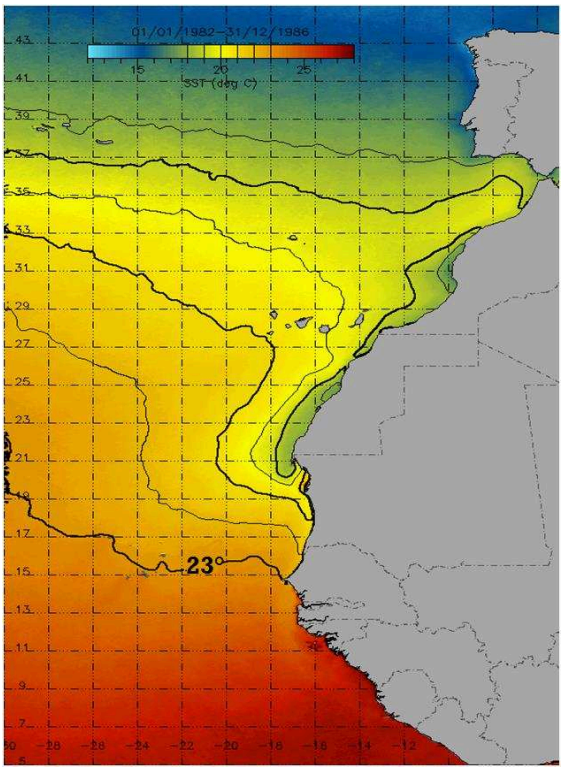
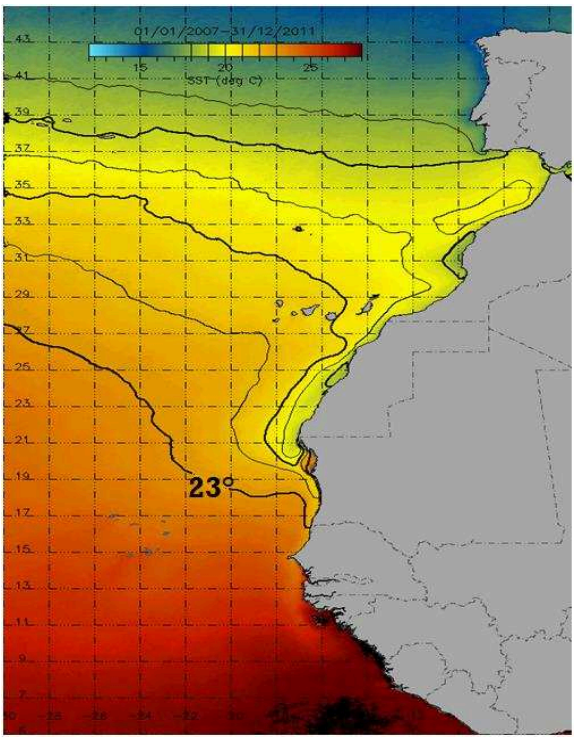



Figure 1-10 Anomalies de températures SST au niveau mondial sur la période 1982-2015 (1982-2011: AVHRR data, 1912-2015: MODIS data) avec la valeur 0.5°C décade iso-contourée au niveau de la région d'étude.

Cette situation se traduit dans l'évolution des isothermes dans la région (Figure 1-11) par leurs nettes remontées depuis les années 1980 jusqu'à maintenant.




**a) Average SST in the period 1982-1986**




**b) Average SST in the period 2007-2011**

Figure 1-11 Changements intervenus dans la configuration des isothermes depuis les années 1980.

### 1.2.6.2. Evolution de la pluviométrie

#### 1.2.6.2.1. Quantité de précipitations au niveau de la côte

Les données disponibles sur les précipitations au niveau de la côte à partir de la Direction Nationale de la Météorologie couvrent la période 1950-2003 (Figure 1-12). Avec des coefficients de variation supérieurs à 20 % (38 % à Saint-Louis, 47 % à Dakar et 24 % à Ziguinchor), la pluviométrie est caractérisée par une grande irrégularité au cours de la période. Ces fluctuations interannuelles sont caractérisées par des écarts pluviométriques qui peuvent atteindre des centaines de millimètres (mm) de pluies d'une année à l'autre (jusqu'à 815 mm entre 1977 et 1978 à Ziguinchor). Outre cette importante variabilité, il faut noter que l'allure générale de la pluviométrie traduit une tendance significativement décroissante dans les trois stations. L'intensité de la baisse semble être d'autant plus importante que le niveau pluviométrique moyen est élevé. Ainsi, à Ziguinchor dont la moyenne pluviométrique annuelle sur la période 1950-2003 et de 1 315 mm (avec des pointes proches de 2 000 mm), on note une baisse de 9,4 mm par an. Par contre, pour les stations situées plus au nord du pays, le rythme annuel de décroissance est plus modéré avec -6,7 mm $an^{-1}$ à Dakar et -2,4 mm $an^{-1}$ à Saint-Louis pour des niveaux moyens annuels respectifs de 435 mm et 269 mm sur la période.

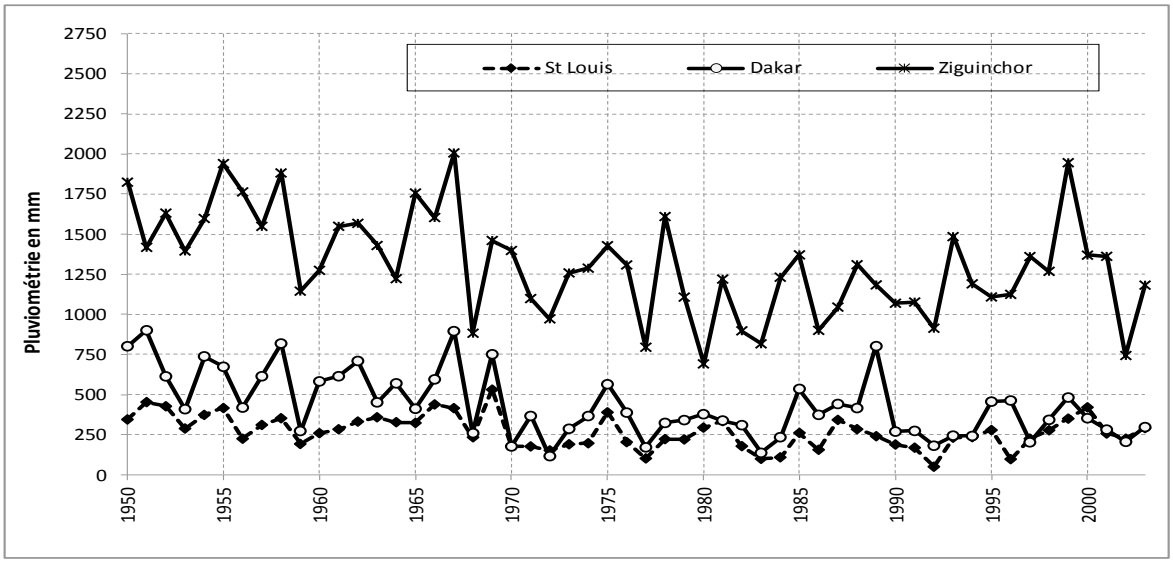



Figure 1-12 Pluviométrie moyenne dans trois stations météorologiques de 1950 à 2000. (Source : Dir. Nat.Météo.)

#### 1.2.6.2.2. *Déplacement des isohyètes à l'échelle nationale*

Sur une échelle spatio-temporelle plus large, des études sont concordantes sur la forte variabilité et la baisse généralisée des pluies au Sénégal (Malou et al., 1999 ; Niang-Diop et al., 2002, etc.). En effet, à partir du début du siècle, on observe une diminution générale des précipitations annuelles ponctuée par de véritables crises pluviométriques notamment entre 1913 et 1915 puis entre 1941 et 1945. En outre, sur la période 1940-1994, des estimations font état d'un recul pluviométrique touchant globalement l'ensemble du pays avec des baisses variant entre 20 et 40% selon les zones. Par ailleurs, on note de plus en plus un déplacement des isohyètes du nord vers le sud (Figure 1-13) entraînant ainsi l'apparition et l'extension progressive d'un climat de type nord sahélien que Malou et al. (1999) désignent par l'expression « sahélisation progressive du pays ».

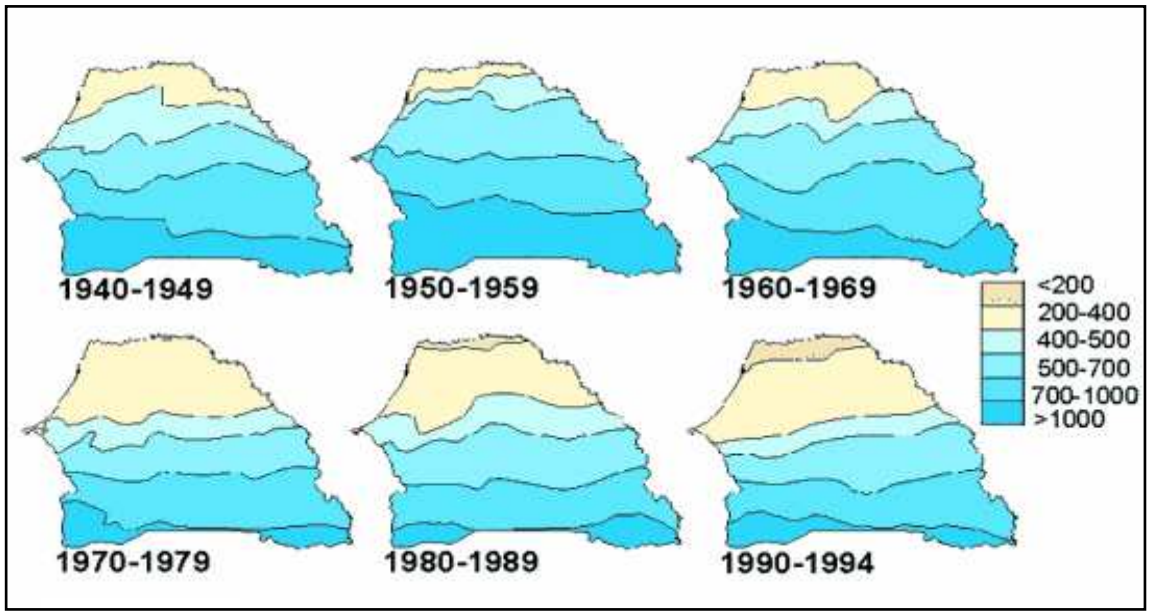



Figure 1-13 Evolution spatio-temporelle des isohyètes au Sénégal de 1940 à 1994. Source : Niang-Diop et al., 2005.

### 1.2.6.3.Evolution de la salinité des eaux

La variabilité climatique saisonnière de la région sud du Grand Courant des Canaries a des effets sur la salinité et sur les régimes thermiques (Berrit et Rebert, 1977; Rossignol et al., 1965). Pendant la saison froide, l'eau saline froide ($T < 24$ °C, $S > 35$) se diffuse sur la zone nord et arrive au-delà du plateau continental du Maroc et de la Mauritanie en janvier. La salinité peut diminuer dans certaines zones côtières en raison du mélange avec les flux d'eau douce. Pendant les mois d'été, la salinité augmente régulièrement avec le phénomène d'évaporation (36 ppm) jusqu'en juin ou jusqu'au début de la saison des pluies. La salinité 'S' diminue ensuite au début de la saison des pluies car les eaux tropicales se mélangent à l'eau de pluie et à l'eau douce ($T >$ 24 °C, $S < 35$) provenant des principales rivières de la région guinéenne. Il peut y avoir de fortes variations longitudinales de température et de salinité de surface dans les zones côtières durant la période d'upwelling du fait que les eaux mélangées se trouvent en surface.

L'analyse des relevés de salinité effectués par le CRODT dans quatre principales stations côtières au cours de la période 1970-1997 met en évidence un processus de salinisation progressif de l'eau de mer des côtes sénégalaises (Figure 1-14). En effet, on note des tendances nettement croissantes au niveau des quatre stations côtières. Le rythme de salinisation semble être plus accéléré à Mbour avec une hausse annuelle de 0,032 g/l. Au niveau de la Grande Côte, l'augmentation annuelle de la salinité est légèrement supérieure à 0,020 g $l^{-1}$ (0,023 g $an^{-1}$ à Saint-Louis et 0,022 g $an^{-1}$ à Kayar). Au Cap Vert, avec une hausse annuelle de 0,011 g $l^{-1}$, les relevés effectués au niveau de la station de Thiaroye font état d'un rythme de salinisation relativement plus modéré par rapport aux autres stations (Sambou et al., 2012).

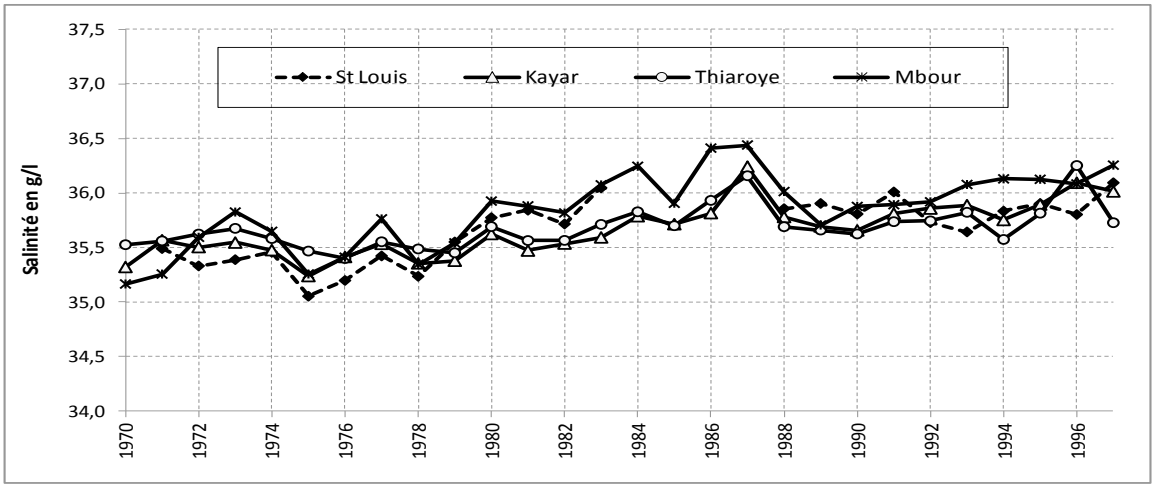



Figure 1-14 : Salinité moyenne de l'eau de mer dans quatre stations côtières. (Source :CRODT, 2006)

### 1.2.6.4.Evolution des vents côtiers

Les données de vent disponibles entre 1951-2004 sont illustrées à la Figure 1-15. Ces données sont recueillies par la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal. A partir de ces séries on peut effectivement noter une décroissance générale de la vitesse du vent au niveau des trois grandes stations météorologiques de Saint-Louis, Dakar et Ziguinchor. A Dakar (presqu'île du Cap Vert), la vitesse moyenne du vent a chuté d'un niveau maximum de 7 m $s^{-1}$ au début les années 50 à environ 4 m/s au début des années 2000. A Saint-Louis au nord du pays, à partir d'un maximum d'un peu plus de 5 m $s^{-1}$, la vitesse du vent n'est plus que de 3,3 m $s^{-1}$ en 2004. Durant toute la période, l'intensité moyenne du vent est nettement plus faible à la station de Ziguinchor comparée aux deux autres stations. Toutefois, à Ziguinchor également on note une tendance générale à la baisse. Ainsi, de 3 m $s^{-1}$ en 1951, la vitesse du vent est descendue à 1 m $s^{-1}$ en 2004.

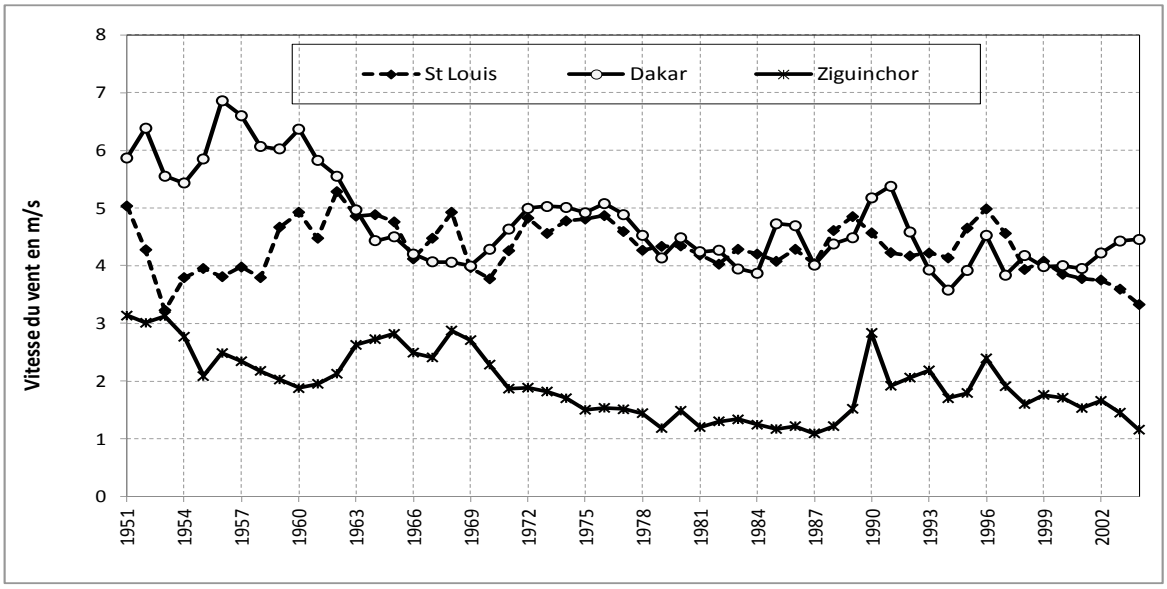



Figure 1-15 Vitesse moyenne du vent dans trois stations météorologiques. Source : Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal.

Les études récentes de Sambou et al (2012) ainsi que de Diop et al (2016). montrent une évolution en quatre périodes de la vitesse du vent depuis 1981.

La période 1981 - 1995 est caractérisée par des vents forts avec une moyenne de 5,45 m/s suivie d'une baisse jusqu'à 2001. Entre 2002 et 2004, on note une légère augmentation avec une

moyenne de 5,41 m/s avant de diminuer entre 2005 et 2010 avec une moyenne de 5 m/s (Figure 1-16). On note donc une forte variabilité du vent sur la période 1981-2010 (Sambou et al., 2012). La force du vent reste toujours sur une pente descendante entre 2010 et 2015 avec des pics pouvant aller jusqu'à plus de 6 m/s.

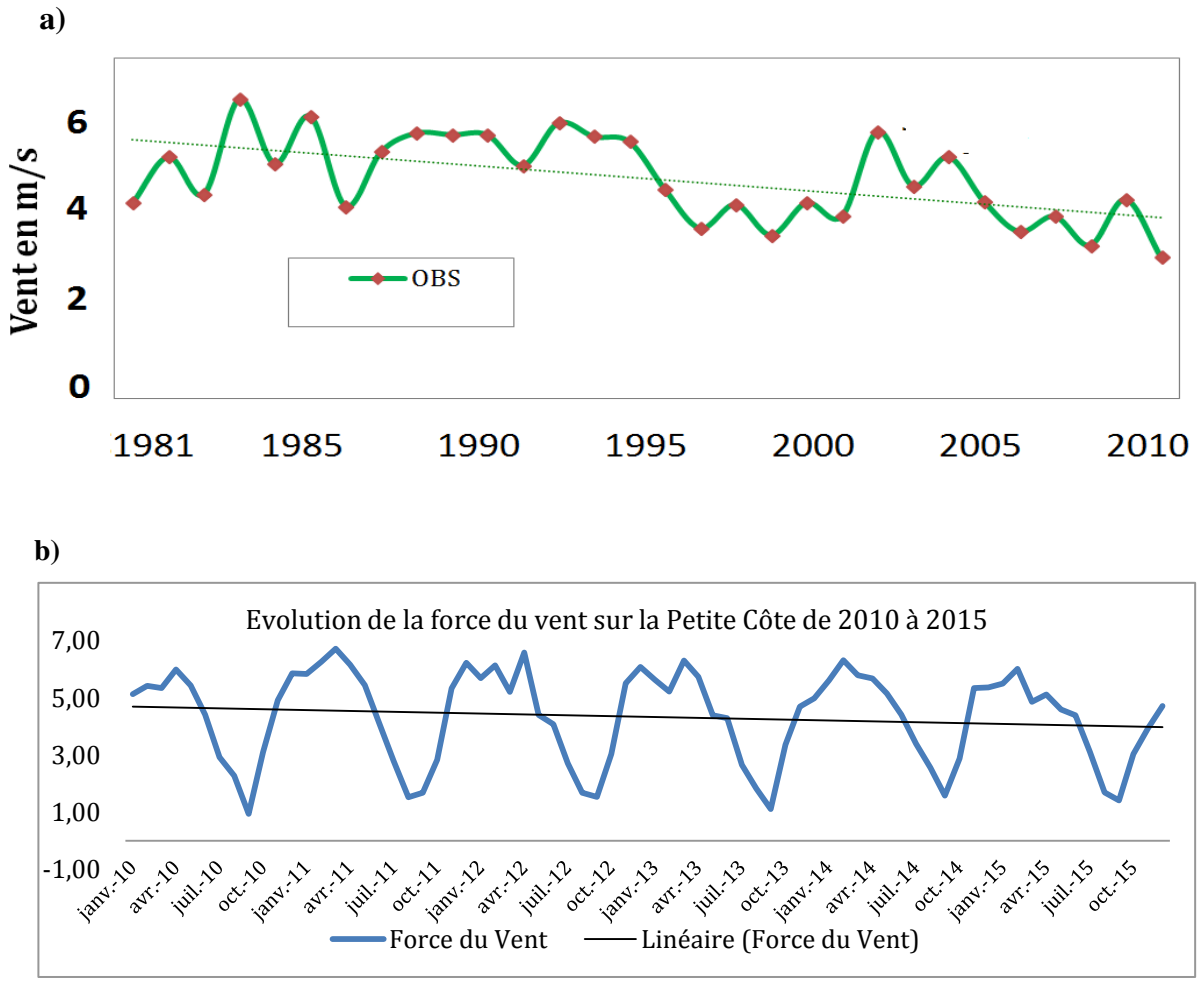



Figure 1-16 Evolution de la vitesse du vent observée de 1981 à 2010 (a) Source : Sambou et al., (2012) et de 2010 à 2015 (b). Source : (Diop et al, 2016).

### 1.2.6.5. Evolution du la composante méridienne de la vitesse du vent

Nous avons procéder, dans le cadre de ce travail, à des extractions de données satellitaires à l'aide des données composites du satellite CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) pour étendre les données ci haut sur l'évolution du vent au Sénégal à l'ensemble de la zone d'étude de cette thèse, c'est à dire jusqu'au Maroc (Figure 1-17), Dans l'ensemble on a une décroissance sur l'évolution temporelle dans chaque région avec toutefois des niveaux de production primaire graduelle du sud vers le nord de la région.

- Des niveaux globalement faibles et uniformément décroissants au Sénégal
- Des niveaux importants et relativement stables en Mauritanie, notablement plus élevés qu'au Sénégal.
- Des niveaux très importants et croissants dans la zone au sud du Maroc, zone siège de l'upwelling permanent (voir Figure 1-5)
- Des niveaux très importants et croissants dans la zone au nord du Maroc mais inférieurs à ceux du sud du Maroc

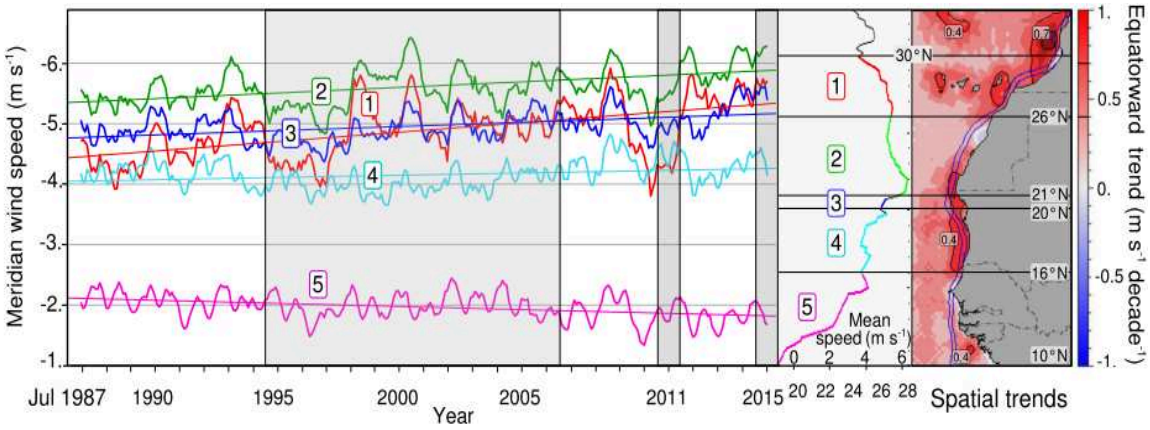



Figure 1-17 Evolution de la composante méridienne de la vitesse du vent le long des côtes de l'Afrique du Nord-Ouest moyennée mensuellement (moyennes mobiles sur 13-termes) à partir des données composites du satellite CCMP.(Sarre et al, In process).

### *Evolution de l'upwelling côtier*

La saison d'upwelling s'étend jusqu'en juin sur la côte nord et juillet sur la côte sud mais son intensité est maximale entre mars et avril (Figure 1-18). Cette situation peut être perturbée par des chutes de l'intensité des alizés de nord-ouest remplacés par des vents d'harmattan fort avec un réchauffement local. Au Sénégal, on note que la majeure partie de la saison d'upwellings se produirait avec des vents supérieurs à 6,0 m $s^{-1}$ (Roy et al, 1992). Les eaux froides issues d'upwelling se propagent du nord vers le sud (Laloë et Samba, 1990), envahissant la côte nord à la latitude de Saint-Louis (deuxième quinzaine d'octobre), puis celle de Kayar et Yoff (première quinzaine de novembre). L'épaisseur de ce courant superficiel oscille entre 20 et 50 m. L'intensité de l'upwelling est couramment mesurée par l'indice d'upwelling côtier (IUC) qui estime la quantité d'eau déplacée vers le large par le vent. Des valeurs élevées de cet indice sont notées jusqu'au mois de mai alors que la température commence à s'accroître dès le mois d'avril. Globalement, l'IUC reste supérieur à 1 $m^3$ $s^{-1}$ $m^{-1}$ entre décembre à avril (Oudot et Roy, 1991).

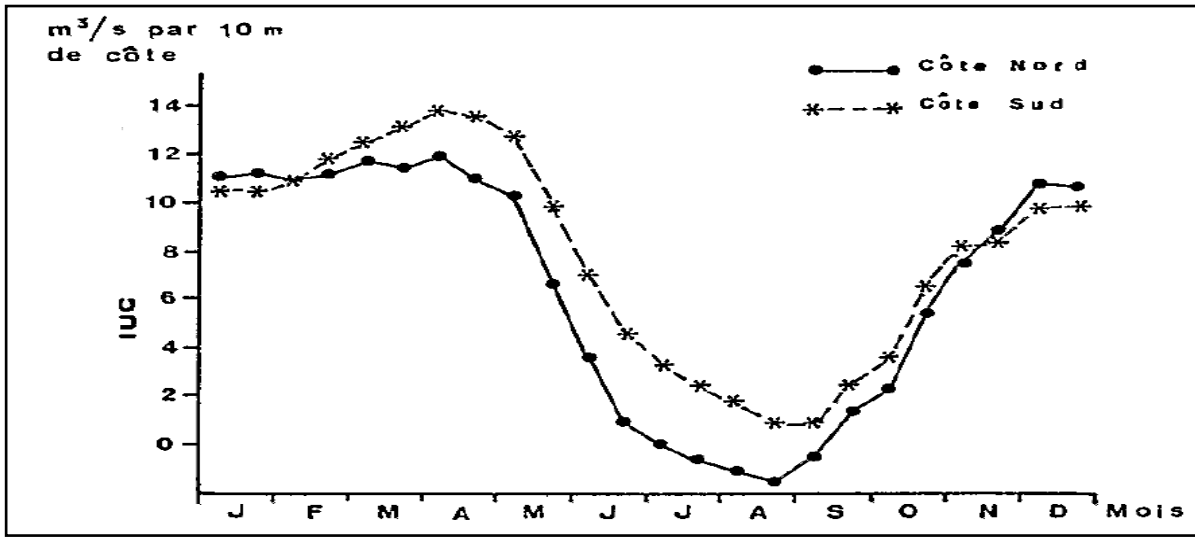



Figure 1-18 Saisonnalité de l'upwelling dans les côtes sénégalaises (Roy et al, 1992). .

Les données concernant l'upwelling côtier au Sénégal sont obtenues à travers le site de la NOAA. Pour cause de résolution spatiale, elles ont été cumulées par grande zone maritime (Grande Côte et Petite Côte). En termes de tendance, on peut noter que sur la période 1991-

2007, l'indice d'upwelling côtier est relativement stable (Figure 1-19). Les écarts entre zone maritimes sont également très faibles. Le fait le plus marquant durant cette période, est la légère baisse de l'indice d'upwelling durant le début des années 2000. Toutefois suite à ce léger affaiblissement, l'indice d'upwelling côtier a enregistré une hausse rapide et considérable entre 2005 et 2007(Sambou et al., 2012).

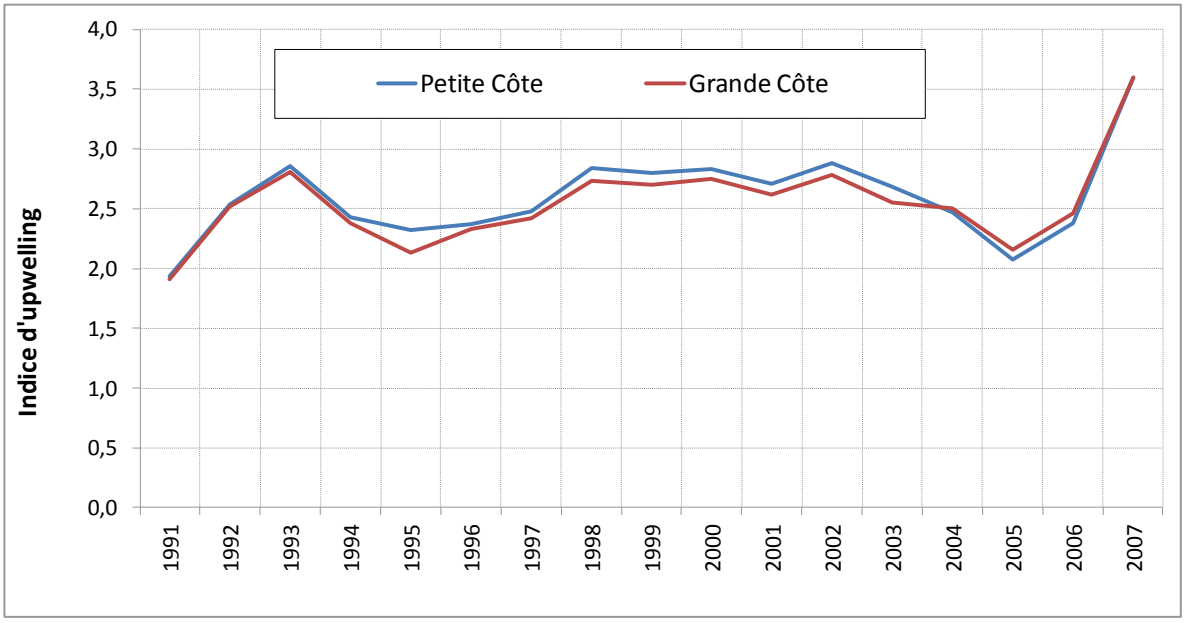



Figure 1-19 Indice d'upwelling côtier au niveau des côtes sénégalaises. (Sambou et al., 2012)

### 1.2.6.6.Evolution du niveau de la mer

Au Sénégal, les marées sont de type semi-diurne avec des marnages moyens variant entre 1,2 et 1,6 m en marée de vives eaux et entre 0,5 et 0,6 m en marée de mortes eaux, et sont pour cette raison des côtes microtidales. Les vagues engendrées en mer par le vent sont le moteur de courants de marée faible dont la vitesse est inférieure à 0,15 m $s^{-1}$ et donc ne peuvent transporter des sédiments (Domain, 1977).

Le niveau de la mer à Dakar présente des fluctuations saisonnières. Les enregistrements du marégraphe de Dakar au cours des 11 années de mesure (1943-1965) ont permis d'évaluer le taux d'élévation du niveau marin de 1,4 mm $an^{-1}$ (Elouard et al., 1977 ; Emery et Aubrey, 1991; Diop et. al., 2016). On observe un minimum entre janvier et mars-avril et un maximum entre juillet et septembre. Les écarts saisonniers du niveau marin ont varié entre 9 et 25 cm, soit une moyenne de 20 cm. Ces variations saisonnières du niveau de la mer sont attribuables aux upwellings (Verstraete, 1985).

Le niveau de la mer a été relativement bas de 1981 à 2003 (Figure 1-20). A partir de 2005, on note une augmentation de son niveau de 5 cm. Les projections montrent que cette augmentation va persister tout au long des trois décennies à venir. On note une faible variabilité dans le temps avec un écart-type de 0,80 comparée aux valeurs observées qui ont un écart-type de 1,84 (Sambou et al., 2012).

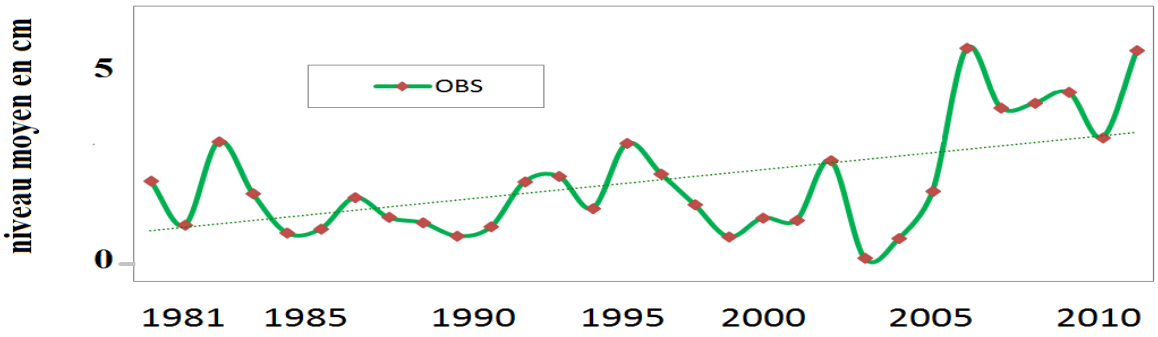



Figure 1-20 Augmentation moyenne du niveau de la mer sur la Petite côte au Sénégal de 1981 à 2010. (Source : Sambou et al., 2012)

### 1.2.6.7. Evolution de la production primaire

A partir des extractions de données satellitaires que nous avons effectuées à l'aide des capteurs SeaWiFS and MODIS, on peut observer l'évolution de la chlorophylle-a, proxy de la production primaire depuis une vingtaine d'années, sur l'ensemble de la région (Figure 1-21) relative sur l'évolution temporelle dans chaque région avec toutefois des niveaux de production primaire graduelle du sud vers le nord de la région.

- Des niveaux très importants au Sénégal avec une légère tendance à la baisse et une forte variabilité entre 3 et 6 mg $m^{-3}$
- Des niveaux très importants en Mauritanie, légèrement plus élevées qu'au Sénégal et avec une moyenne autour de 5 mg $m^{-3}$
- Des niveaux moyens et stables autour de 3 mg $m^{-3}$ dans la zone au sud du Maroc
- Des niveaux très faibles et stables autour de 1 mg $m^{-3}$ dans la zone au nord du Maroc

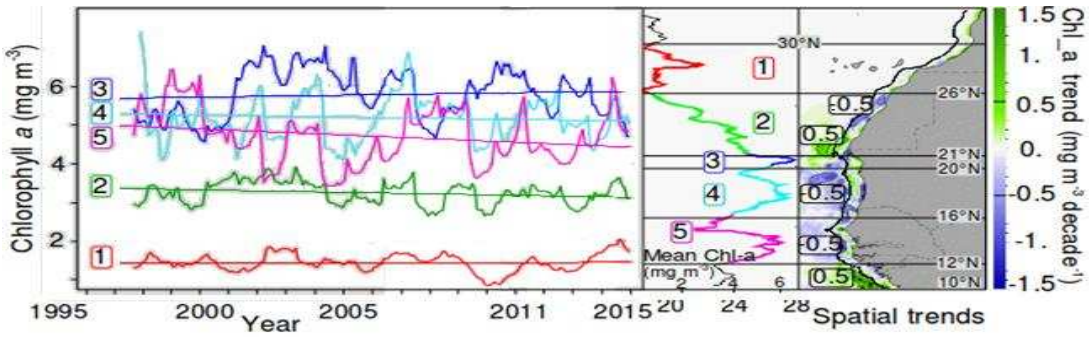



Figure 1-21 Evolution du la chlorophylle-a à partir des données spatiales SeaWiFS et des données corrigées du satelitte MODIS Aqua. (Sarre et al, In process).

### 1.2.6 bio-écologie des sardinelles de la zone nord-ouest africaine

Les sardinelles appartiennent à l'ordre des Clupéiformes, à la Famille des Clupéidés, au genre Sardinella et aux espèces Sardinella aurita et Sardinella maderensis.

Le genre Sardinella a été décrit par Valenciennes et il apparait pour la première fois dans son Histoire naturelle des poissons (Cuvier et Valenciennes) en 1847. Sardinella aurita (Valenciennes, 1847) est qualifiée de « sardinelle ronde » tandis que S. maderensis (Lowe, 1938) de « sardinelle plate » (Figure 1-22)

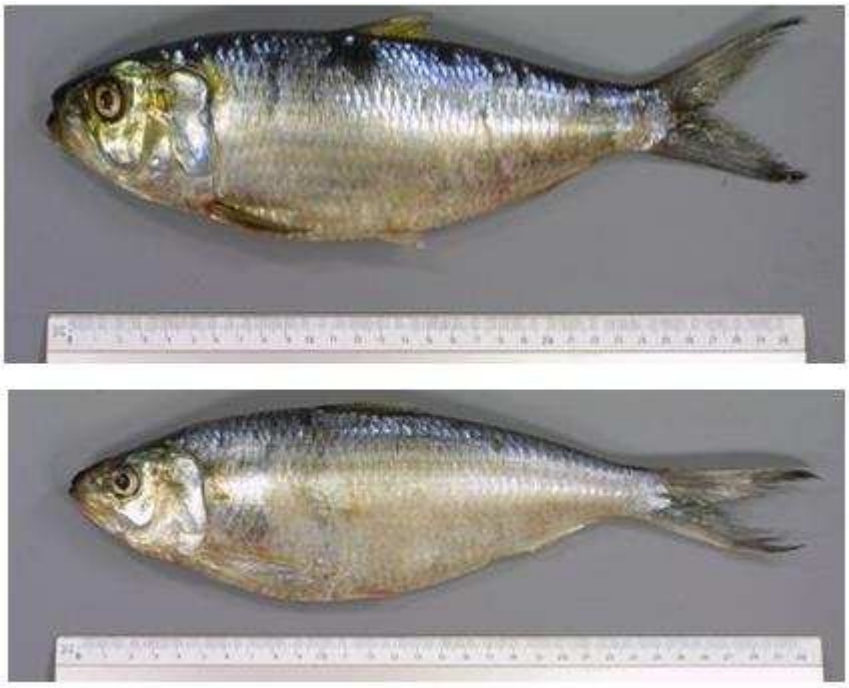


Figure 1-22 Sardinella aurita (en haut) et Sardinella maderensis (en bas) (Photos CRODT).

#### *1.2.6.1 Répartition globale des deux sardinelles*

L'aire de répartition des deux sardinelles en Afrique et à travers les autres continents ainsi que les migrations qu'elles opèrent en Afrique de l'Ouest, sont détaillées en paragraphe 2.1. Cette répartition très vaste pour la S. aurita concerne essentiellement les zones côtières de l'Atlantique tropical, de Gibraltar à l'Afrique du Sud (Saldanha Bay), dans toute la Méditerranée et même en Mer Noire; dans l'Atlantique ouest, du Golfe du Mexique au Brésil, ainsi que dans l'Indo-Pacifique (Indonésie, Mer de Chine) (Ghéno et Fontana, 1981 ; FAO, 2001). Tandis que S. maderensis occupe une aire plus restreinte que la sardinelle ronde, car on la trouve seulement en méditerranée méridionale et dans l'Atlantique Est, de Gibraltar à l'Angola.

#### *1.2.6.2 Regime alimentaire et reproduction des deux sardinelles*

Les deux espèces présentent des régimes alimentaires très similaires au cours de leur développement, tout au moins pour les phases de vie qui peuvent être observées au Sénégal. Cette similitude concerne aussi bien la taille des proies que la composition spécifique (Nieland, 1980 et 1982 ; Medina Gaterner, 1985).

##### *1.2.6.2.1 Sardinella aurita*

La Sardinella aurita est planctophage à alimentation opportuniste (Fréon, 1988), plus riche en phytoplancton chez les juvéniles. La sardinelle ronde sélectionne ses proies (Medina_Gaertner, 1985), les copépodes constituant une part importante de son régime. On note aussi la présence des euphausides et des larves de cirripèdes et cladocères. Au niveau des côtes sénégalaises (fonds de 10 m), l'essentiel des contenus stomacaux est constitué de vase et de sable (95%), pour les individus péchés à la senne de plage les détritus organiques prédominent. Plus au large, les individus pêchés ont un régime composé essentiellement de phytoplancton (Nieland, 1980).

Dans la zone Sénégalo-mauritanienne, la période de reproduction la plus importante débute en mai au sud de Dakar avec les adultes (LF > 25 cm) et les jeunes reproducteurs (18 cm < LF < 25 cm). Elle se poursuit en juin sur l'ensemble des côtes sénégalaises et vers le nord jusqu'au Cap Timiris (19°N) pour se terminer en juillet-août devant les côtes mauritaniennes. La ponte est fractionnée, une partie seulement des ovocytes arrivés à maturité étant éjectée. Chaque individu est capable de pondre plusieurs fois en une même saison de reproduction. Les larves se concentrent dans de vastes nourriceries, localisées plus particulièrement de la Gambie à la presqu'ile du Cap-Vert, le long des côtes mauritaniennes entre 17° et 18° N, à l'intérieur du banc d'Arguin et dans la baie du Lévrier. En octobre-novembre, on observe sur les côtes sénégalaises une seconde poussée reproductive à laquelle ne participent que de jeunes reproducteurs. Cette ponte est côtière et son volume varie fortement d'une année à l'autre. De janvier à mars, des pontes de faibles importances ont encore lieu aux abords du plateau continental et le devenir des larves entrainées alors vers le sud et le large est incertain (Conand, 1977; Boëly et al., 1978). Des travaux plus récents ont confirmé l'existence des deux périodes de pontes de la sardinelle ronde au Sénégal. En effet, Diouf et al., (2010) ont observé une reproduction continue durant toute l'année chez S. aurita. Des pics de maturation sont mis en évidence chez les femelles et les mâles de S. aurita en mars, avril et mai puis en septembre. Une oscillation saisonnière nette du RGS est notée chez S. aurita avec des valeurs minimales pendant la saison chaude (juillet et août) et maximales pendant la saison froide (novembre et décembre) période à laquelle 100 % des femelles sont matures. L'étude de Samba (2011) réalisée sur des échantillons collectés mensuellement de janvier à décembre 2010 au niveau de la Baie de Hann à Dakar sur la presqu'ile du Cap-Vert (Projet JEAI LABEP-AO), montre que la période principale de reproduction de S. aurita se situe en octobre-novembre au moment de la phase de transition saison chaude/saison froide au large de la presqu'Ile du Cap-Vert. Elle est précédée d'une période de reproduction d'amplitude beaucoup plus faible en février-mars, probablement occasionnelle. Les résultats de Diouf et al (2010) et Samba (2011) corroborent en partie les études antérieures. Il est à noter que les dates, le nombre et l'importance des pics de la première période de ponte sont variables d'une année à l'autre. La différence observée sur les périodes pourrait être aussi liée à une variabilité interannuelle du milieu qui a un impact réel sur le cycle de reproduction des espèces (Boëly, 1982).

Dans la zone Mauritanienne, la ponte aurait lieu de mai à juillet (Franqueville, 1980). Chavance et al. (1991) ont trouvé également deux périodes de reproduction, l'une en juillet-août et une autre en décembre-janvier. L'étude de Pascual-Alayón et al., (2008) conclue à l'existence d'une période principale de ponte (juin, juillet et août) et une seconde (novembre et décembre).

Ainsi, la reproduction de la sardinelle ronde est très irrégulière, la durée et l'importance des pontes pouvant varier dans une même zone et d'une zone à une autre.

#### *1.2.6.2.2 Sardinella maderensis*

Quant au régime alimentaire de S. maderensis, il est similaire à celui de la sardinelle ronde (Medina-Gaertner, 1985). Les copépodes et les larves de poissons sont aussi observés dans son régime alimentaire (Medina-Gaertner, 1985). Au voisinage de la côte sénégalaise, contrairement à la sardinelle ronde, le zooplancton est majoritaire dans le régime alimentaire des individus péchés à la senne de plage. Au voisinage de la côte sénégalaise (fonds de 10 m), l'essentiel des contenus stomacaux est constitué de vase et de sable (95 %) et pour les individus péchés à la senne de plage, les détritus organiques prédominent chez S. aurita alors que chez S. maderensis le zooplancton est majoritaire.

La ponte est continue toute l'année, mais il existe toujours au moins un maximum de reproduction, lequel se situe en début de saison chaude au Sénégal. Des œufs et larves de la sardinelle plate sont présents tout au long de l'année sur les côtes sénégalaises (Conand, 1977). On observe chez les jeunes reproducteurs des femelles aptes à se reproduire, ou en reproduction, sans interruption. Cependant, l'activité sexuelle est plus intense de février à octobre avec un maximum situé entre mai et août. Ce pic présente une forte variabilité interannuelle (Conand et Fagetti, 1971 ; Boëly, 1980 ; Camarena-Lurhs, 1986 ; Fréon, 1988 ; Diouf et al., 2010 et Samba, 2011). Certaines années, une ponte de moindre importance a lieu en novembre-décembre (Camarena-Lurhs, 1986 ; Samba, 2011). Les résultats obtenus par Diouf et al. (2010) montrent une reproduction continue durant toute l'année pour S. maderensis. La forte pasticité phentotique de cette espèce lui permet de ne pas être impactée pour ce qui concerne ses paramètres de croissance tout du moins par les effets du changement climatique et de la surpêche (Ba et al 2016). La période d'activité génésique présente des fluctuations moins marquées, avec des valeurs minimales en saison froide (octobre, novembre, décembre et janvier) et maximales en début de saison chaude (mars, avril et mai). La maturation des gonades est plus continue chez les femelles de S. maderensis. Les résultats de Samba (2011) mettent aussi en évidence deux périodes de reproduction principales chez S. maderensis une ponte étalée qui s'effectue de mai à août pendant la saison chaude et une autre en octobre-novembre pendant la phase de transition saison chaude-saison froide.

La ponte plus côtière que pour la sardinelle ronde s'effectue sur des fonds de 10 à 50 m. Les juvéniles et jeunes reproducteurs de la fraction sénégalaise du stock restent au niveau de la Petite Côte. C'est ainsi que le sous-stock de la Petite Côte est disponible toute l'année.

Conand (1977) rapporte que l'apparition de fortes densités larvaires se produit à une période assez voisine d'une année à l'autre avec cependant un décalage d'une ou de deux semaines. Il semble donc que les dates et l'importance des pics de période de ponte sont variables d'une année à l'autre.

## 1.3. Suivi des stocks de petits pélagiques en Afrique occidentale : historique des campagnes hydroacoustiques et développements récents

### 1.3.1. L'outil acoustique comme moyen de suivi des stocks de poissons pélagiques

Dès que leurs performances l'ont permis, les sondeurs furent utilisés par les pêcheurs pour détecter les poissons (Balls au début des années 30), puis par les scientifiques pour détecter et cartographier les ressources (Sund, 1935), les quantifier par échocomptage puis par échointégration (Forbes and Nakken, 1972). L'acoustique est très vite devenue un outil d'observation privilégié car il peut fournir simultanément, en continu, dans les plans vertical et horizontal, des données quantitatives et qualitatives sur la plupart des communautés, du plancton aux grands prédateurs (Brehmer 2006). Ceci permet d'étudier directement les interactions entre organismes (Brehmer et al., 2003 ; Bertrand et al. 2003). Très vite cette méthode non-intrusive est adoptée pour l'estimation des stocks de petits pélagiques et dès les années 70, l'échointégration a commencé à devenir une technique d'usage très répandu pour l'évaluation de biomasses avec d'abord les sondeurs à double faisceaux (« Dual beam ») mis au point aux USA par la firme Biosonics et dont le Sénégal s'était doté en 1985 pour équiper son navire le N/O Louis Sauger. Des avancées spectaculaires se sont opérées dans les années qui ont suivi avec

surtout l'apparition d'une part des sphères de calibration des sondeurs avec des protocoles standardisés de calibration adoptés par la communauté scientifique et d'autre part la mise au point par la firme SIMRAD en Norvège de la technique des faisceaux scindés (« Split Beam ») apportant en plus de la mesure de TS la possibilité de repérer précisément la position des poissons dans le faisceau acoustique et par conséquent de suivre la trajectoire de ceux-ci (tracking) et ajuster les meusres de TS. Le Sénégal a suivi cette évolution technique par l'acquisition en 2000 d'un système split beam avec l'arrivée du navire N/O Itaf Deme.

L'utilisation de l'acoustique comme moyen d'évaluation des stocks obéit cependant à de multiples contraintes avant d'arriver à des résultats exploitables. Ces contraintes sont directement liées à la méthode pour laquelle nous faisons ici un rappel sommaire des principes qui la régissent.

#### *1.3.1.1. Rappel du principe d'évaluation de biomasses par echointegration*

Contrairement aux ondes optiques ou électromagnétiques, les ondes sonores voyagent sur de longues distances dans l'eau avec peu de perte d'atténuation ou d'absorption. Ainsi, les instruments acoustiques qui transmettent et reçoivent des ondes sonores peuvent être utilisés pour détecter le poisson ou d'autres objets bien au-delà du champ visuel. Au fil des ans, les techniques acoustiques sont devenues de plus en plus sophistiquées et utiles dans le domaine de la recherche marine (Simmonds et MacLennan, 2005). Avec les echosondeurs multifrequentielles (Korneliussen and Ona, 2002) et même les systèmes sonar (Brehmer et al., 2006, 2007), il est devenu possible de collecter simultanément et en continu ce type de données délivrant des précieuses information sur les échos du zooplancton et des communautés de poisson sur de vastes étendues d'eau et dans un temps très court.

Quand des ondes acoustiques rencontrent une cible et particulièrement un organisme, une partie de l'énergie incidente est réfléchie, produisant une onde secondaire, qui se propage dans toutes les directions à partir de l'organisme. L'énergie réfléchie en retour vers la source est dite 'rétrodiffusée' (Urick 1975; Simmonds et MacLennan, 2005).

L'intensité de l'énergie rétrodiffusée est une fonction complexe de la taille de l'organisme, sa forme, son orientation et les propriétés de ses constituants, mais aussi de la fréquence acoustique ou la longueur d'onde (Stanton et Chu, 2000). En raison de la linéarité en acoustique sous marine (Foote, 1983), si on connaît la proportion de l'énergie incidente rétrodiffusée par un seul organisme, il est possible d'estimer l'abondance d'un groupe d'organismes de caractéristiques semblables (taille, forme, orientation et constituants).

La proportion d'énergie rétrodiffusée pour une fréquence donnée dépend de la section de rétrodiffusion de l'organisme $\sigma_{bs}$ (en $m^2$), « backscattering cross-section » dans la terminologie anglo saxonne et définie comme suit :

$$\sigma_{bs} = R^2 I_b/I_i \qquad \text{Eq. (1)}$$

Où
R est la distance de la cible à laquelle l'intensité est mesurée ;
$I_b$ est l'intensité rétrodiffusée (énergie par unité de temps et unité de surface) ;
$I_i$ est l'intensité de l'énergie incidente vers la cible.

La section de rétrodiffusion $\sigma_{bs}$ exprimée en décibels est appelée 'force de la cible', « target strength » (TS) en anglais et les deux paramètres sont liés par la relation (MacLennan et al., 2002):

$$TS = 10 \log_{10} (\sigma_{bs}) \qquad \text{Eq. (2)}$$

Lorsque la rétrodiffusion provient d'un ensemble d'organismes, on mesure plutôt le « coefficient de rétrodiffusion de volume » $s_v$ (en $m^{-1}$), "volume backscattering coefficient" en anglais :

$$s_v = \sum \sigma_{bs} / V0 \qquad \text{Eq. (3)}$$

où

$\sigma_{bs}$ est la section de rétrodiffusion des organismes individuels présents dans le volume.

$V_0$ est le volume échantillonné.

Le logarithme correspondant est la 'force de rétrodiffusion de volume' Sv (dB re 1 $m^1$), « volume backscattering strength » en anglais

$$S_v = 10 \log (s_v) \qquad (4)$$

Une moyenne de $s_v$ est souvent calculée sur une unité de distance donnée et sur une gamme de profondeurs; l'équivalent logarithmique du résultat est appelé 'force de rétrodiffusion de volume moyenne' (MVBS pour "mean volume backscattering strength ").

$$MVBS=10 \log10 \ [mean(s_v)]$$

La réverbération de surface $s_a$ « area-scattering coefficient » est définie comme étant l'intégrale de $s_v$ sur la colonne d'eau (MacLennan et al, 2002).

$$s_a = \int_{z1}^{z2} s_v \, dz \qquad (m^2 \, m^{-2}) \qquad (5)$$

Dans la pratique, cette grandeur est ramenée au mile nautique et devient alors

$$s_A = 4\pi (1852)^2 s_a \qquad (m^2 \, nmi^{-2}) \qquad (6)$$

$s_A$ est aussi appelé NASC pour « nautical area scattering coefficient » et représente dans la pratique de l'évaluation des stocks, la valeur de sortie de l'équipement principal utilisé en échointegration (Simrad EK500 ou EK60).

Pour une région échantillonnée donnée, et pour une espèce dont l'index de réflexion pour la classe de taille i est $TS_{(i)}$, la densité en nombre d'individus pour cette classe de taille est obtenue alors avec l'équation

$$\rho i = dSA \frac{1}{4\pi} * \frac{pi}{\sum_{i=1}^{max} pi * 10^{TSi/10}} \qquad (7)$$

Où pi représente le pourcentage de la classe de taille « i » dans la région échantillonnée

Si A est la surface de la région prospectée, le nombre total $N_i$ d'individus de taille « i » est :

$$N_i = A^* SA \frac{1}{4\pi} * \frac{ni}{\sum_{i=1}^{max} ni * 10^{TSi/10}} \quad (8)$$

Et si $W_i$ est le poids moyen de la classe de taille i, estimé à partir de la relation taille/poids de l'espèce, la biomasse de cette classe de taille dans cette région, est

$$Bi = Ni * Wi \quad (9)$$

Et la biomasse totale :

$$B = \sum_{i=1}^{n} Bi \quad (10)$$

Durant une campagne de prospection acoustique, le même calcul est effectué pour toutes les espèces cibles présentes dans la zone d'étude, les valeurs $S_A$ étant directement collectées à partir de l'équipement acoustique et la composition en classes de tailles à partir des pêches de contrôle.

Ce principe général de détermination de la biomasse impose donc plusieurs conditions et éléments à satisfaire pour un résultat fiable et comparable d'un navire à un autre, d'une région à une autre et d'un opérateur à un autre. En particulier, la qualité de l'échantillonnage biologique, la résolution dans l'échantillonnage acoustique et bien d'autres paramètres sont critiques pour arriver à des résultats fiables, ce qui a conduit au niveau de la région NWA à mettre sur pied un cadre de concertation sous régional pour pouvoir harmoniser les méthodes, étant entendu que les ressources à gérer dans l'espace régional sont des ressources partagées.

#### *1.3.1.2. «The Acoustic Planning Group NWA », un cadre de concertation sous-régional pour le suivi des stocks par l'acoustique*

Pour harmoniser les méthodes d'évaluation et lever ensemble toutes les contraintes liées à l'utilisation de l'acoustique pour l'évaluation des stocks, un Planning Group des activités acoustiques a vu le jour en 2000. Ce Planning Group composé du Sénégal, la Gambie, la Mauritanie, le Maroc et récemment la Guinée est organisée par la FAO dans le cadre des activités du projet GCP/INT/730/NOR «Coopération internationale avec le Programme Nansen: Aménagement des pêches et de l'environnement marin». Il joue un rôle de forum de discussion sur des questions importantes pour les campagnes acoustiques telles que la standardisation des méthodes, la recherche acoustique et s'occupe également de la coordination des campagnes acoustiques dans la région, y compris l'intercalibration des navires de recherche. Ce cadre de concertation a été déterminant dans la définition de critères généraux à adopter pour le suivi adéquat des stocks en Afrique de l'Ouest à partir des campagnes hydroacoustiques, critères relatifs au design des campagnes, à la calibration des équipements, à l'identification des échotraces ainsi que le calcul des biomasses durant les campagnes. Bien que régis pour les campagnes en Afrique du Nord-Ouest, ces principes pourraient par ailleurs être utiles pour les autres régions en Afrique.

#### 1.3.1.2.1. Design des campagnes

L'harmonisation dans la conception des campagnes est primordiale pour aboutir à des résultats comparables dans la sous région. Cette conception doit tenir compte des espèces en présence, du taux d'échantillonnage aussi bien acoustique que biologique, de la vitesse de prospection etc.

##### *1.3.1.2.1.1. Espèces ciblées en Afrique du Nord-Ouest*

Le critère de base est que les espèces à retenir comme espèces cibles pour chaque pays doivent être autant que possible identifiables sur les échogrammes et d'importance commerciale pour le pays en question. Si ce critère s'avère difficile, l'espèce doit être incluse dans un « groupe cible » plus facile à identifier. Les espèces cibles et groupes cibles typiques retenues dans la région NWA sont:

- sardinelles (les deux espèces) ;
- sardine ;
- anchois ;
- bonga ;
- chinchards ;
- groupe pélagiques 1 des autres clupéidés (poissons pélagiques clupéiformes) ;
- groupe pélagiques 2 des autres carangidés et espèces associées.

##### *1.3.1.2.1.2. Couverture spatiale*

Il est connu en Afrique de l'Ouest que les petits pélagiques sont rencontrés dans les fonds inférieurs à 500 m. La zone de couverture adoptée par chaque pays s'étend alors des fonds de 500 à 10 ou 15 m à la côte dépendant des tirants d'eau des navires utilisés.

Les transects sont choisis pour être parallèles entre eux et si possible perpendiculaires à la côte. L'espacement recommandé dans la région entre les transects est de 10 miles nautiques mais dans les régions connues avec des concentrations particulièrement importantes, cet espacement peut être réduit pour augmenter le taux d'échantillonnage. A chaque fois aussi que, durant une campagne de prospection acoustique, des détections particulièrement élevées ont été enregistrées dans une zone spécifique, il est recommandé par le Planning Group de refaire la couverture de cette zone avec un espacement réduit si le timing de la campagne le permet.

##### *1.3.1.2.1.3. Couverture saisonnière*

Pour une région nouvellement prospectée, il est recommandé avant la campagne de recueillir toutes les données utiles sur la présence saisonnière et spatiale des espèces cibles pour mieux définir la période de campagne et le taux d'échantillonnage choisi. La période idéale recommandé par le Planning Group est celle où:

- les espèces cibles peuvent être facilement identifiées sur les échogrammes;
- les espèces cibles ne sont pas mélangées avec le plancton et les autres espèces
- les conditions météorologiques sont favorables
- les schémas migratoires des espèces cibles sont connus
- les pays qui partagent les mêmes ressources pélagiques font simultanément une couverture de leur zone.

Ces conditions varient d'un pays à un autre dans l'espace CCLME et sont difficilement réunies en même temps, De 1995 à 2006, le navire de recherche norvégien R/V Dr Fridtjof

Nansen a prospecté la zone CECAF du NWA dans la période entre octobre-décembre. Dans la période 2003-2005, les mêmes zones ont été aussi couvertes entre mai et juin. Ces campagnes ont été les seules principales évaluations directes dans la région dans cette période, c'est pourquoi il a été recommandé de continuer la série ainsi constituée avec les navires des institutions nationales et pour les mêmes saisons que précédemment couvertes par le R/V Dr Fridtjof Nansen.

#### 1.3.1.2.1.4. *Coordination des campagnes en Afrique de l'Ouest*

Etant conscient que les ressources pélagiques partagées dans la région doivent être suivies ensemble, le Planning Group a recommandé de réaliser les campagnes dans la région d'une manière synchronisée. Ces campagnes coordonnées permettent alors d'avoir une couverture régionale des stocks pour la même période. La période d'octobre-décembre est privilégiée dans ce choix même si les navires locaux sont encouragés à effectuer d'autres couvertures saisonnières.

#### 1.3.1.2.1.5. *Couverture jour ou nuit*

Bien que l'impact du cycle nycthéméral soit signalé sur le comportement des espèces pélagiques, il n'a pas encore été trouvé de facteurs de correction jour/nuit applicables pour les campagnes acoustiques et aucune recommandation n'a été faite dans la sous région à ce propos. Les campagnes sont alors effectuées au Sénégal en continu de jour et de nuit (voir recommandations en paragraphe 1.3.3.3.). La Mauritanie faisait ses campagnes seulement le jour mais pour des raisons d'harmonisation régionale a choisi depuis les recommandations du Planning group de les faire en continu. Le Maroc faisait des campagnes continues jour-nuit mais a choisi depuis 2012 de les restreindre sur les jours en travaillant toutefois la nuit pour mener des opérations de chalutages nocturnes et des collectes de paramètres environnementaux avec la sonde CTD.

#### *1.3.1.2.1.6. Intervalle d'intégration*

Un intervalle d'integration standard de 5 nm a été choisi par le Planning Group lors des campagnes acoustiques. Pour les zones particulièrement denses en concentrations de poissons pélagiques, il est toutefois possible de choisir un intervalle de 1 mile nautique. Un changement d'intervalle d'intégration en cours de prospection doit être pris en compte lors de l'estimation des biomasses.

#### *1.3.1.2.1.7. Vitesse de prospection*

Il n'est pas possible de standardiser les vitesses de prospection puisque les performances des navires peuvent différer. La vitesse optimale va dépendre de la relation entre la vitesse et le bruit généré par le navire, le bruit du navire étant connu pour augmenter brutalement lorsque la vitesse s'approche de son maximum admissible. La vitesse suggérée au niveau du Planning Group se situe entre 8 et 12 nœuds.

Pour le navire sénégalais N/O Itaf Dème, la vitesse de prospection qui était de 10 nœuds pour les premières campagnes effectuées avec le navire, est passé à 9 voire 8 nœuds depuis quelques années compte tenu de la baisse des performances du moteur principal du navire liée à l'âge et l'utilisation soutenue du navire.

1.3.1.2.2. Calibration des équipements

#### 1.3.1.2.2.1. *Périodes de calibration*

Pour assurer la comparabilité des résultats entre campagnes et entre navires de la sous région, le Planning Group recommande d'effectuer régulièrement les calibrations, de préférence juste avant les campagnes et au moins une fois l'année. Le facteur de correction issue de ces calibrations peut alors servir pour réactualiser les performances du sondeur même si la calibration est effectuée après la campagne. Toutefois si des dommages importants sont intervenus sur l'équipement, il peut être difficile de réactualiser les paramètres du sondeur si la calibration est faite après la campagne.

#### *1.3.1.2.2.2. Directives générales observées lors des opérations de calibration en NWA*

Les navires dans la sous région sont équipés de sondeur Simrad EK60 et le navire Fridtjof Nansen d'un sondeur Simrad EK500 ; il a été recommandé d'utiliser le programme de calibration LOBE intégré dans le système Simrad avec une boule de cuivre standard CU60 pour la fréquence 38 kHz. La procédure doit alors consister à déplacer la boule dans le faisceau acoustique du sondeurdu transducteur et enregistrer les valeurs de TS mesurées à chaque position; les facteurs de correction sont alors calculés et insérées dans les tables de paramètres de calibration du sondeur. L'étape suivante consiste alors à calibrer les valeurs de Sa. La sphère est alors placée dans l'axe du transducteur avant d'enregistrer les valeurs de Sa. La valeur théorique est ensuite calculée puis comparée avec la valeur précédemment mesurée. Les gains du sondeursont ensuite ajustés afin que les mesures correspondent aux valeurs nominales de la sphère de calibration.

#### *1.3.1.2.2.3. Intercalibrations*

Vu que l'objectif dans la sous région a été de réaliser des couvertures simultanées des stocks de petits pélagiques, il était fondamental que les résultats issus des différents navires soient comparables et c'est pourquoi la réalisation d'intercalibrations entre ces navires s'est imposée. Le protocole régissant ces intercalibrations a été défini au sein du Planning Group et la procédure consiste pour les navires à inter-calibrer de suivre la même direction (Figure 1-23), à la même vitesse, avec une distance constante entre les navires, les mêmes réglages au niveau des sondeurs (puissance émises, durée d'impulsion, fréquence d'impulsion etc.).

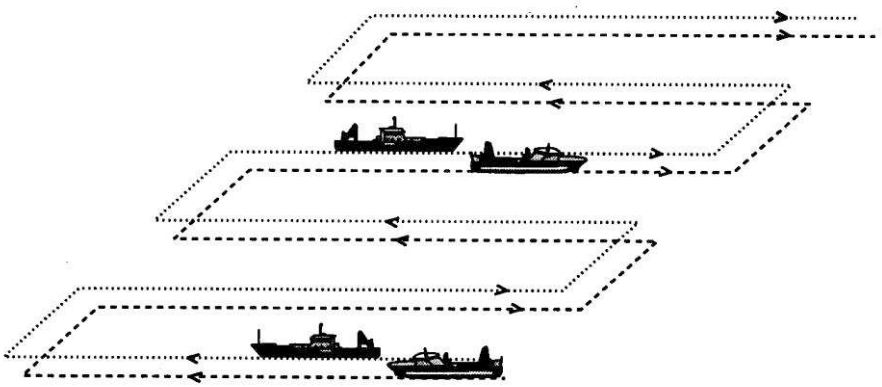


Figure 1-23 Illustration de l'intercalibration entre deux navires (Source :MacLennan and Simmonds, 1992).

Les enregistrements (logs) des navires sont synchronisés de telle sorte que les intégrateurs se réinitialisent non pas en même temps mais à la même position. Quand le navire en avant donne le top à une position donnée, le navire en arrière doit attendre d'arriver à la position indiquée pour initialiser son enregistrement (log). Les valeurs Sa sont alors enregistrées en continu sur un intervalle de 1 mile nautique et sur une distance minimale de 40 nm. L'intercalibration doit être réalisée dans une zone où les populations sont dispersées avec des densités différentes et si possible aussi bien dans les petits fonds que les grands fonds.

Plusieurs opérations d'intercalibration ont été tenues en Afrique l'Ouest et un recueil des résultats obtenus est disponible (cf. Annexe 6.2.1 ; Sarré et al, 2012).

#### 1.3.1.2.3. Mesures de bruit des navires

Après la calibration du sondeur, la recommandation est faite par le Planning Group de procéder à la mesure du niveau de bruit du navire pour déterminer le niveau minimum des échos détectables en se basant sur la procédure décrite dans le manuel d'utilisation de l' EK500 ou de l'EK60 et décrite dans Foote (1987). Pour l'EK60, la procédure complète est décrite dans le manuel. Le niveau de bruit de fond a en général peu d'effet sur les estimations d'abondance de poissons par l'acoustique, mais peut présenter un biais dans des situations spécifiques. Pour le navire N/O Itaf Dème, les différents tests effectués situent le niveau de bruit à une valeur inferieure à la valeur limite admissible de -135 dB. Par contre, pour le navire N/O Al Amir, il a été signalé dans le passé un niveau de bruit au delà de cette limite admissible.

#### 1.3.1.2.4. Identification des echotraces

##### **1.3.1.2.4.1.** *Conduite des pêches de contrôle*

Les traits de chalut doivent être effectués aussi bien le jour que la nuit pour identifier les échotraces observés sur l'échogramme. Il n'est pas recommandé de programmer la position d'une station de chalutage à l'avance, les traits de chaluts devant être effectués lorsque des concentrations significatives sont rencontrées. Cependant, des coups de chaluts supplémentaires doivent aussi être effectués dans des zones à faibles concentrations. Il est recommandé que le dispositif de pêche soit équipé d'une net-sonde pour s'assurer que l'échantillonnage est effectué à la profondeur où les échotraces ont été observées. A la différence des chaluts commerciaux, le chalut pélagique scientifique doit être de maille fine pour être moins sélectif.

Lors des pêches de contrôle pour l'identification des échotraces, la vitesse de nage des poissons doit être prise en considération. La sardinelle, le maquereau et le chinchard ont une vitesse de déplacement très élevée. Le navire doit mettre en jeu le maximum de ses capacités de propulsion pour échantillonner ces espèces

A bord du N/O Itaf Deme, la vitesse moyenne de chalutage a toujours été comprise entre 3 et 4.5 nœuds, la vitesse maximale étant déployée lorsque les sardinelles sont ciblées.

##### *1.3.1.2.4.2. Fréquence des pêches de contrôle*

Lors de la programmation des campagnes acoustiques, il faut allouer environ 20% du temps de prospection pour les opérations de pêche. Le temps alloué pour la pêche dépend en fait de la durée moyenne d'un trait de chalut, qui peut différer d'un navire à un autre. Normalement la pêche de contrôle devrait être entreprise au moins tous les 30 miles nautiques, pour une allocation correcte de valeurs de $S_A$ aux différentes espèces.

Il est important d'allouer un temps suffisant pour atteindre au moins six traits par jour

Selon les espèces à échantillonner, ces traits de chaluts doivent être répartis aussi bien dans la zone côtière (moins de 50 m de profondeur) qu'en zone profonde. La fréquence est par ailleurs rehaussée dans les aires à fortes concentrations.

A bord du N/O Itaf Deme, les pêches de contrôle durent 30 mn et la fréquence est liée à l 'importance des détections rencontrées.

#### *1.3.1.2.4.3. Echantillonage des captures*

La pêche doit fournir des échantillons pour avoir la composition en espèces et les distributions de tailles des populations observées sur l'échogramme (Stromme, 1992). Si la capture est importante, il est nécessaire de prendre un sous-échantillon de la capture totale. Si possible un minimum de 100 individus de chaque espèce cible doit être échantillonné pour chaque chalut afin de convertir les valeurs $S_A$ enregistrées des différentes espèces ou groupes d'espèces de poissons en nombre par classe de taille. Pour chaque station et espèce cible, un minimum de 10 individus par classe de taille doit être mesuré en longueur et poids afin de déterminer la relation taille-poids utilisée dans l'estimation des biomasses. Il est recommandé également de recueillir les informations annexes telle la maturité, le sexe, le contenu d'estomac, etc. Ceci contribuera dans la délimitation des zones de reproduction, la période de ponte et autres paramètres écologiques utiles pour la gestion des stocks.

Les otolithes des espèces cibles doivent être collectés et lus le plus tôt possible, de préférence à bord. Si ceci n'est pas possible, les otolithes doivent être préparés et montés conformément au et être lus immédiatement après la fin de la campagne.

#### *1.3.1.2.4.4. Classification des échotraces*

L'allocation des valeurs $S_A$ (ou « scrutinising ») aux espèces cibles est assez subjective et une attention particulière doit être accordée à l'harmonisation des méthodes pour que les opérateurs de la sous région analysent les échogrammes de la même façon. Le « scrutinising » peut être fait de deux façons :

1. Directement sur la base de la forme et autres caractéristiques des bancs sur les échogrammes; les valeurs allouées sont vérifiées régulièrement par des pêches de contrôle. Ceci est la méthode recommandée dans la plupart des situations. Cependant, lorsqu'on est en présence de populations très dispersées et qu'aucun schéma typique ne se dégage des échogrammes, la méthode indirecte doit être appliquée

2. Indirectement sur la base de la composition des traits de chalut; dans ce cas le chalutage ne vise pas à un type spécifique de bancs, mais plutôt des couches de populations dispersées et de densités variables à l'intérieur desquelles aucun banc isolé ne peut être identifié (situation rencontrée fréquemment la nuit où beaucoup d'espèces de poisson sont dispersées).

Dans la région NWA, les deux méthodes d'allocation sont fréquemment appliquées. Les petits pélagiques se regroupent généralement en bancs spécifiques, et les différents bancs sont alloués sur la base de leur forme, profondeur, densité, etc. Cependant, la nuit les bancs peuvent se disperser et la méthode indirecte est très souvent appliquée. Pour augmenter la fiabilité des allocations de valeurs $S_A$, il est recommandé que les échogrammes soient comparables d'une année à l'autre. Cette comparabilité des échogrammes peut être améliorée par:

- la conduite des campagnes durant les mêmes périodes de l'année
- l'harmonisation de la vitesse des navires et réglages des affichages de telle sorte que le même banc produise toujours le même échogramme sur l'échointégrateur.

L'expérience des opérateurs est également déterminante dans la fiabilité des allocations effectuées. C'est pourquoi le Planning Group a recommandé que :

- les mêmes opérateurs soient choisis pour effectuer cette tâche lors des prospections;
- pour chaque zone et chaque saison, un catalogue des échogrammes des bancs déjà identifiés dans le passé par chalutage soit élaboré ; cette référence visuelle doit être disponible à bord pour consultation durant les campagnes.
- des échanges d'échogrammes typiques soient effectués entre les pays.
- des ateliers où les scientifiques échangent leurs expériences dans l'identification des espèces cibles, soient organisées.

La méthode indirecte est moins précise que la directe.

### 1.3.2. Historique des campagnes hydroacoustiques au Sénégal

Plusieurs types de campagnes d'écho-prospection acoustique ont été menés durant les quatre dernières décennies dans la région nord-ouest africaine. Au Sénégal, on retient dans le passé les campagnes CAP et Echosar mais aussi des campagnes acoustiques avec les anciens navires du CRODT (N/O Laurent Amaro et N/O Louis Sauger). Mais, la série la plus régulière et la plus récente est celle du navire de recherche norvégien R/V Fridtjof Nansen présent dans la région depuis 1995 dans le cadre du programme FAO/Nansen. Depuis 2006, ce programme est terminé et il a été demandé aux institutions locales de continuer la série du navire norvégien à l'aide des navires locaux (N/O Itaf Dème du Sénégal, Al Awam de la Mauritanie et Al Amir du Maroc). Dans cette perspective, plusieurs intercalibrations ont été effectuées entre 2004 et 2005 entre les navires locaux et le N/O Fridtjof Nansen pour calibrer les équipements et rendre comparables les résultats (Sarre et al, 2005).

Les campagnes CAP et Echosar 1 à 4 du navire Capricorne se sont déroulées de 1973 à 1982. En 1983, lorsque le CRODT fut équipé d'un ensemble d'écho-intégration, la campagne Echosar 5 fut réalisée en coopération avec le navire Capricorne cette année-là. Les campagnes Echosar (6 à 15) se sont poursuivies alors de 1984 à 1989, à bord du navire Laurent AMARO jusqu'en 1985 puis à bord du navire Louis SAUGER. Ces campagnes couvraient le plateau continental Sénégambien entre les fonds de 10 et 200 m. En outre un programme limité à la Petite Côte du Sénégal a permis d'effectuer six prospections de 1984 à 1986. En 1986 une "Cooperative Survey" réunit à Dakar les navires Dr. Fridtjof Nansen, Cornide de Saavedra, N'diago et Louis Sauger pour une intercalibration. En 1989, le navire André Nizery réalisa une campagne de mesures de TS in situ par dual beam (120 kHz) (Marchal, 1989).

#### *1.3.2.1. Les campagnes Echosar au Sénégal*

Les premières campagnes hydroacoustiques au Sénégal ont démaré dans les années 50 avec les campagnes de prospection du N/O Gérard Tréca opéré par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) devenu plus tard IRD.

Vinrent ensuite les campagnes hydroacoustiques initiées en 1973 dans le cadre du programme conjoint **Echotrace** (**Echo**prospection des stocks **tr**opicaux de l'**A**tlantique **C**entre **E**st) piloté par l'ORSTOM et le Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO). Ce programme qui couvrait la zone géographique s'étalant du Cap B1anc-en Mauritanie au Cap Roxo à l'extrême sud Sénégal avait un double objectif : surveiller l'évolution des stocks de poissons pélagiques et semi-pé1agiques par l'estimation de 1eur biomasse, étudier la localisation des différentes espèces et en déduire leurs déplacements en fonction des saisons et des conditions de milieu. De 1973 à 1977, huit campagnes ont été réalisées (Marchal et Boè1y 1977 ; Ger1otto et al. 1978). D'importants changements dans la répartition des espèces ont pu être notés lors de ce programme, notamment l'apparition massive de Balistes carolinensis durant cette période (Caveriviere et al. 1980) et une extension de la couverture de Sardina pilchardus vers les sud à partir du Cap Blanc qu'il ne paraissait guère dépasser auparavant (Domanevski et Barkova, 1979 ; Fréon et Stéquert, 1978).

L'intérêt suscité par ce programme a poussé l'ORSTOM et le CRODT à concevoir un sous programme d'évaluation acoustique nommé Echosar, qui prévoyait plusieurs campagnes à différentes saisons au cours des années 1980-82. Le sous-programme Echosar concernait plus particulièrement les stocks de clupéidés et autres petits pélagiques situés dans la zone de balancement du "front thermique nord" soit entre 10°N (Bissagos) et 21 ° N (Cap Blanc) et avait pour objectifs principaux: i)Evaluer l'abondance des populations de poissons de la zone sénégalo mauritanienne au cours de la période, où le front thermique se trouve le plus au nord ; ii) Etudier la répartition des populations en fonction des conditions de milieu et compléter les observations sur les migrations des espèces en relation avec le déplacement du front thermique ; iii) -Poursuivre la surveillance du stock des balistes et compléter les observations des campagnes "Guinée" concernant l'extension vers le nord de cette espèce.

Toutes ces campagnes acoustiques ont eu lieu avec le navire de recherches français le NO Capricorne. C'est en mars 1983 qu'a eu lieu la première campagne d'écho-prospection jamais réalisée par un navire de recherches sénégalais. Ce fut avec le navire NO Laurent Amaro. Pour estimer de manière indépendante des statistiques de pêches, l'abondance de ses ressources en poissons pélagiques côtiers, le Sénégal s'était alors attelé à acquérir son propre matériel, ce qui fut fait dans le cadre du "Fisheries Assesment Project" financé en partie par l'USaid. Le bateau de recherches sénégalais NO Laurent Amaro fut alors équipé d'un ensemble complet d'écho-intégration BIOSONICS venant, au niveau régional, compléter le N/O N'Diago qu'avait acquis le CNROP de Nouadhibou en Mauritanie et permettant ainsi d'estimer la répartition des principales espèces qui migrent, en fonction des saisons hydrologiques tout le long du plateau continental sénégalo-mauritanien. Le navire océanographique en service de 1985 à 1995 fut le Louis Sauger (37 m de longueur, 280 tonneaux pour le Tonnage Jauge Brut TJB, 800 chevaux de puissance motrice) gréé au chalut pêche arrière, et équipé d'un matériel électronique classique de navigation.

Les caractéristiques des campagnes Echosar ainsi que le détail des méthodologies utilisées pour l'estimation des biomasses sont résumés dans les sous chapitres suivants.

#### 1.3.2.1.1. Target Strength (TS) utilisé

Les résultats de Domaine et Nakken (1975) qui ont montré que, pour une espèce donnée, l'indice de réflexion des poissons TS (Target Strength) est fonction de leur longueur, ont servi de base dans les estimations de TS des poissons tropicaux aussi bien avec les campagnes du N/O Capricorne que celles du navire norvégien Dr Fridtjof Nansen. Lors de la campagne Echosar 3, des mesures de TS in situ par la méthode de la cage ont été réalisées sur des sardinelles rondes,

Sardinella aurita. Au cours de cette expérience, trois plongées sous-marines ont été effectuées qui ont permis de vérifier que le comportement du poisson semblait normal; les poissons étaient uniformément repartis dans la cage, nageaient en position proche de l'horizontale et aucun ne montrait de signe de "faiblesse" (Levenez et al. 1982). Les résultats de cette expérience de mai 1981 (Marchal et Josse, 1982) avaient permis de calculer un index de réflexion moyen TS =-34.4 dB $kg^{-1}$ pour des sardinelles rondes, de longueur à la fourche LF = 22.7 cm). Cette mesure avait servi de base à l'estimation de la TS pour les campagnes Echosar 3, 4 et 5.

Des mesures de TS plus récentes ont été réalisées dans la région, elles sont présentées en paragraphe 2.5.2.

#### 1.3.2.1.2. Fréquences de travail

L'équipement utilisé durant ces campagnes Echosar était un échosondeur dual beam Biosonics 101 et la fréquence de travail était de 120 kHz, l'émission se faisant à travers un transducteur à faisceau étroit dont l'angle entre les points à -3db du diagramme de directivité était de 10°. Le transducteur était alors remorqué latéralement par rapport au navire au moyen d'une base delta ENDECO S 17 à la profondeur de 3 m sous la surface.

#### 1.3.2.1.3. Estimations des biomasses lors des campagnes Echosar

Pour un système acoustique donné, constitué d'un sondeur, muni d'un gain variable dans le temps (TVG, Time Varied Gain en anglais, amplification compensant les pertes d'énergie sonore dues à la dispersion géométrique et à l'absorption du milieu, ainsi que d'un intégrateur d'échos), l'amplitude du signal de sortie de l'intégrateur est proportionnelle à la densité en poisson dans le volume d'eau échantillonné par le système (Forbes et Nakken. 1972). On a alors la relation

$$\overline{d} = c\overline{M} \qquad (11)$$

où $\overline{d}$ est la densité moyenne en poisson,

« M » la valeur moyenne du signal de sortie de l'intégrateur, traduction graphique de l'intégration des intensités des échos ou carrés des tensions électriques V correspondantes :

$$M = \int V^2 \qquad (12)$$

« c » un coefficient de proportionnalité encore appelé constante d'étalonnage ou constante d'intégration.

La détermination du coefficient de proportionnalité c se faisait par différentes méthodes dont la plus connue est la méthode de la cage (Johannesson et Loss, 1973) qui consiste à introduire dans une cage en filet une densité connue de poisson m et à mesurer l'intégration correspondante des échos (M). Cette grandeur expérimentale dépend à la fois des performances de l'ensemble sondeur échointégrateur et de la nature des cibles.

Pour une cible donnée cette valeur est constante tant que les caractéristiques de l'appareillage utilisé restent inchangées, d'où la nécessité d'effectuer un étalonnage de l'ensemble de l'équipement acoustique. Lorsque la constante d'intégration est déterminée, on calculait la densité moyenne en poisson à partir de la formule (11) aussi bien pour la totalité de l'aire prospectée que pour des secteurs plus restreints. La biomasse estimée correspond alors au produit de la densité moyenne par la superficie de la zone considérée :

$$\hat{B} = \overline{d} \times A \qquad (13)$$

1.3.2.1.4. Contraintes liées aux campagnes Echosar

Les contraintes majeures durant les évaluations du programme Echosar concernaient l'échantillonnage des poissons pélagiques, la détection du fond mais également l'intégration de la couche de surface.

En effet, le Laurent Amaro était seulement doté d'un chalut démersal. Il s'agit d'un chalut de fond de 4m d'ouverture verticale et 12 m d'ouverture horizontale. Un chalut pélagique de 10 m x 10 m d'ouverture avait été testé lors du programme ; ce chalut qui était destiné plutôt aux captures de larves de poissons, n'était pas équipé de netsonde et les résultats étaient décevants.

La seconde difficulté était liée à la reconnaissance du fond ; en effet dans les cas où des bancs denses se trouvaient en quasi-continuité avec le fond un blocage avait souvent lieu avec perte du fond réelle. Ceci entrainait un biais important dans l'estimation de la couche de fond.

Enfin, lors d'une campagne d'écho-intégration classique les réponses acoustiques des poissons sont intégrées dans toute la colonne d'eau jusqu'au fond ou jusqu'à une certaine profondeur pendant des intervalles de distance ou de temps fixes le long du trajet du navire. Cependant la position du transducteur du sondeur fixée sous la coque du navire et le blocage de la réception pour les 3 premiers mètres contigus faisait que la couche de 7 mètres sous la surface ne pouvait être prospectée. Par mauvais temps, il était parfois nécessaire d'étendre considérablement l'épaisseur de cette couche aveugle du fait de la réflexion sur des bulles d'air produisant des échos de forte intensité qui pouvaient être intégrés. Ainsi une fraction de biomasse qui peut ne pas être négligeable particulièrement dans les eaux très côtières ou sur les haut-fonds (banc d'Arguin par exemple), n'était pas prise en compte (Levenez et Lopez 1982).

### *1.3.2.2. Les campagnes récentes au Sénégal : campagnes du N/O Itaf Dème et du R/V Fridtjof Nansen*

Des problèmes techniques récurrents ont finalement immobilisé le navire N/O Louis Sauger en 1995 et il a fallu attendre jusqu'en 2000 avant que le Sénégal bénéficie d'un nouveau navire de recherche, offert par la coopération japonaise comme son prédécesseur. Il s'agit du N/O Itaf Dème, un chalutier de pêche arrière (37.4 m de longueur, 8.1 m de large, 3 m pour le tirant d'eau, 318 TJB, et 1 100 chevaux de puissance motrice au niveau de son moteur principal) doté de 3 chaluts : 2 démersaux et 1 pélagique et d'un équipement acoustique composé de : i) un échosondeur SIMRAD ER60 ; ii) un intégrateur SIMRAD BI60 ; iii) un transducteur 38 kHz ; iv) un transducteur 120 kHz.

Le N/O Itaf Déme a démarré ses campagnes acoustiques en mars 2002 avec l'objectif de conduire deux campagnes par année, une en saison froide et une autre en chaude. A partir de 2006, avec l'arrêt des campagnes acoustiques du DFN dans la région, le N/O Itaf Déme a seulement conduit ses prospections dans la période octobre-novembre de chaque année afin de continuer la série laissée par le DFN.

Les principales difficultés liées aux campagnes du N/O Itaf Deme sont la médiocrité au niveau de l'échantillonnage pélagique mais aussi les contraintes budgétaires du CRODT à partir de 2008.

Le chalut pélagique arrivé avec le bateau en 2000 a toujours été peu performant. C'est pourquoi en juin 2002 une requête a été formulée par le CRODT lors du dernier Steering Committe du programme NANSEN à Bergen (Norvège) pour obtenir l'assistance d'experts. En janvier 2003 la FAO, chargé de l'exécution de ce programme, a contracté une équipe norvégienne composée d'un capitaine de pêche et de son ''fishing master'' pour venir au Sénégal à bord du Navire afin d'identifier tous les problèmes liés à l'utilisation du chalut. Plusieurs solutions techniques ont été proposées, quelques résultats notables ont été enregistrés après cette formation mais les résultats restaient insuffisants. La JICA a alors retenu qu'il s'agissait d'un problème de qualification du personnel de peche du navire et a initié en septembre 2004, dans le cadre du projet conjoint d'évaluation des ressources démersales côtières du Sénégal, exécuté par l'ISRA/CRODT et la JICA/OAFIC, une composante relative à l'amélioration des capacités du personnel naviguant du N/O ITAF DEME, correspondant à des exercices pratiques en mer pour une utilisation effective et efficace du chalut pélagique équipant le navire de recherche. Des améliorations dans l'échantillonnage pélagique furent enregistrées après cette seconde formation à bord du navire.

A partir de 2008 le CRODT fut confronté à des difficultés financières, le budget annuel reçu de l'Etat du Sénégal ayant connu une baisse drastique. Les campagnes d'évaluation connurent alors une longue rupture et n'ont été repris qu'en janvier 2015.

Quant au navire Dr. Fridtjof Nansen, il a travaillé en Afrique de l'Ouest depuis 1981. En mai 1981 et mars 1982 le navire a couvert la région d'Agadir au Ghana, d'août à Décembre 1986 la zone entre Agadir et la Sierra Léone et enfin en Septembre 1989 de Safi au Cap Blanc. Mais la série la plus régulière et la plus longue a été celle démarrée en 1995 dans le cadre du programme FAO/NANSEN. Ces campagnes régionales ont couvert le Sénégal, la Gambie, la Mauritanie et le Maroc. La Guinée Bissau a été couverte en 1995 mais les faibles valeurs enregistrées durant cette campagne ont conduit le programme à éliminer la Guinée Bissau lors des prospections qui ont suivi. Les campagnes du navire Dr. Fridtjof Nansen ont été conduites régulièrement durant les mois de novembre-décembre jusqu'en 2006 avec, pour quelques années, une couverture aussi en juin-juillet.

Les caractéristiques des récentes campagnes aux Sénégal ainsi que le détail des méthodologies utilisées pour l'estimation des biomasses sont résumés dans les sous chapitres suivants.

À bord du N/O Itaf Déme, deux fréquences sont utilisées : 38 kHz et 120 kHz. Ces fréquences sont calibrées en début de chaque campagne ; pour la fréquence de 38 kHz, la durée d'impulsion choisie est de 1.024 microseconde et pour la fréquence de 120 kHz, la durée d'impulsion est de 256 microseconde. Le matériel SIMRAD a montré une très haute stabilité depuis son acquisition et pour chaque fréquence, les déviations par rapport au modèle ont été très faibles durant les opérations de calibration.

Jusqu'en 2003, le navire R/V Dr Fridtjof Nansen est équipé d'un sondeur scientifique Simrad EK-500 travaillant à la fréquence de 38 kHz et d'un intégrateur Bergen Echo Integrator system 500 (BEI500). A partir de 2003, quatre fréquences sont disponibles à bord : 18, 38, 120, 200 kHz.

#### *1.3.2.3. Revue succinte des anciennes campagnes acoustiques réalisées au Maroc et en Mauritanie*

**Campagnes du Maroc :**

1953 : Programme d'échosondage pour localiser les bancs avec pour objectif le pilotage des pêcheries sous couvert de la profession et des conserveries.

1973 : Début des études d'évaluation et de répartitions des stocks dans un cadre FA0 avec le bateau Idrissi (FAO) qui travaillait avec un sondeur (38 kHz) et un intégrateur analogique de SIMRAD en Méditerranée et du Cap Spartel au Cap Juby. Ce programme s'est achevé en 1976.

1976 1978 : Arrêt des campagnes d'évaluation acoustique.

1979 : Acquisition du navire Ibn Sina équipé en acoustique avec sondeur, sonar et intégrateur analogique. Un programme qui a duré jusqu'en 1985 permettait alors d'effectuer trois campagnes pendant la saison qui s'étend du printemps à Octobre.

1985 : Arrêt du programme de l' Ibn Sina dont les résultats ont été jugés non satisfaisants et attente de l'acquisition du navire Charif Al Idrissi en 1986.

1986 : Des campagnes de calibration et de mesure de bruit ont conduit à ne pas utiliser ce nouveau navire pour effectuer des campagnes de prospection acoustique. L' Ibn Sina et le Charif Al Idrissi furent alors utilisés plutôt pour le pilotage des pêcheries.

En paralléle, des travaux ont été effectués par le navire Dr Fridtjof Nansen dans le cadre FAO :

1981 : mesure de TS et études de comportement.

1982 : intercalibration avec l' Ibn Sina

1986 : 2 campagnes en Septembre et Novembre

1989 : 1 campagne en Septembre.

**Campagnes de la Mauritanie :**

Les premières campagnes eurent lieu en 1970-1971 lorsque le navire Almoravide effectua pour le compte de la SCET International des prospections au sondeur et au sonar.Puis eurent lieu les campagnes du navire Capricorne (Série des CAP et Echosar 1,2,3 et 5). En 1983, le navire N'Diago fut équipé d'un sondeur SIMRAD EK 400 (38 KHz) et d'un intégrateur AGENOR. Ce navire ne disposait pas de sonar.De 1983 à 1989, malgré un arrêt de 1984 à mi-1986,13 campagnes de prospection qui ont couvert l'ensemble du plateau continental et une partie du talus mauritanien ont été réalisées.En plus de ces campagnes, la Mauritanie a bénéficié de prospections effectuées par le navire Dr Fridtjof Nansen. Le navire Ernst Haeckel (RDA) a également prospecté le talus et la zone du large en 1984 et 1985.Le navire Monocristal (URSS) a prospecté cette même zone en 1988.

### 1.3.3. Harmonisation des resultats acoustiques issus des navires de la région

Un defi important est l'harmonisation des résultats de campagnes issus des différents navires de la région. En effet, la comparaison des résultats obtenus n'est possible que si i) les réponses des navires devant des situations identiques sont les mémes et que ii) les opérateurs en charge de l'analyse des données interprétent les résultats et en particulier les echogrammes de la même

manière. L'harmonisation concerne alors autant le plan matériel que plan humain. Si les aspects matériels sont plus faciles à prendre en charge, les considérations humaines le sont moins à cause de la forte subjectivité liée aux interprétations des échogrammes par les opérateurs. La standardisation des équipements a essentiellement reposé sur les intercalibrations des navires et a fait l'objet d'une étude technique que j'ai dirigée dans la sous région et présenté en Annexe 1. L'harmonisation dans l'interprétation humaine a reposé sur la collecte et l'analyse de plusieurs centaines d'échogrammes typiques à bord du navire DFN et a aussi fait l'objet d'une étude conduite à deux (moi méme et Najib Charouki à bord du DFN) et finalisée en groupe de travail pour le compte de la FAO. Ce dernier travail est présenté dans les lignes qui suivent.

### 1.3.3.1. Les intercalibrations de navires d'évaluation de stock en Afrique du Nord Ouest

Dans le cadre de l'harmonisation et la comparabilité des résultats des campagnes acoustiques dans la région, plusieurs exercices d'intercalibration ont été menés entre les navires locaux et le DFN particulièrement en 2004 et 2005. Le détail de ces opérations figure en annexe. La conclusion principale de ces exercices d'intercalibrations de 2004 et 2005 est que les navires locaux ont la capacité de conduire des campagnes conjointes régionales pour pouvoir finalement remplacer le DFN dans la sous région. La comparabilité totale entre les navires locaux ne peut toutefois être atteinte qu'en multipliant les exercices d'intercalibration, en procédant régulièrement à des réajustements et particulièrement en améliorant les performances dans les pêches scientifiques. La standardisation des méthodes de scrutinising, l'installation de blisters sur les coques de certains navires pour réduire les effets météorologiques, la régularité des exercices d'intercalibration sont autant de facteurs en prendre en considération pour améliorer cette comparabilité entre les navires locaux. Les efforts des scientifiques acousticiens dans la région ont étés orientés sur ces questions durant les dernières années. Le dernier exercice d'intercalibration effectué récemment en 2015 entre le navire sénégalais et le DFN confirme les résultats de 2004 et 2005.

### 1.3.3.2. L'intercalibration de 2015 entre les navires Fridtjof Nansen et Itaf Deme

Parcours des deux navires : ci-dessous, le parcours adopté en d'octobre 2015 au niveau de la Petite Côte, avec le N/O Itaf Deme devant le DFN, un décalage de 20 minutes étant observé. Le parcours a été choisi pour pouvoir couvrir des bancs important (transect 1 longeant la coote) mais également couvrir aussi bien les petits que les grands fonds (transect 2 vers la large). La vitesse commune est de 8 nœuds.

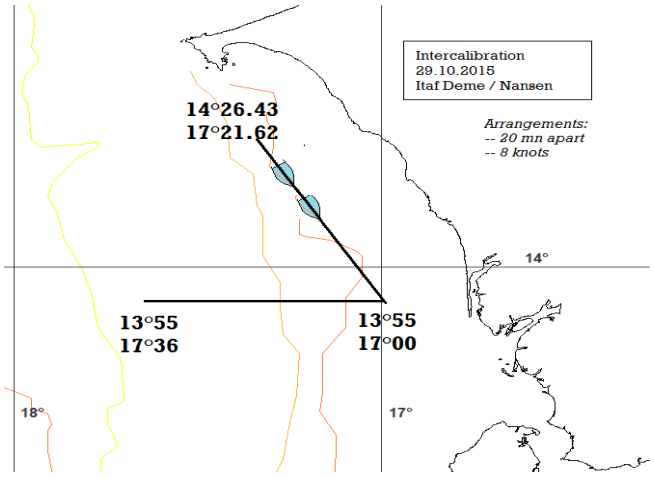



Figure 1-24 : Parcours des navires durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015.

Durant ce parcours, des bancs denses ont été rencontrés au départ et pas simultanément de part et d'autre :

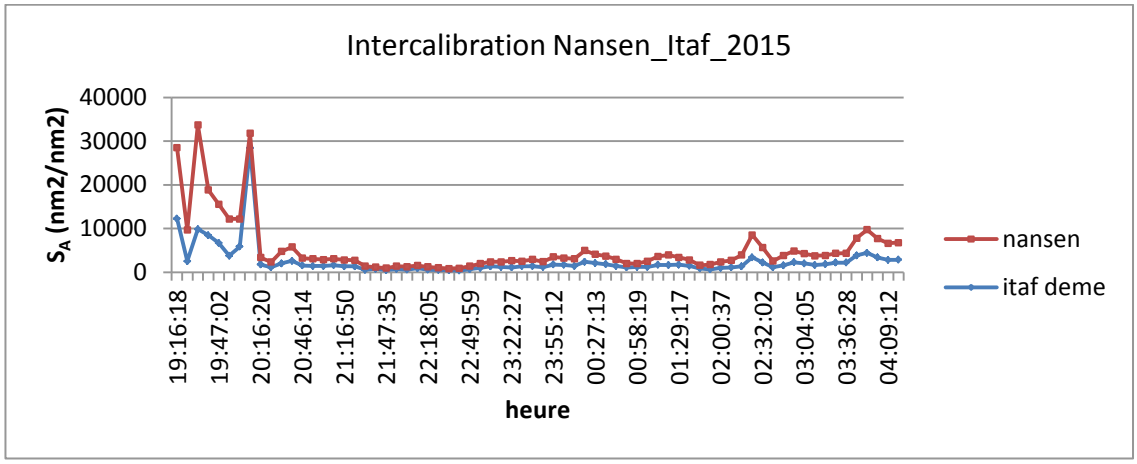



Figure 1-25 : Valeurs d'intégration $S_A$ des deux navires durant l'intercalibration entre le N/ODFN et le N/O Itaf Deme en octobre 2015.

Ces fortes valeurs différentes de $S_A$ ($nm^2$ $nm^{-2}$) ont généré une corrélation très médiocre (r = 0,53) sur l'ensemble du parcours :

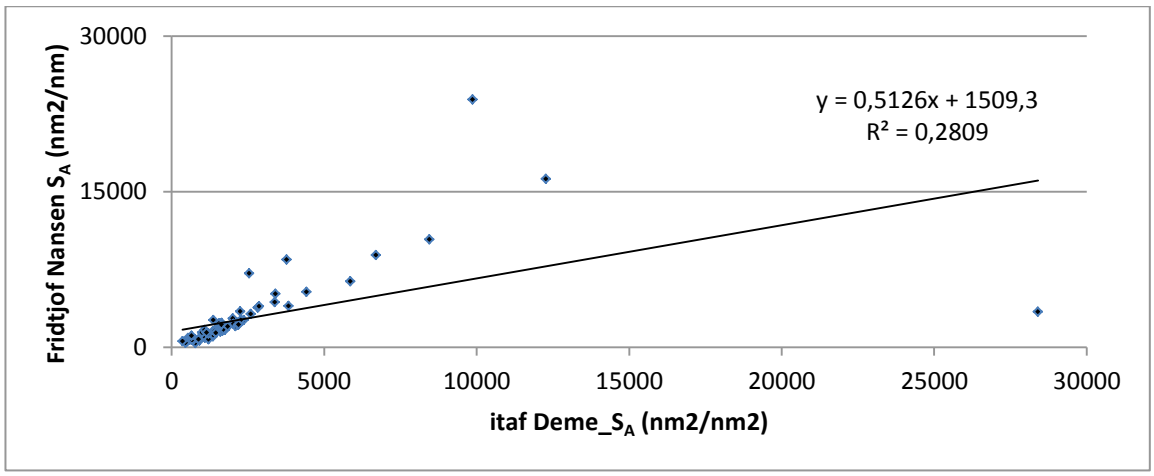



Figure 1-26: Correlation entre les des deux navires durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015.

Lorsqu'on exclut les valeurs extrêmes de départ on obtient une très bonne corrélation (r = 0,95).

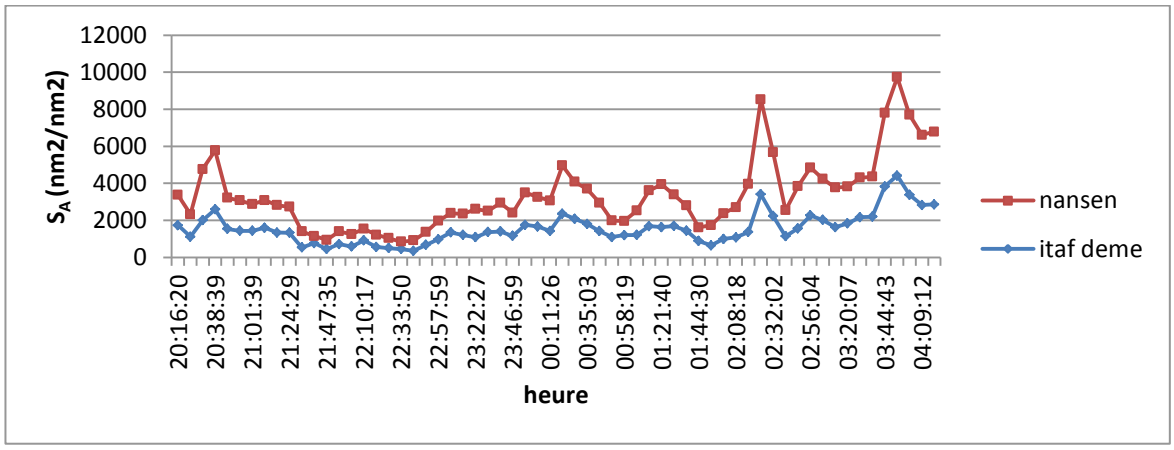



Figure 1-27 : Valeurs d'intégration $S_A$ des deux navires, avec valeurs extrêmes exclues, durant l'intercalibration entre le RV FridtjofNansen et le RV Itaf Deme en octobre 2015.

Avec la relation suivante entre les deux navires :

FridtjofNansen = 1.2*ItafDeme – 191,24

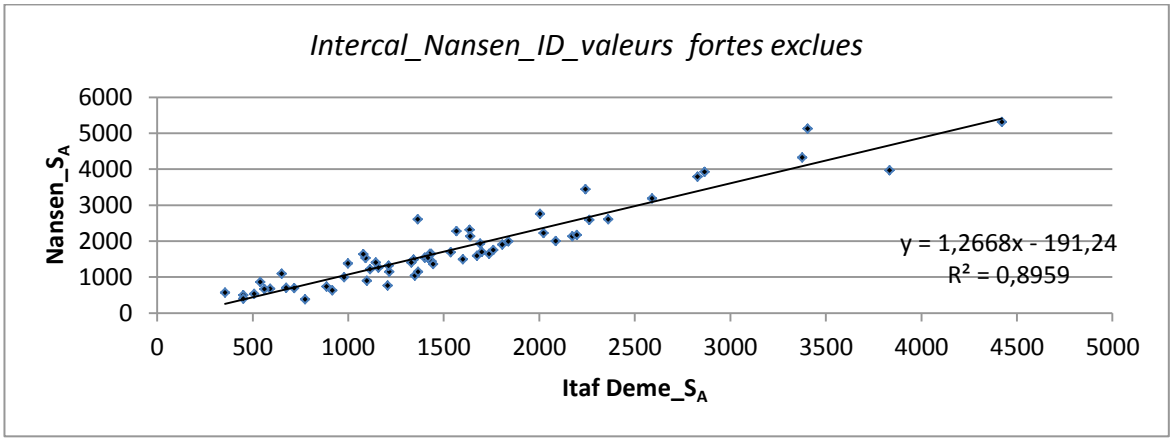



Figure 1-28 : Corrélation entre les des deux navires durant l'intercalibration entre le DFN et le RV Itaf Dème en octobre 2015, avec les valeurs extrêmes des $S_A$ exclues.

Ce résultat confirme la linéarité dans la relation entre les valeurs d'intégration $S_A$ entre le navire de référence que constitue le DFN et le navire RV Itaf Dème. Il est important de préciser que la finalité des campagnes d'évaluation étant principalement de suivre les tendances de la ressource sur le long terme à des fins d'aménagement, seule la linéarité entre les relations des navires est essentielle, les valeurs d'intégration $S_A$ ne pouvant en aucun cas être égales dans l'absolu compte tenu des différences intrinsèques (niveaux de bruit généré, biais même légers dans les calibrations etc.) entre les navires et des différences inévitables entre les parcours des navires étant entendu que dans l'absolu ceux-ci ne peuvent rencontrer exactement et simultanément les mêmes détections (à moins de superposer les deux navires !).

### 1.3.3.3. L'harmonisation dans l'interprétation des échogrammes

Toujours dans le cadre de l'harmonisation et la comparabilité des résultats des campagnes acoustiques dans la région, un des problèmes majeurs auxquels la région était confrontée a été la comparabilité dans les valeurs allouées aux espèces durant l'interprétation des échogrammes (« scrutinising »). Des différences significatives ont été constatées d'un opérateur à un autre, dues à la subjectivité liée à cette opération. Durant les analyses des intercalibrations, des rapports souvent supérieurs à 4 ont été constatées dans les valeurs des $S_A$ allouées pour une espèce donnée et par deux opérateurs différents. Cette situation a motivé en 2003 que le Planning Group initie une étude d'envergure encadrée par la FAO à travers le Projet « Norad-FAO Project », étude ayant consisté à la collecte durant la prospection acoustique du R.V. Fridtjof Nansen de novembre 2003, d'échos type pour la caractérisation des échos des espèces cibles de la région et de permettre ainsi de réduire la subjectivité liée au scrutinising en aboutissant à une allocation plus fiable des valeurs d'intégration $S_A$ lors des interprétations.

La démarche adoptée alors a été de définir au préalable les principaux critères d'identification des bancs et paramètres mathématiques en relation avec chaque échogrammes, avant de déterminer les principaux indices de caractérisation de l'échogramme pour l'espèce cible concernée. Chaque échogramme devait comprendre les éléments d'identification que voici :

- La valeur d'intégration moyenne $S_A$ du banc.
- La valeur moyenne de $S_V$.
- La variance de l'espèce.
- Les dimensions du banc.

- La distance du banc par rapport à la surface et le fond.
- Les espèces annexes susceptibles d'être mélangées au banc.
- Les positions et heures du coup de chalut.

Cette collecte qui a été conduite durant 52 jours à bord du R.V. Fridtjof Nansen et supervisée par deux scientifiques du groupe (Najib Charouki (INRH) et moi-même), devait aboutir sur une note technique pour la région. Les espèces à caractériser ont été Sardina pilchardus, Sardinella aurita, Sardinella maderensis, Trachurus trecae, Trachurus trachurus, Scomber japonicus, Engraulis encrasicolus et Decapterus rhonchus. Pour chacune de ces espèces, les échogrammes illustrant les bancs monospécifiques typiques ont été collectés au moyen du programme Echoview. Des paramètres descriptifs sont aussi relevés pour chaque banc collecté. Des analyses statistiques sont ainsi effectuées pour mettre en évidence d'éventuelles caractérisations des espèces ciblées par ces paramètres. Seuls les échogrammes liés aux captures monospécifiques dans les chaluts ont été retenus pour l'étude. Pour chaque échogramme, les paramètres mathématiques liés aux bancs monospécifiques sont extraits à l'aide des outils d'extraction disponibles dans Echoview. Ces descripteurs statistiques des bancs sont listés dans le

Tableau 1-2

Tableau 1-2 Liste des paramètres Echoview collectés et liés aux espèces cibles observées sur les echogrammes.

| Statistical school descriptors | Trawl station information |
|---|---|
| School $s_A$ | Position |
| Average SV | Time |
| Height | Gear type |
| Distance from surface | Depth |
| Distance from bottom | Total catch |
| Standard deviation | Fish catch composition |
| Skewness* | |
| Kurtosis** | |
| Image compactness*** | |
| Length | |
| Bottom depth | |

* Le kurtosis caractérise la forme de pic ou l'aplatissement relatif d'une distribution comparée à une distribution normale. Un kurtosis positif indique une distribution relativement pointue, tandis qu'un kurtosis négatif signale une distribution relativement aplatie.

**Le skewness (coefficient de dissymétrie) correspond à une mesure de l'asymétrie d'une distribution il est positif si la queue de droite (à valeurs hautes) est plus longue ou grosse, et négatif si la queue de gauche (à valeurs basses) est plus longue ou grosse.

Figure 1-29 Kurtosis et skewness de quelques distributions.

Un echogramme est dit monospécifique quand l'espèce cible associée représente plus de 70 % de la capture totale dans le chalut, en supposant que la capture totale est significative (plus de 300 kg). L'échogramme est enregistré juste avant le chalutage, quand la vitesse du navire est toujours à 10 nœuds. Un echogrammme est défini pour être typique quand l'occurrence de l'espèce dans le chalut est supérieure à 40 %. Les echogrammes de jour et de nuit étant différentsà chaque echogramme est associé le twilight (J jour ou N nuit), le début et la fin du jour étant défini respectivement pour 06:00 H et 18:00 H. Les echogrammes sont collectés à 38 kHz.

Les études sur les paramètres acoustiques et morphologiques des bancs de petits pélagiques menées en Angola par Lawson (2001) et en Afrique du Sud par Velho (2006) montrent la possibilité d'identifier certaines espèces à partir des leurs descripteurs statistiques. La note technique réalisée au sein du Planning Group s'est inspiré de ces travaux en appliquant une Analyse en Composante Principale (ACP) sur les descripteurs collectés pour chaque espèce cible pour examiner de possibles corrélations pouvant exister entre les paramètres extraits et l'espèce.

Les conclusions principales tirées des projections effectuées (Figure 1-31) ont été que :

- Les bancs des petits pélagiques ciblés sont plus marqués le jour que la nuit. Ceci est certainement lié à un comportement grégaire de ces espèces durant le jour, ce qui fait qu'elles sont plus dissociables le jour que la nuit.
- Le groupe de la sardine (Pilch), très présent durant le jour, est fortement corrélé à la valeur $S_A$. Ce résultat est lié aux fortes valeurs de $S_A$ détectées durant les campagnes, avec une moyenne de 67000 $m^2$ $nm^{-2}$ sur la série analysée. Ce groupe n'est pas corrélé aux autres paramètres
- Le groupe des sardinelles (Sard), observé principalement le jour, est corrélé également à la valeur $S_A$ (mais dans une moindre mesure que le groupe de la sardine) avec une moyenne de 16000 $m^2$ $nm^{-2}$ sur la série analysée.
- Le groupe des chinchards (Trach), détectés aussi bien le jour que la nuit n'est pas corrélé à valeur $S_A$ comme les précédentes (moy 290 $m^2$ $nm^{-2}$ sur la série analysée) mais très bien corrélé au kurtosis et au skewness qui illustre d'une manière imagée la platitude de l'echogramme, ce qui est facilement identifiable sur l'écran. Ce résultat m'a personnellement beaucoup servi dans les campagnes au Sénégal où je trouvais fréquemment le chinchard noir regroupé à la fin du talus continental et où les echogrammes (Figure 1-30) en forme de V inversés (forts kurtosis) laissaient penser qu'on avait affaire à des chinchards noirs. Les coups de chaluts effectués confirmaient très souvent cette supposition.
- Le groupe de maquereau (Scom), peu présent dans les analyses et pour lequel aucune corrélation n'a été trouvée.

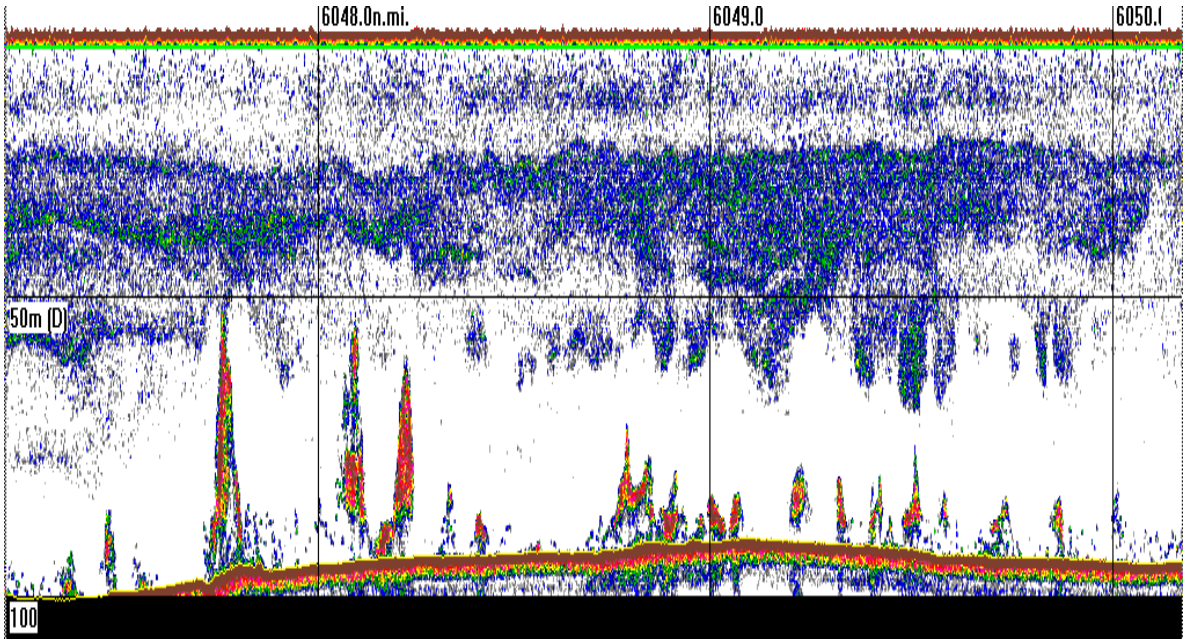



Figure 1-30 Bancs typiques de chinchard noirs (Trachurus trecae), proche du fond (echo rougeatres) entre 50 et 100 m de fond, au Sénégal.

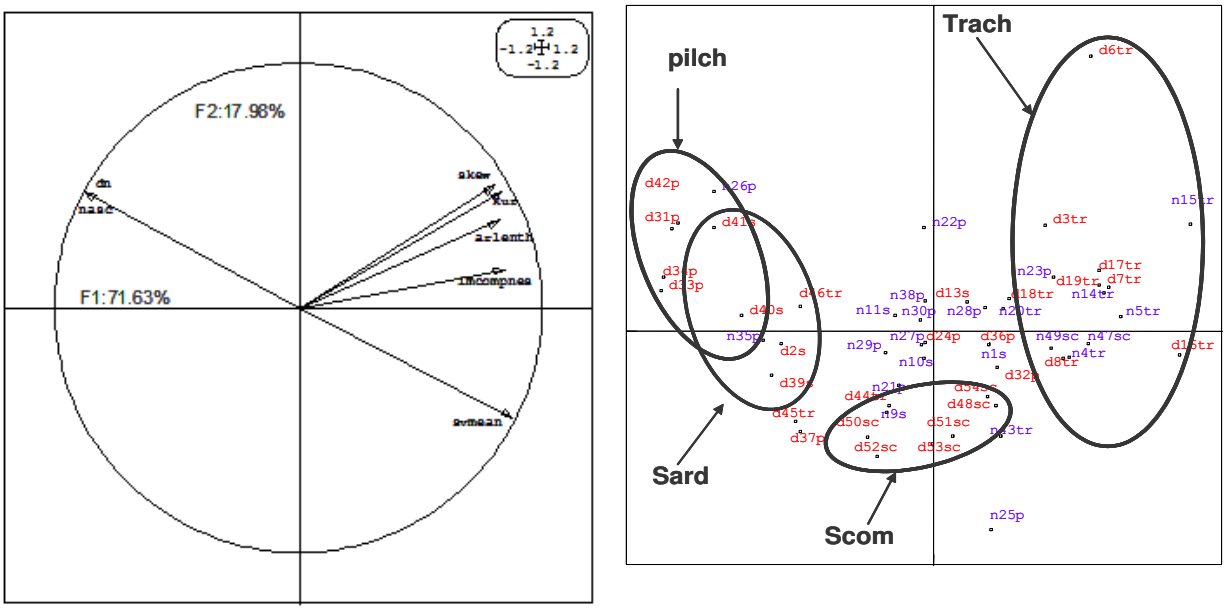



Figure 1-31 Analyse en Composante Principale PCA: Projection des descripteurs statistiques (a) et des echogrammes (b) sur le plan factoriel F1XF2.

Les détails de cette importante note technique réalisée en compagnie des amis marocains (INRH) figurent en annexe 6.2.2. de ce manuscrit.

## 1.4. **Conclusion**

Ce chapitre fait ressortir nettement l'importance que les petits pélagiques occupent dans la région nord-ouest africaine et les enjeux qu'ils représentent pour les populations locales, particulièrement les deux sardinelles qui représentent la principale source de protéines au Sénégal et sont dominantes dans les évaluations de ressources opérées dans la région. Ces évaluations sont faites à travers l'outil acoustique largement décrit dans ce chapitre et la région a connu une expérience riche dans l'utilisation de ces méthodes hydroacoustiques avec déjà dans les années 50 des navires étrangers effectuant des campagnes au Sénégal. L'appropriation de cette technique par les nationaux a nécessité une vision sous régionale qui s'est traduit avec la mise sur pied de l'Acoustic Planning Group en 2000. Les principaux défis auxquels cette structure s'est confrontée pour aboutir à des évaluations fiables et profitables à nos pays respectifs, a été la recherche de solutions pour harmoniser les résultats des campagnes dans la région. Dans ce cadre plusieurs exercices d'intercalibrations ont été opéré et continuent de l'être car jusqu'à présent il reste des efforts notables à consentir pour parvenir à la comparabilité des résultats avec le navire de référence dans la région, en l'occurrence le N/O Fridtjof Nansen.

Ce chapitre a fait par ailleurs ressortir les conditions physiques et environnementales dans lesquelles évoluent ces ressources pélagiques aussi bien au niveau continental qu'estuarien, avec des faits saillants très caractéristiques de l'environnement de la région. Parmi ces paramètres phares, on notera la présence dans la région de zones d'upwelling permanent ou saisonnier qui rythment la dynamique des petits pélagiques. On notera ensuite au Sénégal un processus de salinisation progressif de l'eau de mer constaté depuis 1970 d'après les données des stations côtières relevées par le CRODT. Mais le fait, de loin le plus marquant dans la région durant les dernières décennies, se trouve être sans nul doute la montée des températures des eaux de surface constatée dans la région et surtout au Sud du Cap Blanc. A l'échelle mondiale, ce réchauffement constaté se trouve être le plus important parmi les régions tropicales du globe depuis 1982 avec un déplacement notable des isothermes vers le nord depuis les années 1980.

# Chapitre 2
# Dynamique et distribution spatiale des ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest

# 2. Chapitre 2 : Dynamique et distribution spatiale des ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest et évulation direct par acoustique

## 2.1. Répartition et schémas migratoires des deux sardinelles

### 2.1.1. Schémas migratoires de Sardinella aurita

La répartition géographique de Sardinella aurita est très vaste. Elle concerne essentiellement les zones côtières de l'Atlantique tropical, de Gibraltar à l'Afrique du Sud (Saldanha Bay), dans toute la Méditerranée et même en Mer Noire; dans l'Atlantique ouest, du Golfe du Mexique au Brésil, ainsi que dans l'Indo-Pacifique (Indonésie, Mer de Chine) (Ghéno et Fontana, 1981 ; FAO, 2012) (Figure 2-1). Sur le littoral africain, la sardinelle ronde se rencontre sur le plateau continental où elle préfère les eaux salées (salinité > 35), non turbides et de température inférieure à 24°C (Camarena Luhrs, 1986 **;** Fréon, 1988). La sardinelle ronde peut se retirer en dessous de la thermocline en saison chaude (période de faible enrichissement jusqu'à des profondeurs de 200 mètres durant la nuit (Fisher et al., 1981**).**

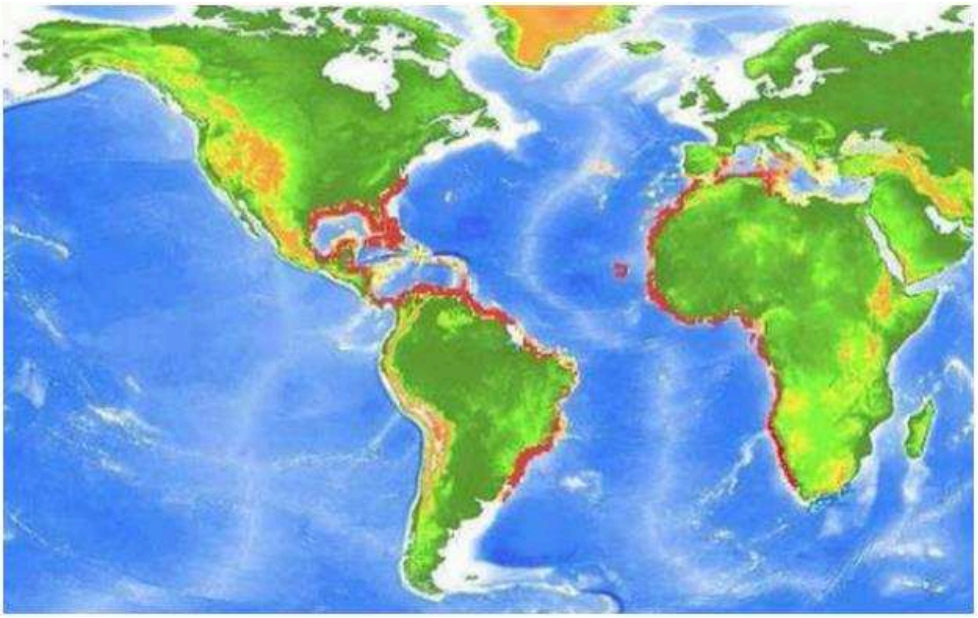


Figure 2-1 Distribution géographique de S. aurita (zone rouge) Source : www.Fisbase.org.

La sardinelle ronde est particulièrement abondante dans trois secteurs de l'Atlantique centre-est caractérisés par l'apparition saisonnière d'importantes remontées d'eaux froides (upwellings) (Boëly et Fréon, 1979) :

- de la Mauritanie (26° N) à la Guinée (10° N), les adultes, de taille comprise entre 25 et 32 cm, se déplacent saisonnièrement ;
- entre la Côte d'Ivoire et le Ghana (Golfe de Guinée ouest), avant les remontées d'eau froide (première moitié de l'année), les adultes hivernent sur les fonds de 50 à 80 m entre les longitudes du cap des Trois Pointes et d'Accra, au début de l'upwelling, ils se rapprochent des terres ghanéennes ;
- et du sud du Gabon (0°) au sud de l'Angola (18° S).

Les sardinelles rondes sont présentes mais plus rares dans les intervalles qui séparent les trois régions (Postel, 1960). Chacun des trois grands secteurs est très certainement occupé par des populations distinctes, le régime des courants n'étant pas favorable aux échanges entre les zones.

Un stock unique de Sardinella aurita a été identifié dans la région sénégalo-mauritanienne entre 10° N et 25° N (FAO, 2001). D'un point de vue génétique Chiki et al (1997) n'observe pas de différence entre les populations de l'Atlantique Nord (Afrique de l'Ouest et Venezuela). La sardinelle ronde du stock de la zone Nord-Ouest Africaine se caractérise par la présence de juvéniles le long des zones côtières aussi bien en saison froide qu'en saison chaude. Ces observations confirment l'existence de deux importantes nurseries, l'une à l'ouest du Banc d'Arguin et au sud du Cap Timiris et l'autre qui s'étend du sud de Dakar aux Iles Bissagos (Boëly et Fréon, 1979). Le lien entre ces deux nurseries se fait par le biais des adultes qui effectuent des migrations saisonnières sur l'ensemble de l'aire de répartition du stock (Boëly et al, 1979) (Figure 2-2). Dans cette zone, après s'être reproduits, les jeunes reproducteurs quittent la nurserie de la Petite Côte et participent aux déplacements saisonniers des adultes entre la Mauritanie et l'Archipel des Bissagos. Ainsi, les premiers adultes arrivent vers la presqu'île du Cap-Vert en décembre-janvier et se concentrent entre Dakar et la Guinée-Bissau. Ils restent dans ce secteur jusqu'en avril, puis, avec le réchauffement des eaux de surface, ils envahissent le plateau continental et entament leur migration vers le nord jusqu'à 24°-25°N avec ponte. Ces poissons atteignent en juillet la latitude du banc d'Arguin et recommencent un nouveau déplacement vers le sud (Boëly et al., 1982b ; Boëly, 1979).

Une nouvelle description du schéma migratoire saisonnier de la sardinelle ronde a été présentée en juin 2012 lors de l'atelier sur les sardinelles organisé par la CSRP (Corten, 2012). Cette nouvelle description qui est une mise à jour du schéma migratoire de Boëly, (1980) et Fréon, (1979), est basée sur les données de campagnes acoustiques récentes et de débarquements de la pêche artisanale en Mauritanie. D'après Corten (2012), la descente des sardinelles vers le Sénégal se fait très près de la côte.

En effet, en début de l'année, la majeure partie des poissons est concentrée au Sénégal et en Gambie, et peut-être encore plus au sud (Figure 2-3). Ces poissons sont exploités par la flotte artisanale sénégalaise. A partir du mois d'avril, les poissons commencent à migrer vers la Mauritanie où ils sont ciblés par la flotte industrielle étrangère. Cette flotte prend ses captures principales de mai à août. En septembre/octobre, les poissons émigrent plus au nord vers le Maroc, où ils sont exploités par les chalutiers pélagiques et les senneurs côtiers. A partir d'octobre, les poissons commencent à revenir au Sénégal en passant par les eaux mauritaniennes.

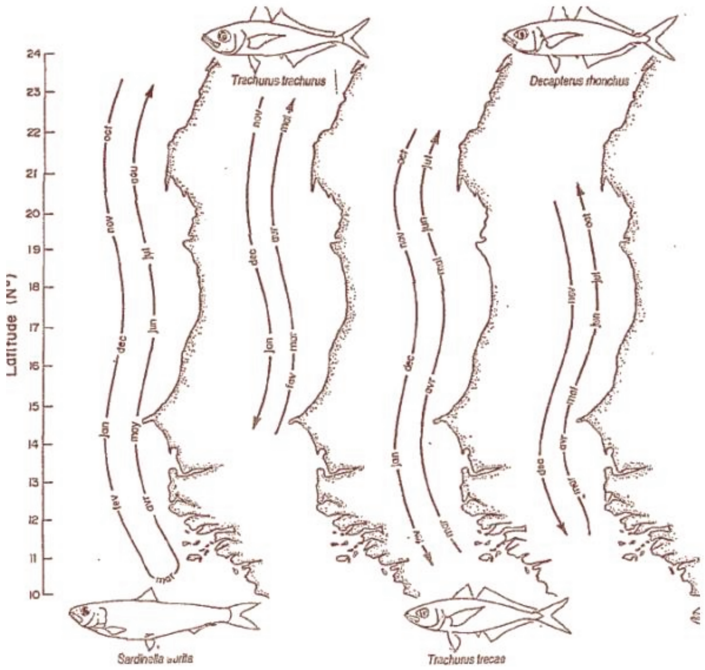



Figure 2-2 Migrations (10°N à 24°N) saisonnières des petits pélagiques (Sardinella aurita, Trachurus trachurus, Trachurus trcae, et Decapturus ronchus) d'après Boëly (1979) ; Fréon (1988a) et Pauly (1993).

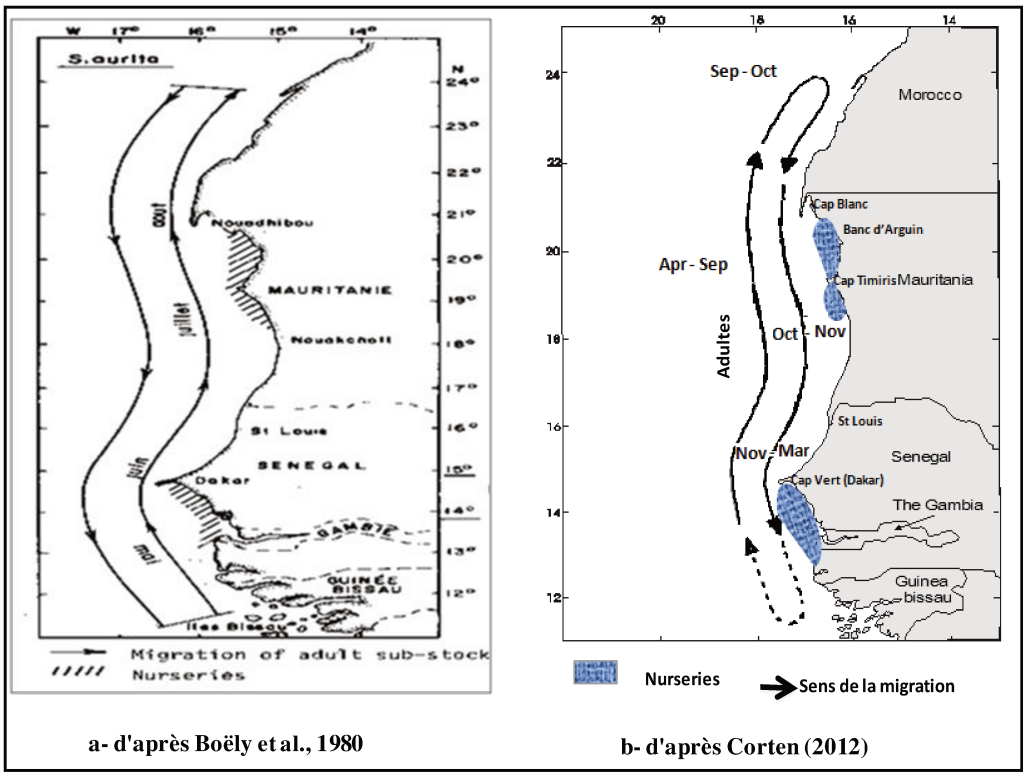



Figure 2-3 Cycle migratoire d'adultes de Sardinella aurita dans le sud du CCLME.

Ainsi, pendant longtemps on a cru que la migration de retour de S. aurita du Maroc vers le Sénégal s'effectuait plus loin de la côte (Boëly et al., 1982). Cette théorie qui était basée sur les observations de la flotte industrielle en Mauritanie qui ne pouvait pas détecter les poissons pendant octobre-novembre au moment où les poissons sont censés passer par la Mauritanie pour descendre au Sénégal. Les campagnes acoustiques récentes de la Mauritanie montrent que les

poissons sont distribués en novembre plus près de la côte qu'en juin. De plus, les prises les plus importantes de la pêche artisanale récemment développée à Nouadhibou sont réalisées en octobre/novembre, ce qui indique que les poissons sont présents dans des concentrations denses très près de la côte durant ce moment de l'année. La distribution très côtière pendant la descente vers le Sénégal explique pourquoi la flotte industrielle n'a jamais pu localiser les poissons à ce moment de l'année (Corten, 2012).

Ainsi, le stock de la population de la sardinelle ronde dans la zone sénégalo-mauritanienne peut être subdivisé en plusieurs composantes : des sous-stocks de jeunes individus (juvéniles et jeunes reproducteurs) n'effectuant que des migrations d'amplitude limitée à l'intérieur des deux nurseries et un sous-stock commun d'adultes grands migrateurs, qui parcourent l'ensemble du secteur en suivant les mouvements des eaux froides d'upwelling. Les sardinelles rondes de la région sénégalo-mauritanienne constituent donc une population unique dont la fraction adulte accomplit une migration annuelle.

### 2.1.2. Schémas migratoires de Sardinella maderensis

La sardinelle plate occupe une aire plus restreinte que la sardinelle ronde, car on la trouve seulement en méditerranée méridionale et dans l'Atlantique Est, de Gibraltar à l'Angola (Figure 2-4). Un seul spécimen a été trouvé en Namibie (Baie de Walvis). Elle est aussi présente en Méditerranée (FAO, 2012). Elle est absente des côtes américaines. La sardinelle plate est euryhaline, elle vit sur le plateau continental en zone côtière, souvent plus abondante au voisinage des estuaires de préférence dans des eaux de température supérieure à 24°C et paraît éviter les eaux turbides (Boëly et Fréon, 1979 ; Fisher et al 1981 Holzlohner et al., 1982 et Binet, 1988). Elle forme des bancs à la surface ou au fond jusqu'à 50 m au moins (Fisher et al., 1981).

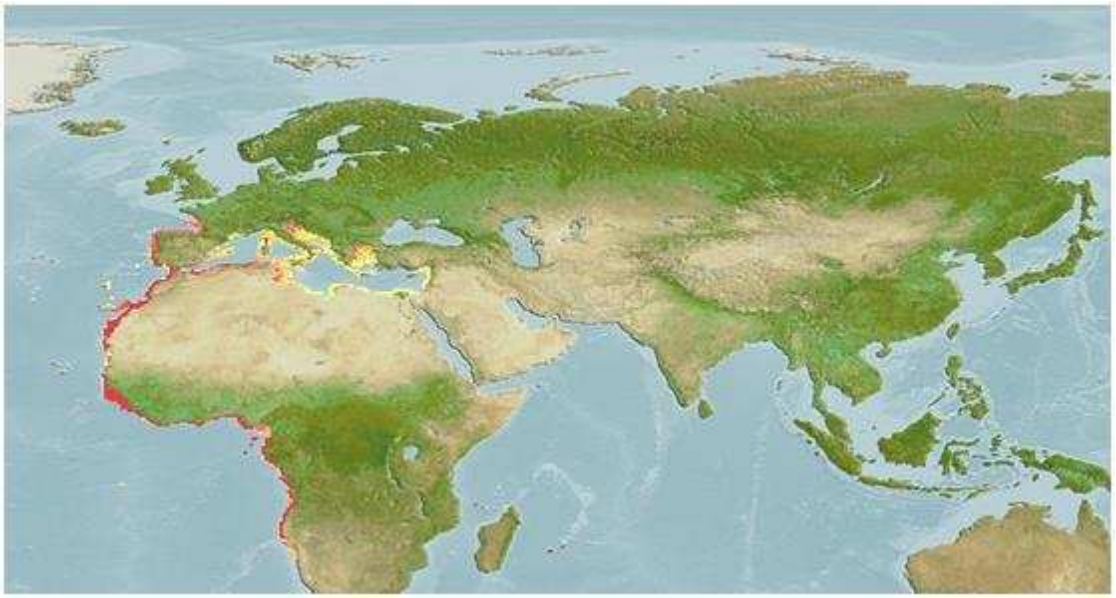


Figure 2-4 Répartition géographique de la Sardinella maderensis (Lignes rouges), Source : www.Fisbase.org.

Du point de vue du schéma migratoire de Sardinella maderensis, elle est moins active et a un comportement migrateur moins prononcé que la sardinelle ronde (Longhurst et Pauly, 1987). Elle possède à peu près la même aire de répartition que la sardinelle ronde mais elle est plus côtière et plus euryhaline. Cury & Fontana (1988) rapportent que la sardinelle plate est une espèce relativement sédentaire dont les mouvements au Sénégal et en Mauritanie ne dépassent guère l'étendue des zones de développement larvaire. Ces migrations s'effectuent en saison

chaude vers le nord de la Petite Côte et en saison froide vers la Gambie (Fréon, 1986) (Figure 2-5). Deux nurseries de Sardinella maderensis ont été identifiées dans la zone sénégalo-mauritanienne (Boëly et Fréon, 1979). La biologie des individus et leur aire de répartition sont en fait mal connues (Barry-Gerard, 1974). L'hypothèse de l'existence d'un seul stock avec des liaisons entre les deux nurseries a été émise dans la zone sénégalo-mauritanienne (Boëly et al., 1978). Au nord les adultes et les jeunes reproducteurs se situent en face de la Mauritanie de février à septembre et aux environs du Cap Blanc d'octobre à janvier. Une forte concentration des jeunes reproducteurs se situent au niveau de la Gambie et de la Guinée Bissau en mars et en avril (Boëly et Østvedt, 1976). Les jeunes reproducteurs effectuent des déplacements saisonniers de faibles amplitudes à l'intérieur de ces nurseries. Les adultes de taille supérieure à 24 cm sont faiblement représentés au Sénégal alors qu'en Mauritanie la taille maximale est de 32 cm LF (Chavance et al., 1991). D'autre part, les liens qui unissent ces deux fractions de stocks sont mal connus (Boëly et al., 1982b). Ainsi, les sardinelles plates sont constituées de populations locales qui restent dans le même secteur tout au long de l'année. Cependant, les limites entre ces populations locales ne sont pas claires et les données existantes d'échantillonnage sont insuffisantes pour différencier les populations locales (Corten, 2012 Com. Pers.).

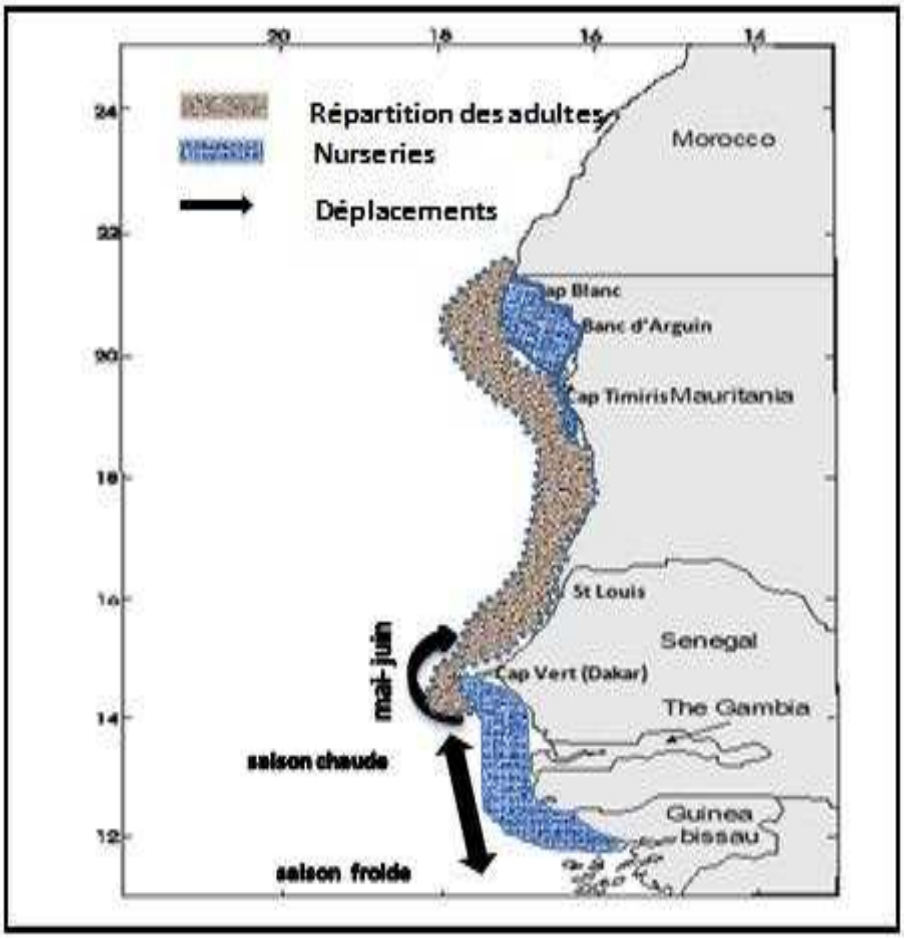



Figure 2-5 Cycle migratoire de Sardinella maderensis (d'après Fréon, 1986).

Pour le moment, le groupe de travail sur les petits pélagiques en Afrique de l'Ouest (COPACE) considère qu'il existe un stock unique pour chacune des deux espèces de sardinelle dans la zone nord-ouest de l'Afrique.

## 2.2. Les ressources pélagiques en Afrique de l'Ouest, potentialités, pêcheries et exploitation

Dans le Courant des Canaries, les espèces pélagiques prédominantes sont la sardinelle ronde (Sardinella aurita) et la sardinelle plate (Sardinella maderensis), la sardine (Sardina pilchardus), les chinchards (Trachurus trachurus, Trachurus trecae et Decapterus rhonchus), le bonga (Ethmalosa fimbriata) l'anchois (Engraulis encrasicolus) et le maquereau japonais (Scomber japonicus) avec des potentiels de biomasses estimées considérables pour la sardine et les deux sardinelles. A titre indicatif, la biomasse totale de ces espèces estimée par le navire de recherche norvégien Dr Fridtjof Nansen lors de la campagne de saison chaude de l'année 2005, de Cap Cantin au Maroc jusqu'en Casamance au Sénégal, avoisine 13 millions de tonnes dont prés de 7 millions de tonnes de sardine et 4 millions de tonnes de sardinelles. Ces potentiels en ressources pélagiques connaissent d'importantes fluctuations saisonnières et interannuelles en termes de biomasses, liées à la variabilité du recrutement, en relation avec les facteurs environnementaux (upwelling) saisonniers. Une de leurs caractéristiques principales dans l'espace CCLME est leur migration à grande échelle, de la Mauritanie au nord de la Guinée-Bissau

### 2.2.1. Flottilles en œuvre du Maroc au Senegal

La plus importante exploitation de sardinelles est réalisée par les flottilles artisanales au Sénégal équipées de sennes tournantes ou de filets maillants encerclants et la pêcherie industrielle en Mauritanie (flottille UE, flottille russe et flottille des autres bateaux d'origine de l'Europe de l'Est). Au Sénégal, la flottille industrielle spécialisée comprend des senneurs et des chalutiers pélagiques ciblant, plus au large des côtes, la fraction adulte des stocks (Déme et al, 2012).

Le stock de sardine est exploité au Maroc par la flottille marocaine dans la zone au nord de Cap Boujdor, composée de plusieurs centaines de senneurs côtiers, tandis que la zone comprise entre le Cap Boujdor et le Cap Blanc est exploitée aussi bien par de senneurs côtiers que par des navires marocains RSW et des chalutiers pélagiques ou bateaux affrétés par des opérateurs marocains. En Mauritanie, les captures de sardines sont réalisées de façon saisonnière par des chalutiers pélagiques de l'Union européenne (UE) et de la Fédération de Russie Les chalutiers pélagiques russes ciblent la sardine, le maquereau, les chinchards, les sardinelles, le sabre et l'anchois.

L'exploitation des chinchards en Afrique nord occidentale est réalisée avec des navires de tailles très variées qui vont de la pirogue au grand chalutier pélagique de 120m de long. L'exploitation de ces ressources est donc assurée à la fois par des flottilles industrielles, presque exclusivement étrangères et des pêcheries artisanales nationales.

La pêcherie du maquereau est exploitée dans la zone nord du Maroc exclusivement par la flottille marocaine. Cette flottille est composée de senneurs côtiers qui ciblent principalement la sardine et pêchent aussi le maquereau selon sa disponibilité. Entre Cap Boujdor et le Cap Blanc, ce stock est aussi exploité par des chalutiers pélagiques opérant dans le cadre d'accords de pêche Maroc Fédération de Russie et des bateaux affrétés par des opérateurs marocains. Tandis que dans zone mauritanienne opèrent plusieurs chalutiers pélagiques de différents pays (Fédération de Russie, Ukraine, Union européenne et autres) qui ne ciblent le maquereau que de façon saisonnière.

Dans la sous-région, les anchois sont principalement péchés en Mauritanie et au Maroc. De grandes quantités sont prises comme captures accessoires de certaines espèces ciblées par les pêcheries pélagiques industrielles en Mauritanie et par les senneurs tournants côtiers au Maroc.

Quant à l'éthmalose d'Afrique (Ethmalosa fimbriata) ou bonga, elle est l'une des quatre espèces d'alose présentes en Afrique et ses principales concentrations sont au Sénégal, en Gambie et en Mauritanie. En tant qu'espèces côtières et d'estuaire, elle est exploitée par les pêcheries artisanales (Déme et al, 2012).

### 2.2.2. Débarquements

Les dernières évaluations scientifiques du COPACE/FAO effectuées au niveau sous régional montrent que les captures globales des principaux petits pélagiques au Sénégal sont l'objet d'importantes fluctuations de 1990 à 2014, avec une tendance générale à la hausse sur l'ensemble des séries chronologiques, malgré la baisse observée de 2011 à 2013 (Figure 2-6). Les captures totales en 2014 étaient de 451 000 tonnes, le chiffre le plus élevé de la série chronologique. Cela représente une augmentation de 49% par rapport à 2013 (302 000 tonnes). Les captures totales des principaux petits pélagiques au Sénégal sont dominées par les deux espèces de sardinelles constituant en moyenne 86% pour cent du total des principaux petits pélagiques capturés au Sénégal (1990-2014), et % en 2014. Ces captures ont diminué passant de 338 000 tonnes en 2011 à 255 000 tonnes en 2013, avant d'augmenter et d'atteindre 367 000 tonnes en 2014. La moyenne des captures de sardinelles spp. pour les cinq dernières années (2010-2014) était de 307 000 tonnes par rapport à une moyenne globale pour la période allant de 1990 à 2014 de 259 000 (FAO, 2015).

Les captures de chinchard (Trachurus trecae et Caranx rhonchus) étaient de 45 000 tonnes en 2014 (31 000 tonnes et 14 000 tonnes, respectivement) par rapport à celles de 21 000 tonnes et 57 000 tonnes enregistrées respectivement en 2013 et 2012. Une augmentation de 159% pour le chinchard du Cunène a été observée de 2013 à 2014. Les captures de maquereau (Scomber colias, ex- S. japonicus) ont augmenté de 29%en 2014 par rapport à 2013, passant de 12 000 tonnes à 16 000 tonnes.

Les captures d'éthmalose (E. fimbriata) présentent des fluctuations dans la série chronologique, avec une tendance à la hausse au cours des dernières années, à partir de 7 000 tonnes en 2012, 13 000 tonnes en 2013 et 24 000 tonnes en 2014, avec une augmentation de 79% des captures de 2013. En 2014, l'éthmalose a contribué pour 5% du total des captures de petits pélagiques au Sénégal (FAO, 2015).

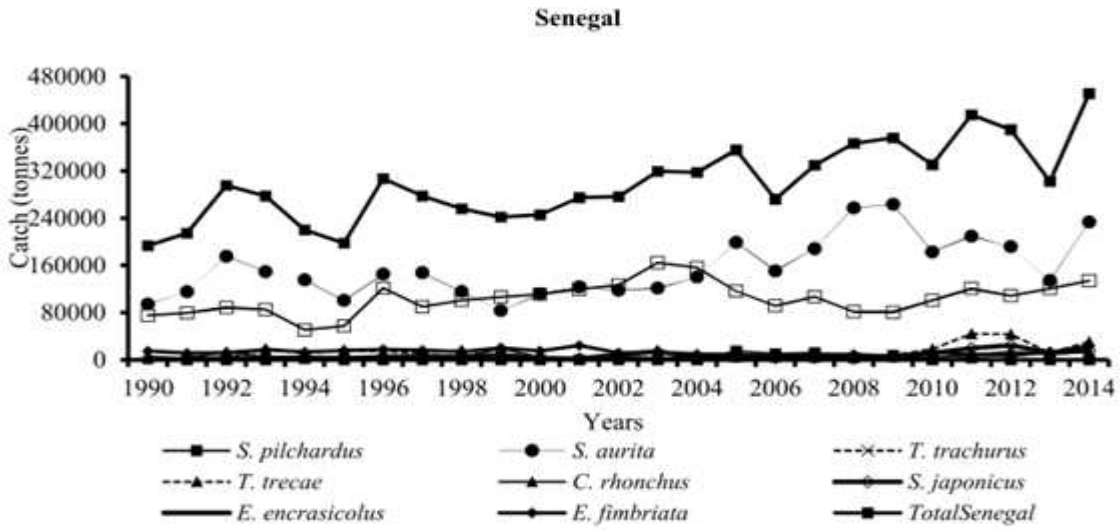



Figure 2-6 Captures au Sénégal par espèces et par année (en tonnes) de 1990 à 2014 (FAO, 2015).

A l'échelle de toute la sous-région, le Groupe de travail de la FAO a constaté que les captures totales de petits pélagiques pour la période allant de 1990 à 2014 ont fluctué avec une moyenne de près de 1,9 million de tonnes alors que la moyenne pour les cinq dernières années était de 2,4 millions de tonnes (Figure 2-7). La tendance à la baisse des captures totales observée de 2010 à 2013 s'est renversée en 2014. Une augmentation des captures totales des principaux petits pélagiques dans la sous-région a été ainsi observée de 2013 à 2014, avec une évolution d'environ 2 millions de tonnes en 2013 à environ 2,5 millions en 2014, constituant une augmentation de 24%par rapport à 2013.

La sardine (Sardina pilchardus) reste l'espèce dominante dans la région, constituant 37%de l'ensemble des captures des principales espèces de petits pélagiques en 2014. Une augmentation de la capture totale (30%) a été observée de 2013 à 2014, de 714 000 tonnes en 2013 à 929 000 tonnes en 2014. Cette augmentation peut avant tout être attribuée à une augmentation des captures dans les zones A+B et en Mauritanie.

L'autre groupe d'espèces dominant est les sardinelles qui, comme en 2013, contribue pour 32%aux captures totales des principales espèces de petits pélagiques en 2014: 24% pour la sardinelle ronde (Sardinella aurita) et 8% pour la sardinelle plate (Sardinella maderensis). La sardinelle ronde est la deuxième espèce la plus importante en termes de captures et les captures sont importantes depuis 2007 par rapport aux années antérieures. Les captures de sardinelle ronde ont montré une tendance à la hausse générale de 2006 à 2012, mais ont diminué, passant de 611 000 tonnes en 2012 à 458 000 tonnes en 2013, soit une diminution de 25%. En 2014, cependant, les captures ont atteint 598 000 tonnes, soit une augmentation de 31%, et les captures de 2014 se sont retrouvées au niveau de celles de 2012. La moyenne des captures au cours des cinq dernières années de sardinelle ronde était de 570 000 tonnes par rapport aux 379 000 tonnes sur la période 19902014. En revanche, les captures de sardinelle plate ont montré une légère diminution par rapport à 2013, passant de 206 000 à 203 000 tonnes en 2014, soit une baisse de 2%. La moyenne de capture au cours des cinq dernières années pour cette espèce est de 175 000 tonnes par rapport à une moyenne à long terme (1990 à 2014) de 136 000 tonnes. De nombreux changements dans la flottille ciblant cette espèce ont eu lieu au cours des dernières années, y compris en termes de temps et de couverture de zone, en particulier en Mauritanie.

Le chinchard du Cunène (Trachurus trecae) est l'espèce la plus importante de chinchard reportée dans les captures, constituant environ 9% (222 000 tonnes) du total des captures des par

rapport à 2013, lorsque les captures totales déclarées étaient de 135 000 tonnes. Avant l'augmentation signalée en 2014, les captures ont fluctué au cours de la série chronologique, enregistrant une baisse depuis 2008, lorsque les captures étaient de 401 000 tonnes, chiffre le plus élevé de la série chronologique. Les captures annuelles moyennes de chinchard du Cunène au cours des cinq dernières années ont été estimées à 228 000 tonnes, par rapport à une moyenne à long terme de 179 000 tonnes (1990-2014). Les captures de chinchard blanc (Trachurus trachurus) ont également augmenté de 2013 à 2014. 86 000 tonnes de chinchard blanc ont été débarquées en 2013, comparativement à 104 000 tonnes en 2014. Cela représente une augmentation de 21% par rapport à 2013. La moyenne des captures de chinchard au cours des cinq dernières années est de 85 000 tonnes. La troisième espèce de ce groupe, le chinchard jaune (Caranx rhonchus), a également enregistré une augmentation des captures totales de 2013 à 2014, avec des captures totales d'environ 12 000 et 17 000 tonnes respectivement, ce qui représente une diminution de 53%.

Les captures de maquereau (Scomber colias) au cours des 10 dernières années ont montré une tendance générale à la hausse, passant d'environ 137 000 tonnes en 2002 à 344 000 tonnes en 2014, chiffre le plus élevé de la série chronologique. Les captures en 2013 étaient de 278 000 tonnes. Les captures moyennes pour la période 1990-2014 ont été estimées à 183 000 tonnes, alors que la moyenne pour les cinq dernières années était de 279 000 tonnes. En 2014 comme en 2013, le maquereau a représenté 14% des captures totales de petits pélagiques.

Le total des captures d'anchois (Engraulis encrasicolus) en 2014 était de 19 000 tonnes, montrant une baisse continue depuis 2011 (150 000 tonnes en 2011, 115 000 tonnes en 2012 et 37 000 tonnes en 2013). Les captures de cette espèce ont fluctué avec une moyenne de 94 000 tonnes d'anchois pour les cinq dernières années (2010-2014).

Les captures d’éthmalose (Ethmalosa fimbriata) en 2014 représentent environ 3% du total des captures des principaux petits pélagiques dans la sous-région. Cela représente une diminution par rapport à 2013, puisque l’espèce représentait 6% du total des captures de petits pélagiques. Les captures totales d’éthmalose étaient de 83 000 tonnes en 2014, avec une baisse de 115 000 tonnes en 2013, soit une diminution de 27%. Une moyenne de 73 000 tonnes d’éthmalose a été enregistrée au cours des cinq dernières années et la tendance globale depuis 2008, à l'exception de 2011 et 2014, montre une augmentation rapide pour cette période (FAO, 2015).

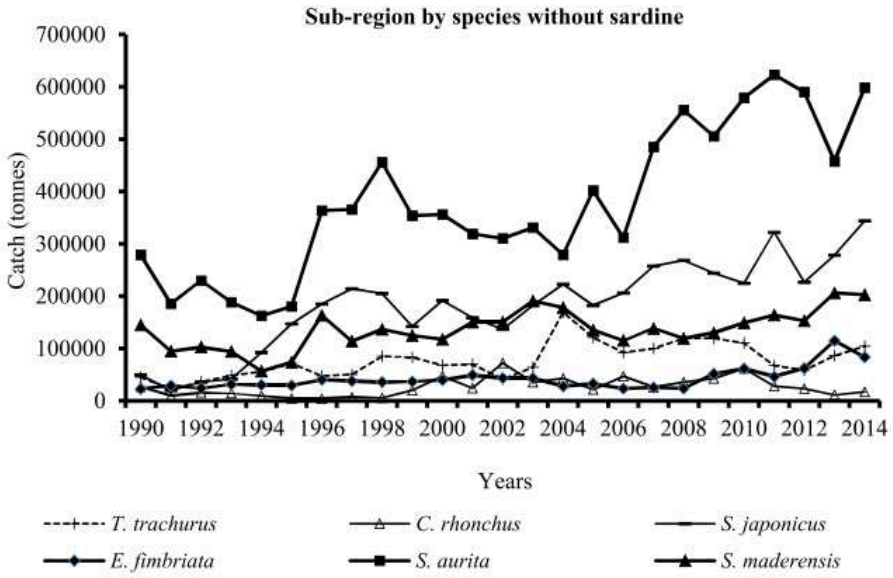



Figure 2-7 Captures dans la région, par espèces (sardine exclue) et par année (en tonnes) de 1990 à 2014 (FAO, 2015).

## 2.3. Dynamique des pêcheries de sardinelles au Sénégal

### 2.3.1. Effort de pêche des flottilles ciblant les sardinelles

#### 2.3.1.1. Effort de la flottille de pêche artisanale

Les sardinelles sont essentiellement exploitées à travers deux engins de la pêche artisanale. Il s'agit de la senne tournante et du filet maillant encerclant. La senne tournante est l'engin de pêche artisanale le plus élaboré et le plus proche des engins de pêche industrielle. Elle mesure entre 250 et 300 m pour une chute de 40 m. La pêche se pratique habituellement avec deux pirogues. La plus petite, 12 à 15 m, porte le filet. Elle permet d'encercler le banc de poissons en le doublant dans la direction où il se déplace. La manipulation de la coulisse permet de fermer le filet en forme de poche dans la partie inférieure. Le poisson est alors écopé à l'aide de grandes épuisettes par les nombreux pêcheurs à bord de la deuxième pirogue qui est plus grande (jusqu'à 20 m) et peut embarquer entre 10 et 20 tonnes de poisson. Elle est communément appelée pirogue porteuse. Le filet maillant encerclant est constitué de nappes de filets flottantes de longueur variant entre 250 et 450 m pour une chute de 10 à 12 m. Les pêcheurs encerclent le banc de poissons repéré à la surface de l'eau (les clupéidés en général). Les poissons se maillent dans les filets en tentant d'échapper au resserrement du cercle. Le filet est ensuite halé dans la pirogue et les poissons sont démaillés un à un.

En se référant aux recensements de 1997 et de 2005 (saison chaude) qui avaient couvert toute la zone côtière sénégalaise y compris les estuaires du Sine-Saloum et de la Casamance, on peut constater que la variation du nombre d'unités de pêche au filet maillant encerclant a été plus importante que celle des sennes tournantes (Figure 2-8). En effet, durant cette période de 8 ans, le nombre de filets maillants encerclant a plus que doublé en passant de 218 à 540 unités. En ce qui concerne les sennes tournantes, la hausse n'est que de 30,7% durant cette période. En outre, en comparant ces deux recensements à couverture intégrale par rapport aux autres qui ne couvrent que la zone de Saint-Louis à Djifère, on note une forte disparité selon les deux engins de pêche. En effet, alors que le nombre de sennes tournantes ne varie presque pas, une très grande différence est constatée au niveau des filets maillants. Cette situation reflète le fait que les unités à senne tournante sont essentiellement concentrées dans la zone de Saint-Louis à Djifère alors que les filets maillants encerclant qui ciblent intensément l'éthmalose opèrent

surtout dans les estuaires notamment au Sine-Saloum. La couverture partielle des recensements tend donc à minimiser très fortement l'importance et donc l'effort de pêche potentiel de la flottille de filets maillants encerclant.

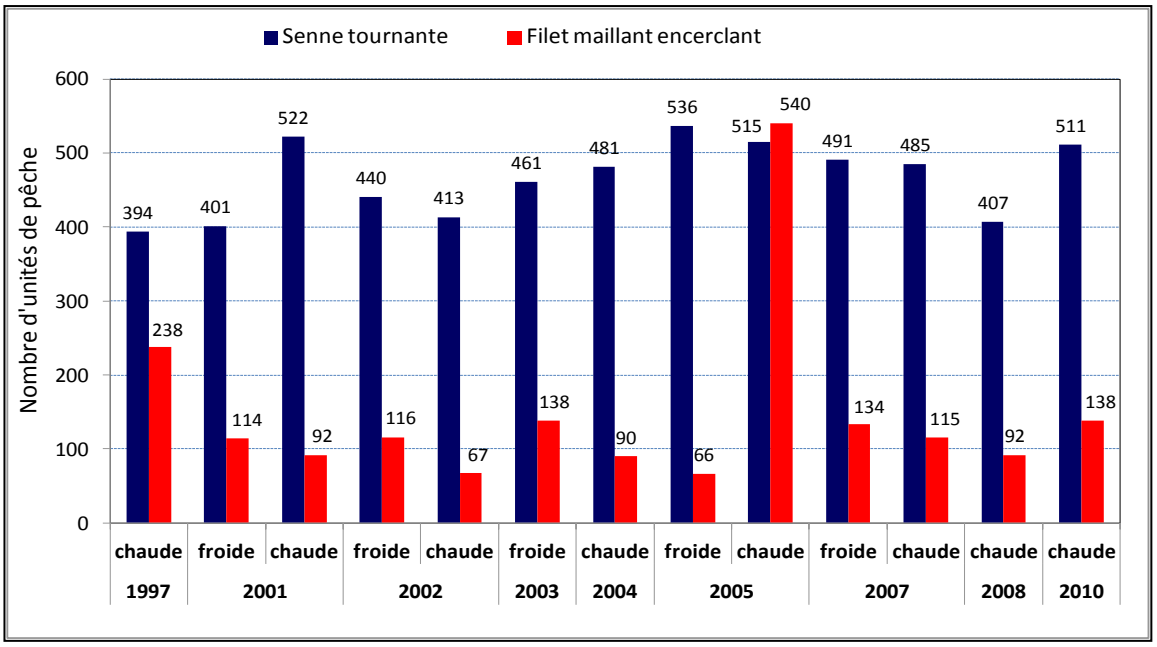



Figure 2-8: Nombre d'unités de pêche artisanale selon l'engin de pêche (Source : Thiao, 2012).

Globalement au cours de ces trente dernières années l'effort de pêche effectif des sennes tournantes a connu une évolution en deux phases (Figure 2-9). En effet, celui-ci a d'abord très fortement augmenté entre 1981 et 1993 en passant de 27 441 à 62 470 sorties, soit plus du double en 13 ans. Suite à cette période l'effort de pêche des sennes tournantes devient relativement stable autour de 60 000 sorties par avec cependant quelques fluctuations assez marquantes. En outre, on peut également noter qu'au cours des dernières années (depuis 2004) l'effort de pêche des sennes tournantes tend globalement à la baisse. Cette baisse est cependant à mettre en relation avec l'octroi de licences (environ 300 licences par an) par le gouvernement mauritanien qui a comme conséquence de transférer une bonne partie de l'activité des sennes tournantes basées notamment à Saint Louis.

En ce qui concerne l'effort des filets maillants encerclant, une variation significative n'a été notée qu'entre 1981 et 1985. Durant ces cinq années, l'effort des filets maillants a plus que triplé en passant de 7 594 à 24 995 sorties. Durant tout le reste de la période, excepté la suractivité exceptionnelle de 1996-1997, l'effort de pêche est resté stable légèrement au-dessus de 20 000 sorties par an. Il faut cependant signaler ici que cet effort concerne les unités basées dans la zone de couverture du système d'enquête du CRODT, et notamment les filets maillants encerclant opérant au niveau de la Petite Côte en particulier entre Mbour et Joal. Une couverture du Sine Saloum aurait certainement donné un niveau d'effort beaucoup plus important et dynamique.

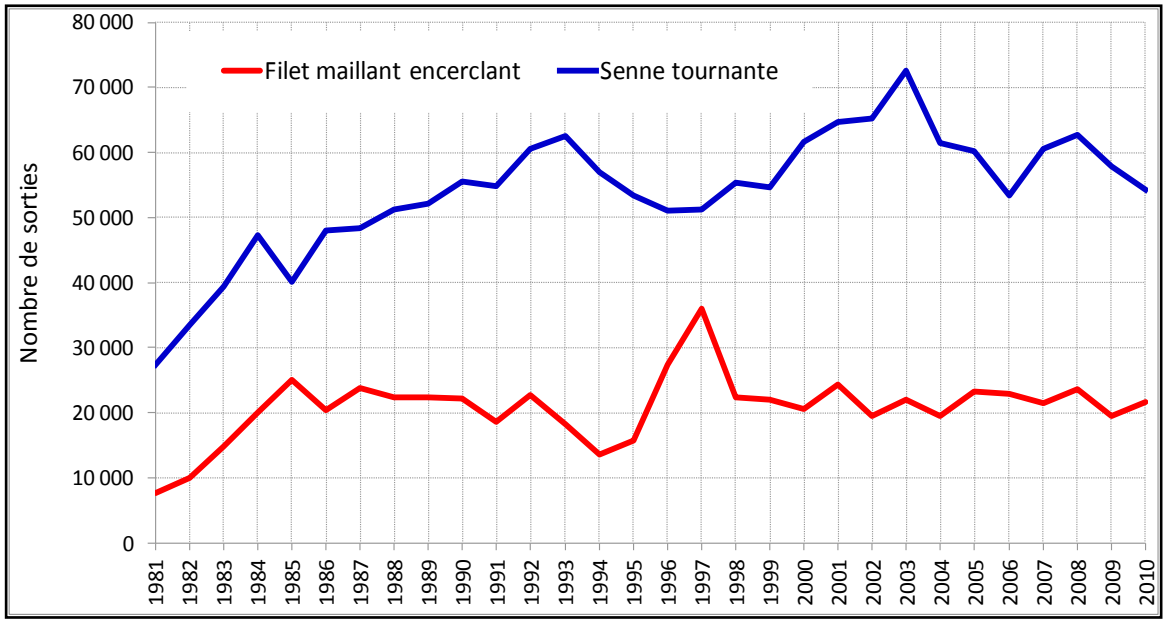



Figure 2-9 : Effort de pêche artisanale selon l'engin de pêche. (Source : Thiao, 2012).

### 2.3.1.2.Effort de la flottille de pêche industrielle

La pêche sardinière a été considérée par le gouvernement du Sénégal comme un prolongement de la pêche artisanale. De ce fait, les pêcheries d'espèces pélagiques côtières (sardinelles notamment) par un armement « amélioré » ou « semi-industriel » ont été le domaine privilégié d'expérimentation pour moderniser la pêche artisanale. Ainsi, la pêche pélagique côtière n'attire pas les industriels. Au début des années 60 un seul sardinier de type industriel a opéré à côté d'embarcations subventionnées dans le cadre du programme financé par le Fonds d'Aide et de Coopération pour la modernisation de la pêche artisanale. La flottille industrielle sardinière s'est alors réduite à ce seul navire jusqu'en 1967. Cette pêcherie est en fait confrontée à la concurrence de la pêche artisanale qui fournit des prises importantes à bas prix (Lourdelet, 1966 ; Chauveau, 1989). Néanmoins, les politiques de développement de cette pêcherie ont fini par mettre en place un armement qui dépasse une dizaine de bateaux au début des années 80.

Au cours des trente dernières années, l'évolution de la flottille industrielle sardinière a été marquée par trois grandes phases (Figure 2-10). Au cours de la première moitié des années 80 la flottille est caractérisée par une diminution très rapide. Elle passe alors de 19 bateaux en 1982 pour se stabiliser plus tard à seulement 5 bateaux à la fin des années 1980. Ensuite, au début des années 1990, l'entrée de quelques bateaux dans la pêcherie entraine une expansion significative de la flottille industrielle pélagique jusqu'à un niveau record de 29 bateaux en 1992. En fait ces nouveaux bateaux sont constitués de chalutiers pélagiques russes dont certains ont opéré jusqu'en 1996. Avec le départ des bateaux russes, le nombre de sardiniers actifs n'a plus dépassé 6 bateaux par an. On note même une baisse au cours des dernières années avec actuellement une stabilisation à trois bateaux par an.

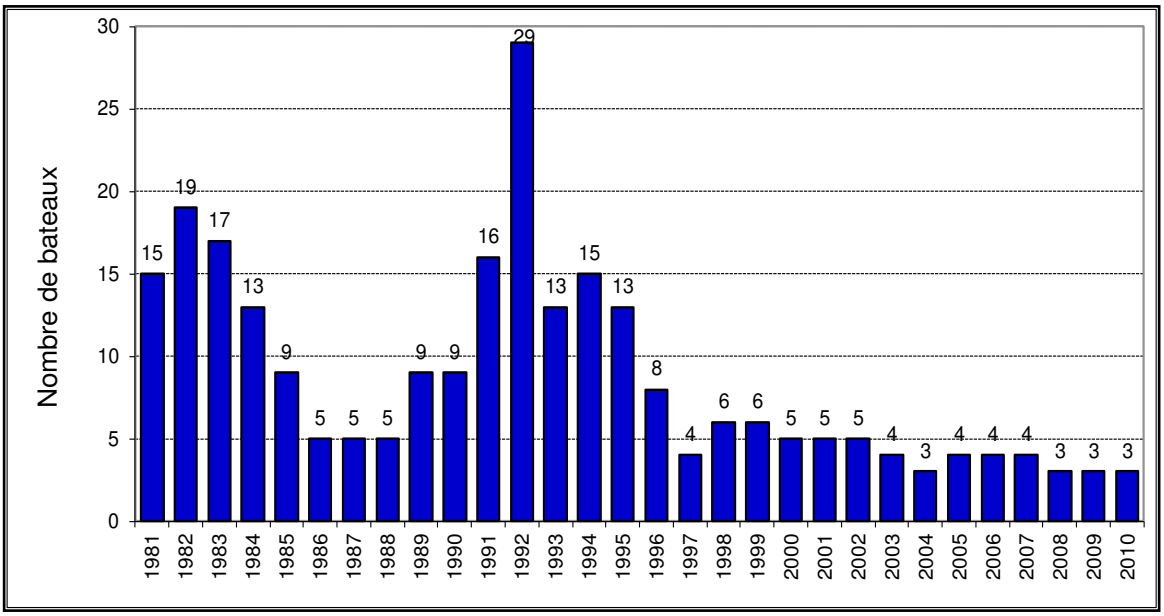



Figure 2-10 : Nombre de bateaux sardiniers opérationnels. Source : Thiao, 2012.

### 2.3.2. Evolution des débarquements de sardinelles

#### 2.3.2.1.Importance des sardinelles dans la pêche artisanale

En termes de volume de débarquements (Figure 2-11), les petits pélagiques constituent de loin la principale composante de la pêche artisanale sénégalaise (en moyenne 224 000 tonnes par an soit 76,7 % sur la période 1981-2010). Bien que certaines espèces de petits pélagiques comme l'éthmalose et le chinchard jaune ne soient pas négligeables, l'exploitation des petits pélagiques est fortement marquée par la prédominance de la sardinelle ronde et de la sardinelle plate (respectivement en moyenne 40,2% et 28,4% des débarquements totaux de la pêche artisanale).

En outre, alors que les quantités relatives à ces deux espèces sont globalement marquées par une très forte hausse au cours des trois dernières décennies, celles des autres espèces (autres pélagiques et toutes les espèces démersales notamment) sont restées presque stables. Ainsi, au cours de ces cinq dernières les débarquements de sardinelles dépassentparfois 70% des débarquements totaux de la pêche artisanale.

Dans la suite de l'analyse des débarquements, une description détaillée permet de mieux cerner la dynamique spatio-temporelle au niveau des huit centres de pêche régulièrement échantillonnés.

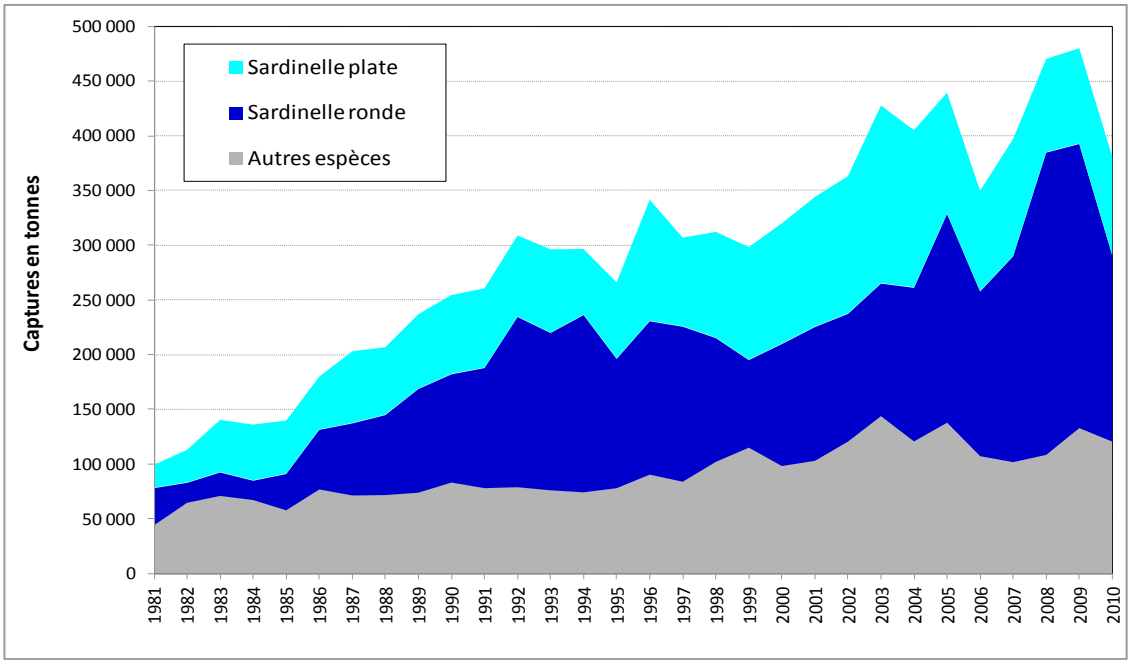



Figure 2-11 : Importance des sardinelles dans la pêche artisanale. Source : Thiao, 2012.

Le croisement des captures des deux espèces de sardinelles met en exergue l'absence d'une corrélation linéaire significative. En effet, le coefficient de détermination qui n'est que de 24,8 % montre que l'importance des captures de la sardinelle ronde n'est pas liée à celle de la sardinelle plate. Bien que les deux espèces soient parfois capturées dans les mêmes proportions, il existe des situations pour lesquelles des niveaux de captures très élevés de sardinelle plate sont combinés à une production moyenne voire faible de sardinelle ronde. Cette situation montre donc qu'aussi bien les stratégies de pêche que les facteurs favorisant l'abondance ne permettent d'attester l'hypothèse d'une combinaison (corrélation positive) ou d'une alternance (corrélation négative) de la production des deux sardinelles (Figure 2-12).

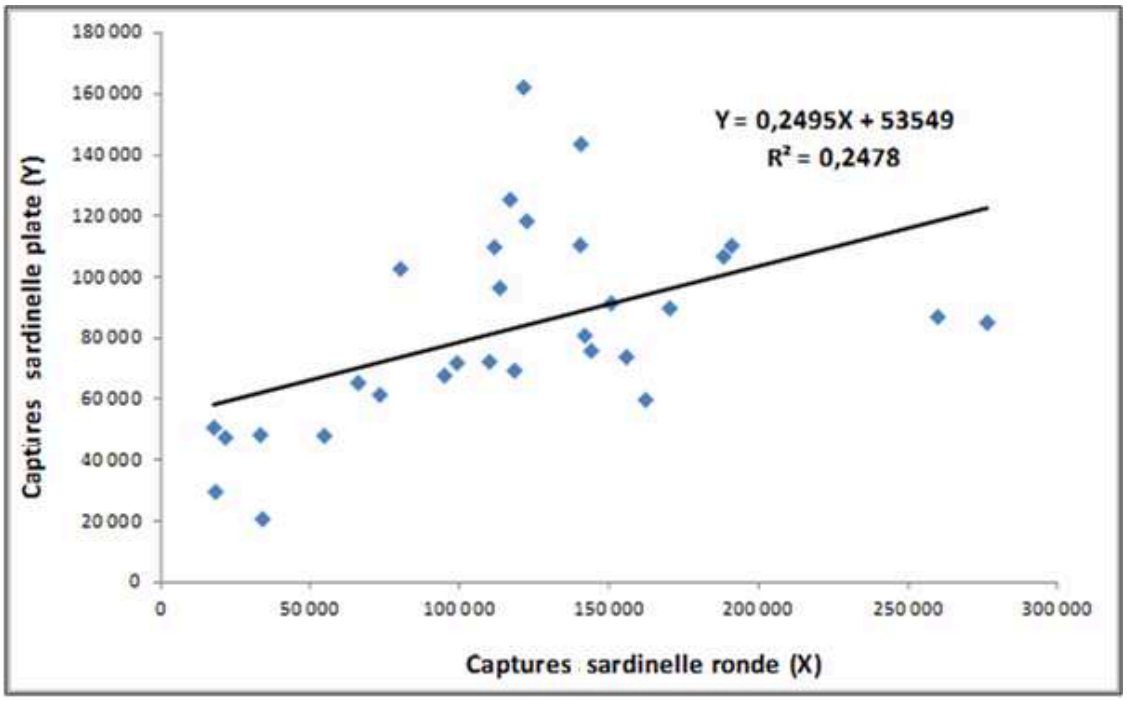



Figure 2-12 : Relation entre les captures des deux espèces de sardinelle. Source : Thiao, 2012.

### 2.3.2.2. Importance des sardinelles dans la pêche industrielle

Les débarquements de la pêche sardinière connaissent également une tendance semblable à celle du nombre de bateaux. D'une manière générale, la composition par espèce des débarquements est caractérisée par une très faible hétérogénéité (Figure 2-13). Les deux espèces de sardinelle (sardinelle ronde et sardinelle plate) sont prédominantes et peuvent représenter jusqu'à 95 % des débarquements. Les débarquements de chinchard jaune sont certes relativement moins importants mais ne sont pas négligeables (jusqu'à 3 676 tonnes en 1982).

Au début de la série, on note une chute très rapide des débarquements entre 1981 et 1988. Durant cette période les quantités débarquées ont été divisé par sept en passant de 31 863 à 4 199 tonnes. A partir de 1989 l'entrée de nouveaux bateaux propulse le niveau des débarquements vers des sommets. C'est notamment le cas du record historique en 1992 avec 57 803 tonnes. Au cours de cette période, et en particulier au début des années 90, on peut noter qu'une bonne partie des quantités déclarées est classée dans la rubrique « Divers ». Cette situation qui a surtout caractérisé les chalutiers pélagiques russes à l'époque pose la question de la fiabilité de leurs déclarations. A partir de 1996 après le départ des bateaux russes, les débarquements reviennent à leur niveau habituel de la fin des années 80. D'ailleurs, on constate même une érosion progressive des quantités débarquées qui ont été presque négligeables en 2006-2007.

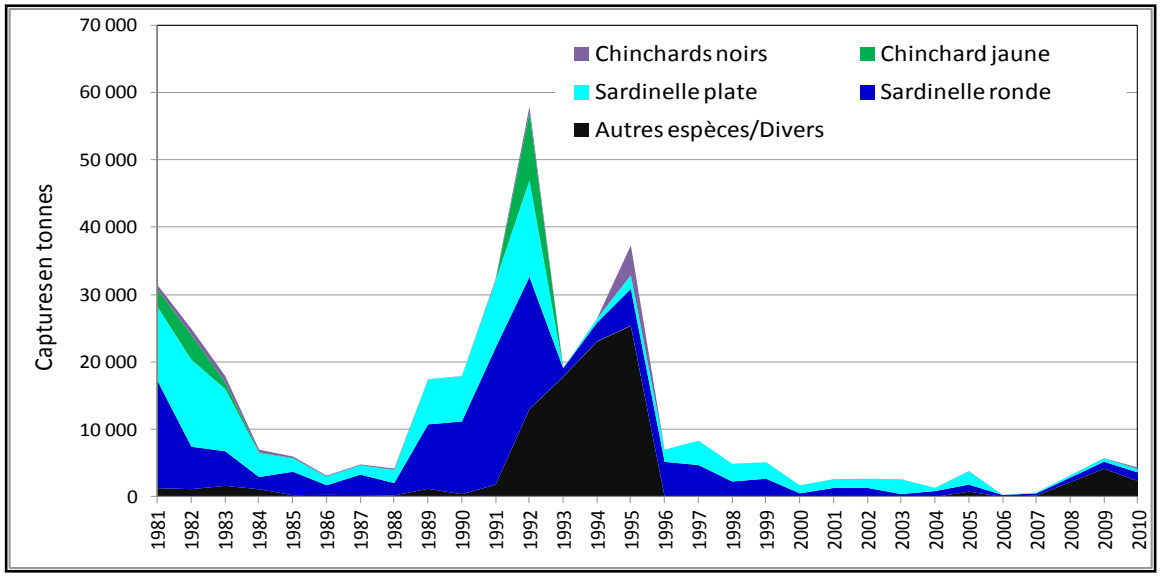



Figure 2-13 : Importance des sardinelles dans la pêche industrielle. (Source CRODT 2011).

### 2.3.2.3.Dynamique spatio-temporelle des débarquements de sardinelles

Bien que Mbour et Joal soient prédominants jusqu'au début des années 2000, les débarquements de sardinelle ronde sont relativement importants dans la plupart des huit centre de pêche régulièrement échantillonnés (Figure 2-14). Il n'y a qu'à Soumbédioune et Ouakam habituellement caractérisés par des pêcheries démersales où les débarquements de sardinelle ronde sont assez négligeables. En termes d'évolution spatio-temporelle, trois phases peuvent être globalement notées. Du début des années 80 à la fin de la première moitié des années 90 on note un développement rapide de la pêcherie dans tous les centres de pêche. Ce développement est caractérisé par une forte croissance des débarquements plus marquée sur la Petite Côte surtout à Mbour où le record historique d'environ 77 500 tonnes de sardinelle ronde a été atteint en 1992.

A partir de la deuxième moitié des années 90, les débarquements de sardinelle ronde ont connu une tendance générale à la baisse qui s'est poursuivie jusqu'au début des années 2000. Il n'y a qu'à Kayar où la tendance est globalement en hausse continue durant les trois décennies. A Mbour on peut même parler d'effondrement car à partir de 1992 les captures ont fortement baissé pour atteindre seulement 13 626 tonnes en 1999, soit une chute de 82,4 % en 6 ans. A Joal, la baisse des débarquements a démarré plus tardivement à partir de 1997 avec cependant des fluctuations assez marquées.

La troisième phase de l'évolution des débarquements de sardinelle ronde est intervenue à partir de 2002-2003. En effet, à partir de cet instant, on note une amélioration sensible des volumes débarqués. Cette amélioration plutôt légère dans la plupart des centres de pêche est par contre très spectaculaire au niveau de Saint-Louis où les débarquements ont évolué soudainement vers des records (jusqu'à 111 343 tonne en 2008). Cette situation qui a fini par placer les débarquements à Saint-Louis au-dessus de ceux des centres de la Petite Côte (Mbour et Joal) s'explique par les licences de pêche octroyées par le gouvernement mauritanien qui ont permis d'accéder à des zones de pêche où le stock de sardinelle ronde est en meilleur état par rapport au côtes sénégalaises. Toutefois, au cours des deux dernières années 2009-2010, les débarquements de sardinelle se réorientent à la baisse dans la presque totalité des centres de pêche.

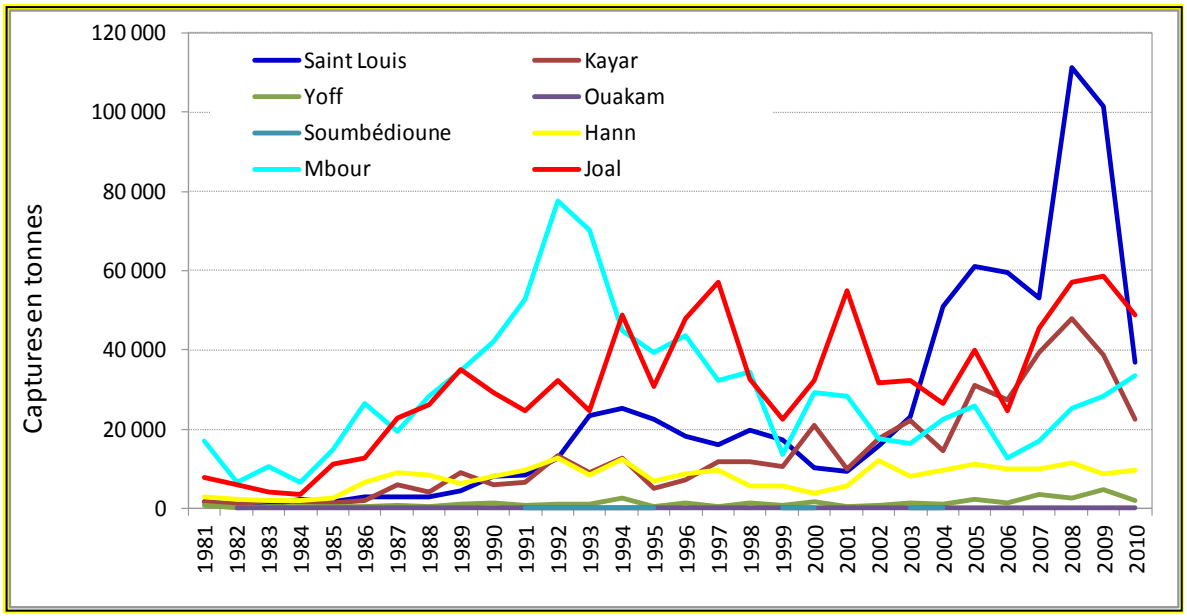



Figure 2-14 : Débarquements de sardinelle ronde selon le centre de pêche. Source : Thiao, 2012.

La répartition spatio-temporelle des débarquements de sardinelle plate montre d'abord une prédominance du centre de Joal et dans une moindre mesure de Mbour (Figure 2-15). Durant une bonne partie de la période 1981-2010, les débarquements effectués dans ces deux centres et surtout à Joal ont connu une tendance marquée par une forte hausse. A Joal, avec un record historique de 109 717 tonnes en 2003, le volume des débarquements a été multiplié par 14 par rapport à son niveau de 1981. Toutefois, à partir de l'année 2004, la tendance des débarquements de sardinelle plate est entrée dans une phase de décroissance très marquée aussi bien à Joal qu'à Mbour. Ainsi, à Joal, le volume débarqué n'est que de 51 950 tonnes en 2010, soit une chute de 52,7 % par rapport au record de 2003. Durant cette même période, la baisse des débarquements de sardinelle plate est de 66,2 % alors que dans les autres centres comme Saint-Louis et Kayar on enregistre plutôt une légère amélioration.

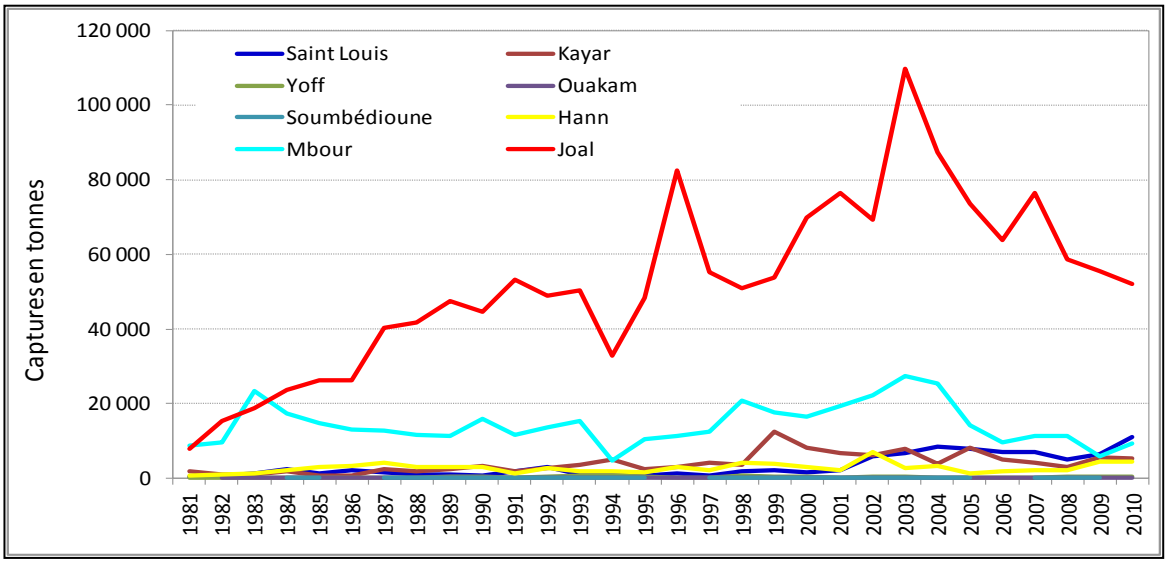



Figure 2-15 : Débarquements de sardinelle plate selon le centre de pêche. Source : Thiao, 2012.

### 2.3.3. Indicateurs de l'état d'exploitation des sardinelles

#### 2.3.3.1.Dynamique des « Cap*tures Par Unité d'Effort* » de sardinelles rondes

Au Sénégal, les pêcheries ciblent la sardinelle avec une préférence pour la sardinelle ronde.

Les indices d'abondance (Capture Par Unité d'Effort CPUE) de la sardinelle ronde (Sardinella aurita) pour la pêche artisanale, calculés en fonction du nombre de sorties effectuées, sont restés assez stables au Sénégal sur la période de 1990 à 2003 où elles ont commencé à connaître une augmentation significative pour atteindre en 2009 la valeur maximale de la série (3.5 tonnes/sortie) après avoir atteint en 2005 le niveau remarquable de 2.4 tonnes/sortie. La Figure 2-16, montre cette évolution depuis 1990.

En 2008 et 2009, l'évolution des captures de la pêche artisanale est marquée par d'importantes prises dues aux débarquements élevés de sardinelle ronde à Saint-Louis par la flottille artisanale sénégalaise (101 000 tonnes en 2009). On a considéré pour ces années qu'une très large part de la capture artisanale sénégalaise a été effectuée dans les eaux mauritaniennes.

En 2010, une chute importante du CPUE de la sardinelle ronde a été observée mais il est difficile aussi de l'affecter seulement à la zone sénégalaise du fait que les données sur l'effort ne précisent pas les zones de pêche (Sénégal ou Mauritanie).

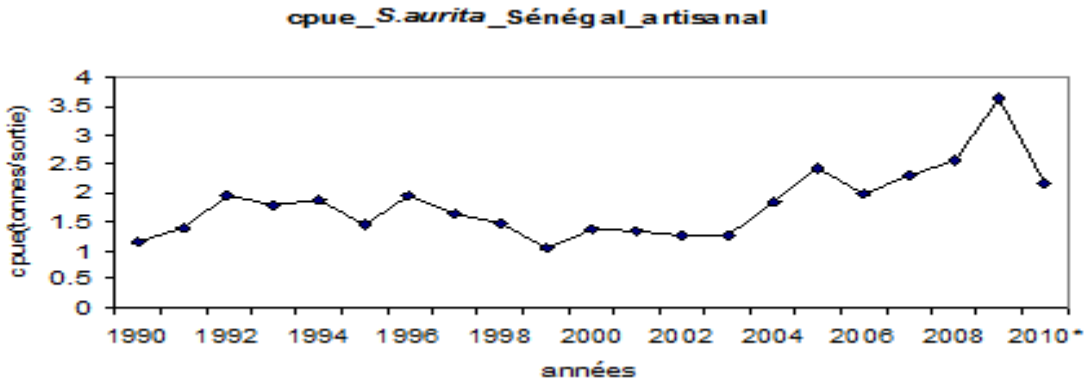



Figure 2-16 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde (Sardinella aurita) dans la zone sénégalaise et pour la pêche artisanale depuis 1990 (Sarré, 2012).

Avant 2000, la pêche industrielle était dominée par la présence d'industriels de la Fédération de Russie opérant avec de gros senneurs et des chalutiers pélagiques. Les senneurs ont disparu à partir de 1994 et le nombre de chalutiers est passé de quinze en 1992 à onze à 1999. Les chalutiers russes ont cessé d'opérer au Sénégal en juin 1999. Pour la pêche industrielle au Sénégal, les indices d'abondance des sardinelles étaient à leur maximum en 1990 où ils ont atteint les valeurs de 45 tonnes/jour pour la Sardinella aurita. Ils ont subi une chute importante sur les trois années qui ont suivi pour se retrouver à 6 tonnes/jour pour la S. aurita. Depuis 1993, les indices d'abondance de la sardinelle ronde ont fluctué autour de la valeur moyenne de 7.6 tonnes/jour. La Figure 2-17 illustre cette évolution.

Les indices d'abondance élevés remarquées au début de la série (1990) doivent être liés aux données recueillies sur les gros senneurs russes. Par ailleurs, la hausse des CPUE observées pour la pêche artisanale à partir de 2007 n'est pas reflétée sur les CPUE de la pêche industrielle. Ces différences peuvent également provenir du manque de précision sur les données d'effort à Saint-Louis (provenance Sénégal ou Mauritanie).

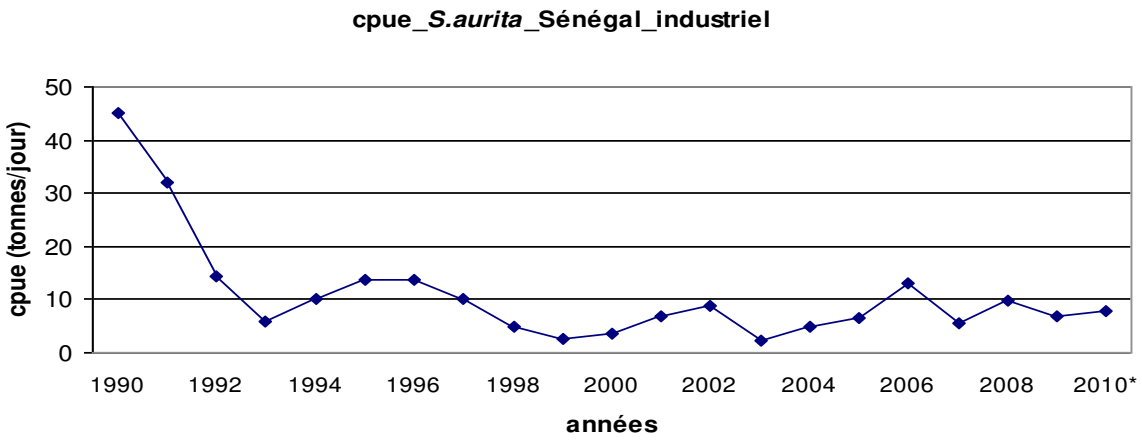



Figure 2-17 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde Sardinella aurita dans la zone sénégalaise et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012).

En Mauritanie, la pêche artisanale ciblant les sardinelles n'a commencé à se développer que très récemment (2009) avec l'apparition et le développement très rapide de l'industrie de farine de poisson utilisant notamment comme matières premières les sardinelles capturées par des pirogues sénégalaises et mauritaniennes. Cette exploitation très faible avant 2009 a induit une absence de recueil des données d'effort sur cette période. Les indices d'abondance ne sont donc pas disponibles pour cette pêcherie. Par contre, une pêcherie industrielle active constituée de navires battant pavillon de l'Union européenne (Pays-Bas, France, Royaume-Uni et Allemagne) et ciblant les sardinelles, existe depuis 1996. Quant aux autres chalutiers industriels (Fédération de Russie, Ukraine et autres) ils pêchent principalement des chinchards. Les indices d'abondance de la pêcherie de l'Union européenne ont connu une chute progressive de 1996 à 2004, passant respectivement de 120 tonnes/jour à 40 tonnes/jour avant de commencer à remonter depuis 2004 avec une pointe notable (140 tonnes/jour) enregistrée en 2007. La Figure 2-18 montre cette évolution depuis 1996. Il faut noter que ces indices d'abondance concernent principalement la sardinelle ronde si on sait que la capture totale des sardinelles rondes par l'Union européenne depuis 1996 s'élève à 10 fois plus que celle des sardinelles plates.

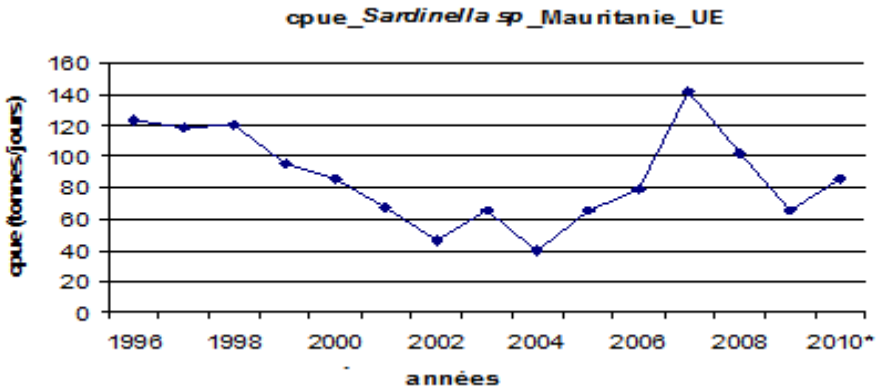



Figure 2-18 : Evolution des indices d'abondance des sardinelles en Mauritanie pour la pêche industrielle depuis 1996 (Sarré, 2012).

Au Maroc, les sardinelles sont exploitées exclusivement par une flottille marocaine de senneurs côtiers et par des chalutiers industriels de la Fédération de Russie, de l'Union européenne, d'Ukraine et d'autres pays, évoluant au nord du Cap Blanc (Zone C).

Les indices d'abondance de la sardinelle ronde pour la flotte russe et ukrainienne ont subi un essor régulier de 1994 à 1999 où les captures par unité d'effort sont passées respectivement de 2 tonnes/jour à 13 tonnes/jour. La même situation est observée depuis 2005 où les indices d'abondance, faibles au début (5 tonnes/jour), progressent régulièrement jusqu'à attendre 20 tonnes/jour en 2009 pour la flotte ukrainienne. La Figure 2-19 montre cette évolution depuis 1994.

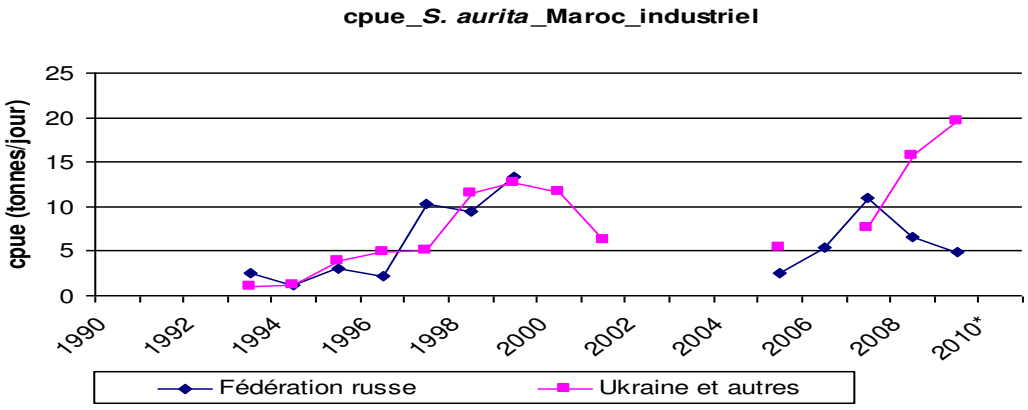



Figure 2-19 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle ronde Sardinella aurita dans la zone marocaine et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012).

### 2.3.3.2.Dynamique des cpue de sardinelles plates

Dans la zone sénégambienne, les indices d'abondance de la sardinelle plate (Sardinella maderensis) pour la pêche artisanale sontrelativement plus faibles que ceux de la sardinelle ronde sur les deux dernières décennies et ont fluctué autour d'une tonne/sortie de 1990 à 2002, avec une légère hausse en 1996, avant de connaître une augmentation significative de 2002 à 2004 où la valeur maximale de la série a atteint 2 tonnes/sortie. La Figure 2-20 montre cette

évolution depuis 1990. Depuis l'année 2004, les indices d'abondance de la sardinelle plate reviennent progressivement vers la moyenne de 1 tonne/sortie observée dans les années 90.

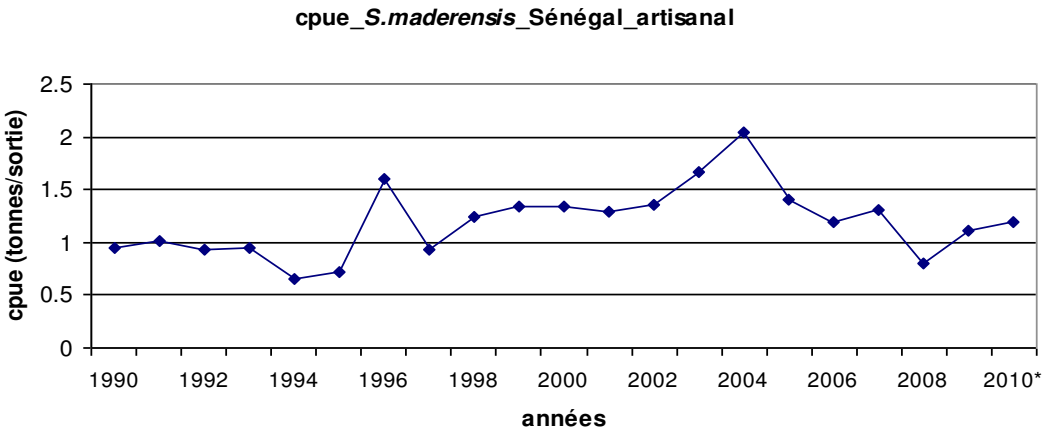



Figure 2-20 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone sénégalaise et pour la pêche artisanale depuis 1990 (Sarré, 2012).

Pour la pêche industrielle, les indices d'abondance de la Sardinella maderensis avait atteint le maximum de 45 tonnes/jour et 28 tonnes/jour en 1990. Ensuite, ils ont subi une chute importante sur les trois années qui ont suivi pour se retrouver à 10 tonnes/jour en 2004. Depuis 1993, une forte variation est observée pour la sardinelle plate dont les indices d'abondances pour la pêche industrielle ont connu un second pic (25 tonnes/jour) en 1995 avant de se stabiliser autour de la valeur moyenne de 10.27 tonnes/jour jusqu'en 2005 et se maintenir ensuite à un niveau très bas (< 3.3 tonnes/jour durant les six dernières années). La Figure 2-21 illustre ces évolutions.

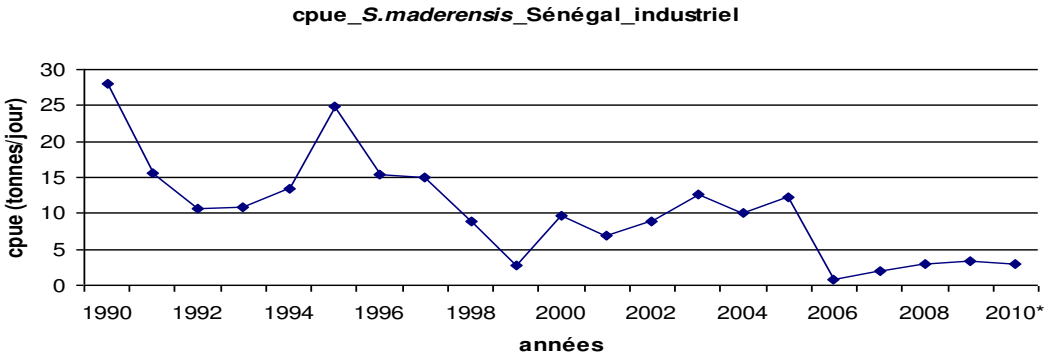



Figure 2-21 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone sénégalaise et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012).

Au Maroc, la sardinelle plate est peu présente au nord du Cap Blanc et les indices d'abondance calculés pour la flotte industrielle ont été insignifiants depuis 1990 ne dépassant guère 1.6 tonnes/jour depuis 2005 (Figure 2-22).

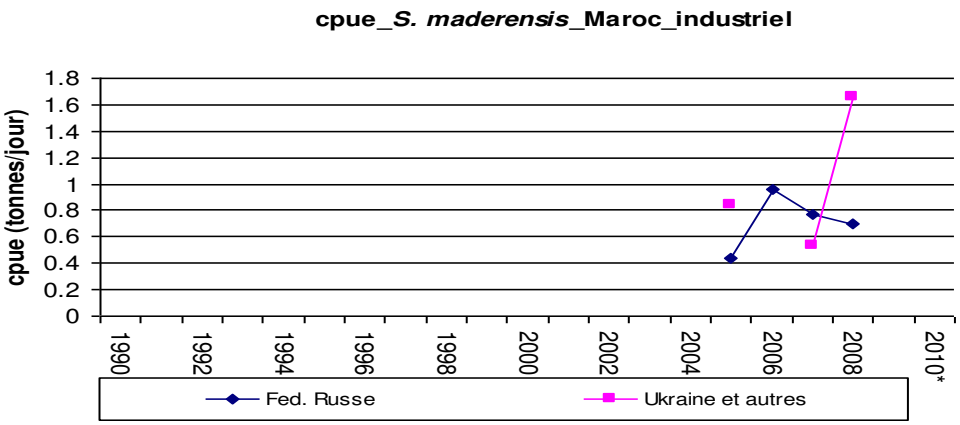



Figure 2-22 : Evolution des indices d'abondance de la sardinelle plate Sardinella maderensis dans la zone marocaine et pour la pêche industrielle depuis 1990 (Sarré, 2012).

### 2.3.3.3.Evolution des tailles de la sardinelle ronde

Globalement jusqu'à la fin des années 90 la taille moyenne des individus de sardinelle ronde est restée relativement stable autour de 25 cm (Figure 2-23). On peut également noter que les individus débarqués à Saint-Louis sont habituellement plus grands que ceux trouvés dans les autres centres. A partir de la deuxième moitié des années 90, la taille moyenne est orientée à la baisse dans tous les centres. Dans le cas des centres de la Petite Côte (Mbour et Joal), cette baisse s'est poursuivie sur tout le reste de la période. Ainsi, la taille moyenne qui se situait autour de 26 cm en 1996-1997, se trouve actuellement aux environs de 22 cm. Par contre, au Figure 2-23 niveau de Saint-Louis et de Hann, la taille moyenne s'est plutôt améliorée à partir de 2003. Cette amélioration serait probablement en rapport avec les captures faites dans les eaux mauritaniennes. En termes de variabilité, les grandes valeurs des écart-types au cours de ces dernières années mettent en exergue une plus grande hétérogénéité des individus capturés. En effet, avec la raréfaction de la ressource, l'exploitation des petits individus s'intensifie en combinaison avec la capture de grands individus. Ainsi, contrairement à la période qui va jusqu'au début des années 2000 durant laquelle l'exploitation était plus axée sur les grands individus de sardinelle ronde, au cours de ces dernières années la sélectivité pondérale des pêcheries est plus faible avec un mélange de plus en plus hétérogène d'individus de diverses tailles.

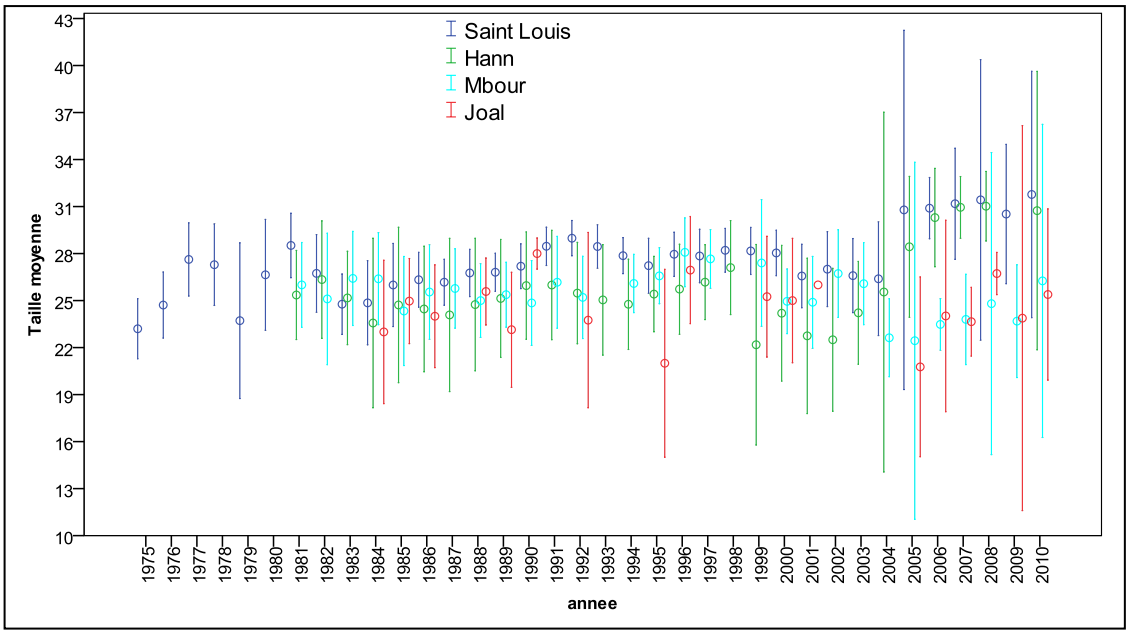



Figure 2-23 : Evolution de la taille moyenne (longueur totale) de la sardinelle ronde par centre (1981-2010) (Thiao, 2012).

### 2.3.3.4.Evolution des tailles de la sardinelle plate

En ce qui concerne la sardinelle plate, la taille moyenne des individus débarqués dans les centres de pêche de la Petite Côte (fief de la pêcherie) est marquée par deux phases (Figure 2-24). Elle se caractérise par une hausse progressive jusqu'au début des années 90 suivie d'une diminution continue. Ainsi, alors qu'elle était autour de 25 cm au milieu des années 90, la taille moyenne de la sardinelle plate est actuellement aux environs de 20 cm. Comme dans le cas de la sardinelle ronde et notamment au niveau de la Petite Côte, le stock de sardinelle plate est donc affecté par une surexploitation de croissance depuis plus d'une décennie. Dans le cas de la sardinelle plate, la variabilité des tailles est également plus forte au cours de ces dernières années. Cette situation résulte également d'une plus grande hétérogénéité pondérale des captures actuelles. Ainsi, à côté des grands individus de sardinelle plate, les petits individus sont maintenant très bien ciblés, ce qui entraine des écarts important en termes de tailles.

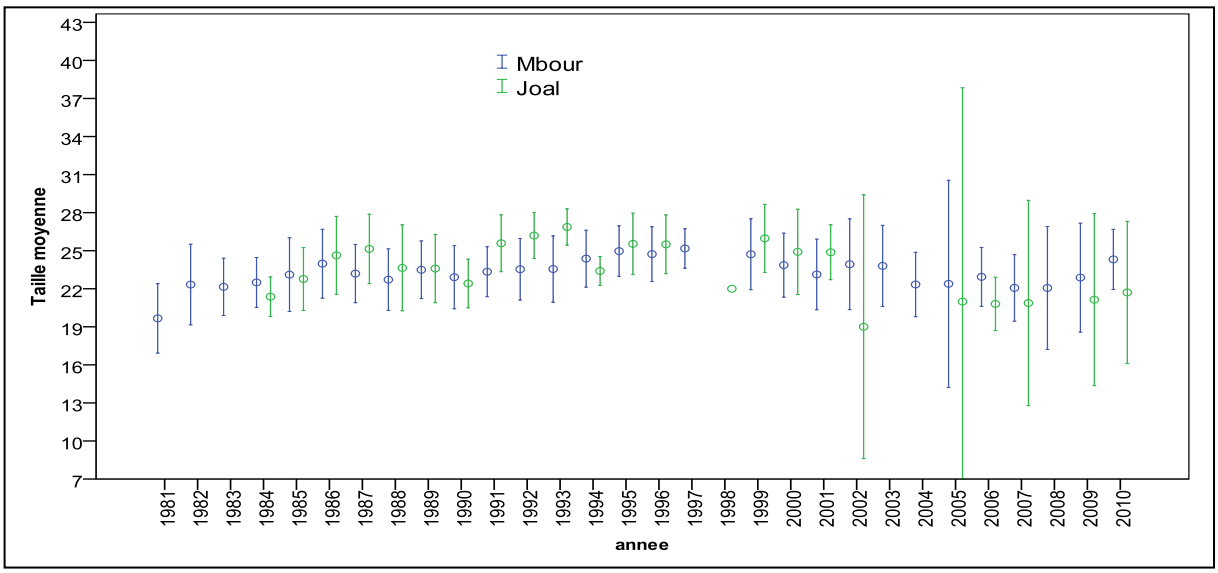



Figure 2-24 : Evolution de la taille moyenne (longueur totale) de la sardinelle plate par centre (1981-2010) (Thiao, 2012).

Compte tenu du rôle vital que jouent les facteurs environnementaux dans la bioécologie des sardinelles, les mutations hydroclimatiques constatées risquent d'entraîner d'importants bouleversements aussi bien à l'échelle globale que locale. Il est probable que la température de l'eau ait des effets directs sur la reproduction, la survie des larves et la croissance. Malgré la rareté d'études approfondies sur les écosystèmes côtiers sénégalais, quelques exemples d'investigations à travers le monde ont permis de révéler que les changements du climat et en particulier le réchauffement des eaux entraînent des modifications dans la distribution des espèces avec notamment une remontée d'espèces tropicales vers les eaux tempérées. Ainsi, des espèces de la zone intertropicale sont observées de plus en plus fréquemment et en plus grand nombre dans des latitudes plus élevées (Houdart, 2004). Les sardinelles étant des espèces sténothermes (ne vivent que dans une faible marge de température) et sténohalines (ne tolèrent que de faibles variations de salinité), les variations de température et de salinité entraînent très souvent des déplacements d'espèces (Fréon, 1988).

Face à ces multiples risques écologiques, toute perspective de gestion intégrée des ressources halieutiques doit donc raisonnablement prendre en compte les effets potentiels des mutations hydroclimatiques dans les écosystèmes côtiers. Cette nécessité est d'autant plus grande que les projections sont particulièrement pessimistes. Outre l'aggravation du réchauffement atmosphérique et océanique, les prévisions montrent, entre autres, une modification des eaux thermohalines et une altération des régimes de perturbation des vents (Cury et Morand, 2004). Plus localement (au Sénégal), les scénarios climatiques (Niang-Diop, 2002) ont prévu à l'horizon 2050 une hausse de 1,0°C (avec une sensibilité de 1,5°C) par rapport à la normale 1960-1990 dans la partie ouest du pays. Combinées à la pression de pêche actuelle qui affaiblit certainement la résilience et la capacité d'adaptation des espèces surexploitées, les mutations hydroclimatiques en cours pourraient tout simplement accélérer à moyen et long termes la raréfaction, voire la disparition de certaines ressources halieutiques, notamment les sardinelles. Cependant, ces effets potentiels au niveau local demeurent encore très mal étudiés. De ce fait, l'intégration des mutations hydroclimatiques dans la gestion des ressources halieutiques sénégalaises devrait surtout se focaliser sur l'approfondissement des connaissances scientifiques et empiriques sur les effets écologiques réels des changements climatiques au niveau local afin de mieux adapter les politiques de pêche.

## 2.4.Evaluation des stocks de petits pélagiques par acoustique

### 2.4.1. Calcul des biomasses lors des campagnes du N/O Itaf Déme et du N/O Fridtjof Nansen

Lors des campagnes du N/O Itaf Déme et du R/V Fridtjof Nansen au Sénégal, les valeurs d'intégration sont allouées aux neuf grands groupes résumés dans le Tableau 2-1 et ceci en fonction de la nature des échogrammes, du comportement observé des espèces ciblées et de la composition des traits de chaluts dans la zone. La conversion des valeurs SA en nombre d'individus par nm2 est effectuée en utilisant la relation TS (Target Strength) / longueur suivante, recommandée par Foote (1987) pour les clupéidés :

$$TS=20*\log L-72 \text{ dB}$$

qui peut s'exprimer en surface sous la forme (cf. Toresen et al 1998) :

$$CFi-=1.26*10\ 6*L-2$$

Oú

L représente la longueur totale en cm.

CFi le facteur de conversion de l'individu i.

La densité en nombre d'individus par classe de taille et par nm2 est alors obtenue par l'application de la formule :

$$\rho_i = S_A \cdot \frac{p_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{p_i}{C_{F_i}}}$$

Où

ρi = densité de poissons dans la classe de taille i

$S_A$ = valeur moyenne d'intégration

pi = pourcentage de la classe de taille i dans l'échantillon

L'équation ci-dessus montrant que la conversion des valeurs d'intégration $S_A$ en biomasse dépend de la distribution des tailles dans la zone considérée, une fréquence de tailles représentative de la zone est déduite chaque fois que c'est possible et lorsque la composition entre adultes et juvéniles est assez homogène.

Les opérations de pêche sont effectuées à l'aide d'un chalut pélagique mais souvent aussi à l'aide d'un chalut démersal utilisé en pélagique en le maintenant en surface par l'intermédiaire de gros ballons. Sur chaque station, un échantillon représentatif est prélevé pour en déterminer la composition, le poids et le nombre par espèce, la fréquence de taille pour les espèces cibles, fréquences de tailles permettant de déterminer pi, pourcentage de la classe de taille i dans l'échantillon.

La relation taille poids utilisée pour l'estimation de la biomasse est :

W=L3*cond /100

Où un facteur de condition cond=0.96 est utilisé pour les sardinelles et les chinchards, 0.88 pour les carangidés, clupéidés et associés dont une taille moyenne de 23 cm est appliquée pour l'évaluation de la biomasse.

Tableau 2-1 Allocation des valeurs $s_A$ aux grands groupes.

| **Groupes** | **Taxon** | **Espèces** |
|---|---|---|
| Sardinella aurita | | S. aurita |
| Sardinella maderensis | | S. maderensis |
| Chinchards | Trachurus sp. | T. trecae<br>D. rhonchus |
| Maquereau | | Scomber japonicus |
| Sardine | Sardine | S. pilchardus |
| Autres pélagiques 1 | Clupeiformes1 | Ilisha africana<br>Engraulis encrasicolus |
| Autres pélagiques 2 | Carangidae2 | Sélène dorsalis |

| | | |
|---|---|---|
| | Scombridae | Chloroscombrus chrysurus<br>Decapterus rhonchus<br>Alectis alexandrinus<br>Euthynnus alletteratus<br>Sarda sarda<br>Scomber japonicus |
| | Sphyraenidae | Sphyraena guachancho |
| | Autres | Trichiurus lepturus<br>Zeus faber |
| Demersaux | Sparidae3 | Dentex angolensis<br>D. macrophthalmus<br>D. congoensis<br>D. canariensis<br>D. barnardi<br>Pagellus bellottii<br>Sparus caeruleostictus<br>S. pagrus africanus |
| Big-eye grunt | autres taxii | Pseudupeneus prayensis<br>Brachydeuterus auritus<br>Ariomma bondi<br>Pomadasys incisus<br>Galeoides decadactylus |
| Mesopelagiques | Myctophidae3 | |
| | Autres mesopelagiques | |
| Plancton | Calanoidae | Calanus sp. |
| | Euphausiidae | Meganyctiphanes sp. |
| | Autre plancton | |

### 2.4.2. Variabilité spatiale et temporelle de la biomasse de petits pélagiques en Afrique de l'Ouest

#### 2.4.2.1.Evolution interannuelle des biomasses de sardinelles

2.4.2.1.1. Sardinella aurita

2.4.2.1.1.1.Sénégambie

Une stabilité relative a été observée sur les biomasses estimées par le N/O Dr Fridtjof Nansen pour la sardinelle ronde, avec une très légère tendance à la hausse depuis 1995 où la biomasse est passée de 200 000 tonnes en moyenne entre 1995 et 1996 à 209 000 tonnes en 2006. Seule l'année 1999 a connu une pointe de 573 000 tonnes. La Figure 2-25 montre cette évolution depuis 1995. La biomasse moyenne estimée durant cette période a été de 210 000.

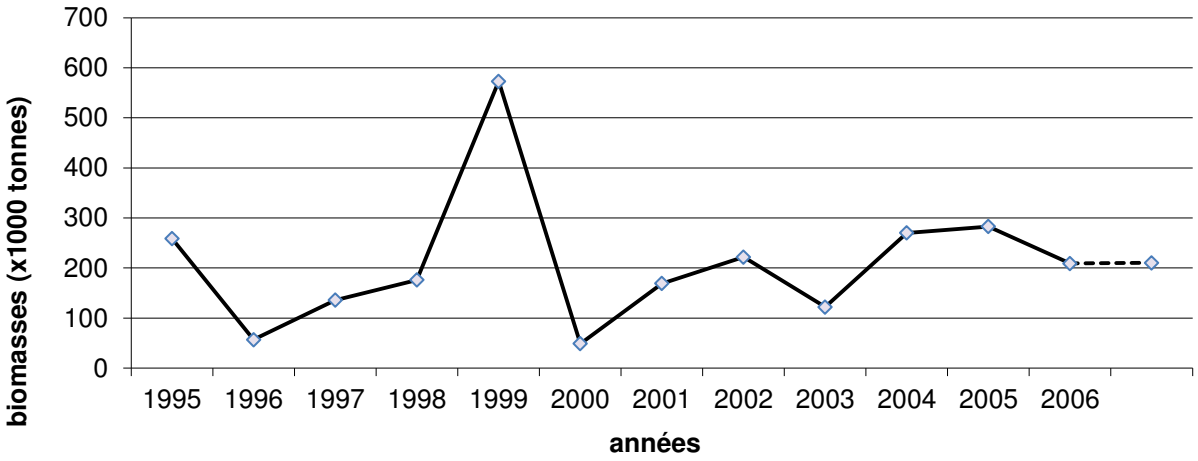



Figure 2-25 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone sénégambienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2015 (Sarré, 2012).

Dans l'ensemble, la taille modale de sardinelles rondes capturées révèle une prédominance d'individus matures. La Figure 2-26 présente l'occurrence des modes trouvés dans la zone et dans les échantillons prélevés; elle reflète une forte occurrence des modes entre 23 et 27 cm. Les sardinelles rondes juvéniles ont rarement été rencontrées durant ces campagnes, les années concernées étaient 1995, 2003 et 2006 où des tailles modales de 6 cm, 10 cm et 9 cm ont été présentes.

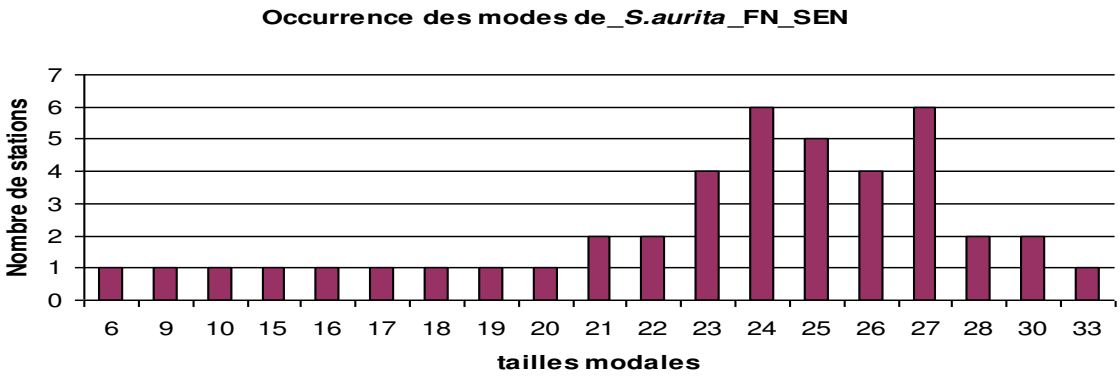



Figure 2-26 : Occurrence des tailles modales de S. aurita en zone sénégambienne de 1995 à 2006 (TL en cm) (Sarré, 2012).

2.4.2.1.1.2.Mauritanie

Pour la sardinelle ronde en Mauritanie, une chute régulière est enregistrée depuis 1995 sur les biomasses totales estimées par le N/O Fridtjof Nansen. D'une valeur de 720 000 tonnes en 1995, la biomasse est tombée à seulement 82 000 tonnes en 2001 et est restée depuis lors dans la fourchette de 100 000 à 200 000 tonnes par année. La Figure 2-27 montre cette évolution depuis 1995.

Il faut signaler tout de même que les campagnes du F. Nansen avant 2000 connaissent quelques disparités liées aux équipements utilisés à l'époque ; en particulier la stabilité au niveau des calibrations ne peut être assurée qu'à partir de 2000. Ceci pourrait expliquer les fortes variations de biomasses enregistrées entre 1995 et 2000.

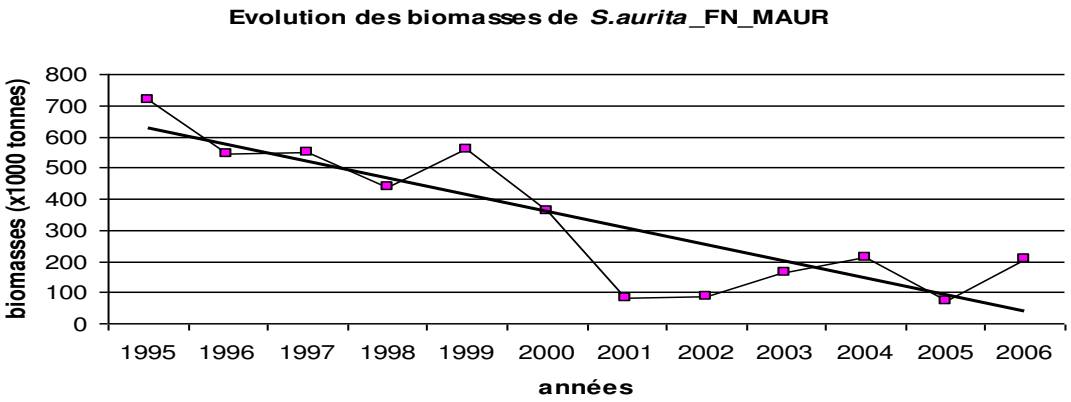



Figure 2-27 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone mauritanienne par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012).

Les structures de tailles trouvées en Mauritanie par le N/O Dr Fridtjof Nansen se distinguent nettement entre la région du sud, de Saint-Louis à Cap Timiris et la région du nord, de Cap-Timiris à Cap Blanc. Alors que la zone sud a enregistré principalement la présence de sardinelles adultes sur toutes les campagnes, seules des juvéniles ont été en général trouvés au nord.

De 1995 à 2000, dans la zone entre Saint-Louis à Cap Timiris et durant toutes les campagnes du N/O Fridtjof Nansen, le mode des sardinelles rondes est resté constant à 34 cm. Durant la même période et au nord entre Cap-Timiris à Cap Blanc, la taille modale maximale enregistrée a été de 13 cm pour les sardinelles rondes. A partir de 2001 des tailles plus petites ont commencé à être enregistrées au sud lors des campagnes avec des tailles s'étalant de 6 à 31 cm.

Quant aux estimations faites par le N/O Itaf Déme pour les biomasses des sardinelles rondes, une hausse importante a été enregistrée entre mars 2004 et mai 2005 avant de se stabiliser autour de 85 000 tonnes à partir de novembre 2005. La Figure 2-28 montre l'évolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008. Il est important de signaler que les saisons des campagnes ont très souvent été différentes par rapport au N/O F. Nansen, les campagnes avant mi-2005 ayant été principalement des campagnes de saison froide.

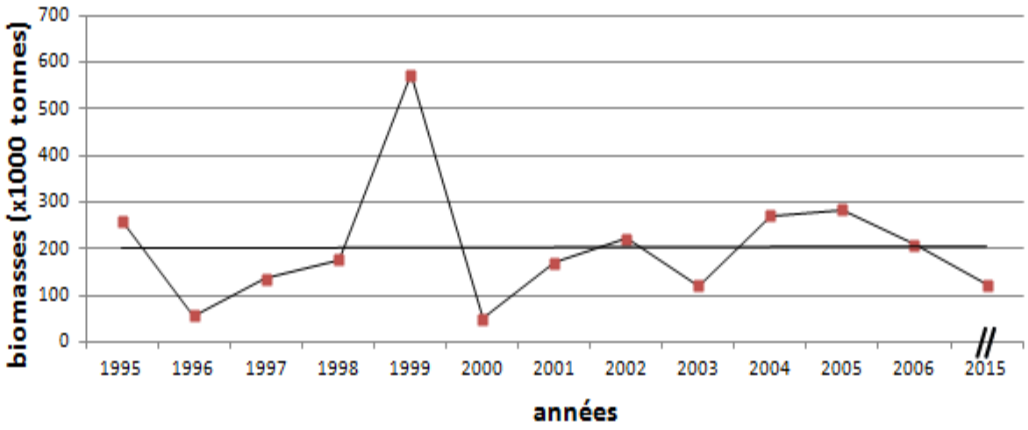



Figure 2-28 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone sénégalaise par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008 (Sarré, 2012).

Pour les estimations de biomasses faites par le N/O Al Awam, il faut signaler les difficultés très souvent rencontrées pour l'échantillonnage pélagique pour les profondeurs inférieures à 20m et les profondeurs supérieures à 70 m.

Les biomasses estimées pour la sardinelle ronde ont été relativement faibles entre 2004 et 2006 connaissent une hausse relative depuis 2008 bien que des fluctuations soient constatées en 2009 et 2010. Le maximum atteint dans la série est de 1 104 000 tonnes en novembre 2009. La Figure 2-29 montre l'évolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010.

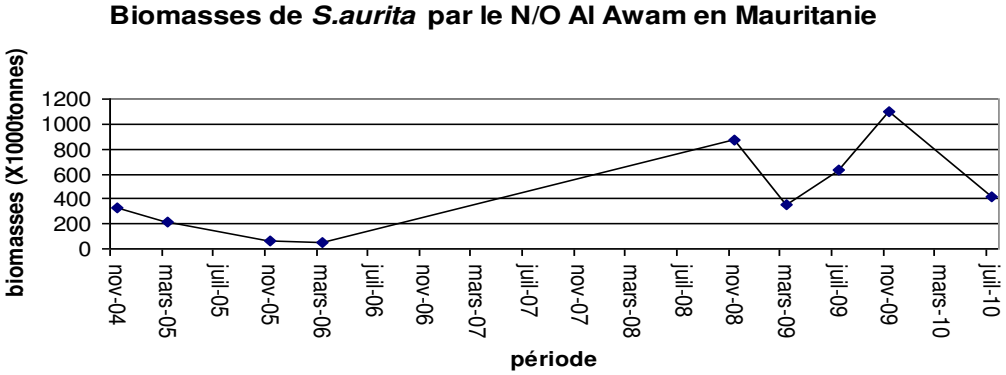



Figure 2-29 : Evolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010. (Sarré, 2012).

Les campagnes du R/V Atlantida en Mauritanie ont enregistré des biomasses relativement faibles par rapport à celles estimées par le R/V Fridtjof Nansen. Le maximum depuis 1995 est atteint en 2007 pour une valeur de 552 000 tonnes pour la sardinelle ronde. La Figure 2-30 montre l'évolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010.

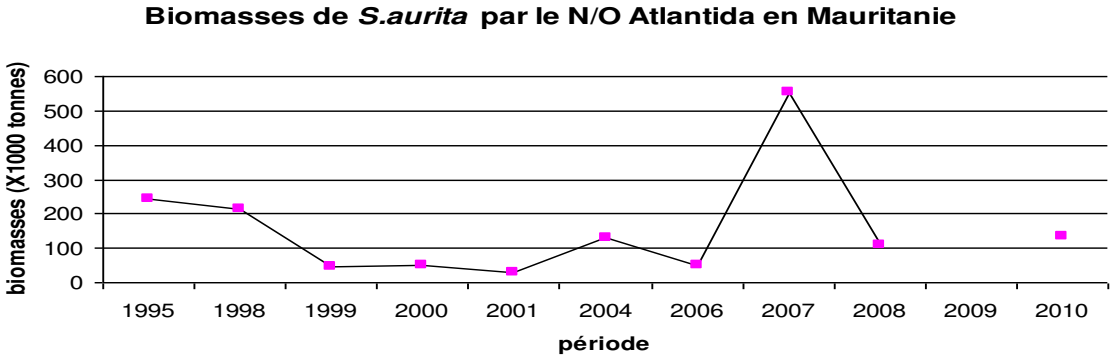



Figure 2-30 : Evolution des biomasses de sardinelles rondes estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010 (Sarré, 2012).

Maroc

Dans la zone comprise entre le Cap Bojador et le Cap Blanc, les biomasses estimées par le N/O Fridtjof Nansen pour la sardinelle ronde connaissent de larges fluctuations entre 1995 et 2004 (Figure 2-31). Les pics enregistrés en 2001 sont suivis de creux importants en 1997 et 2007. Une hausse importante est constatée en 2009.

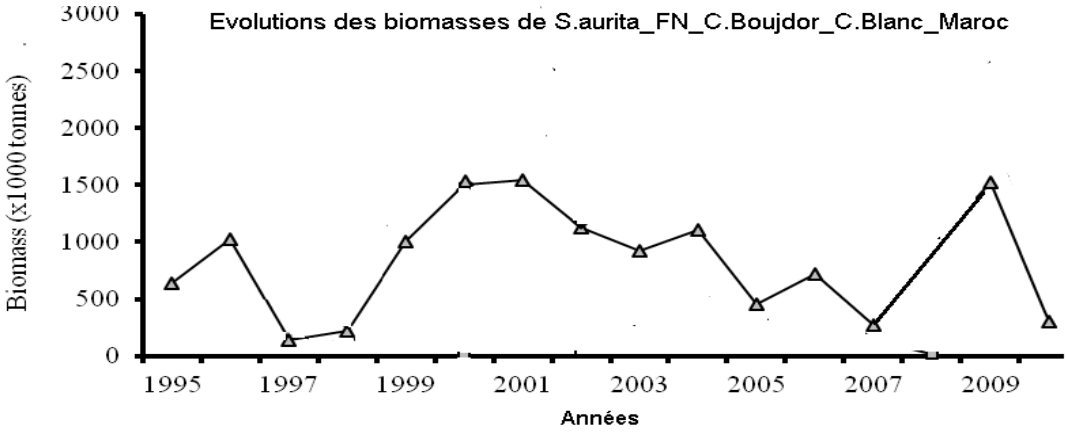



Figure 2-31 : Biomasses estimées de la sardinelle ronde dans la zone marocaine par le N/O Fridtjof de 1995 à 2010 (Sarré, 2012).

Quant aux estimations de biomasse à partir du N/O Al Amir, elles ont été faites pour les deux sardinelles regroupées. La Figure 2-32 montre l'évolution des biomasses de sardinelles estimées par le N/O Al Amir de 2007 à 2010. Une hausse progressive de la biomasse des sardinelles est constatée de juin 2008 à décembre 2009 où la valeur maximale de 2 032 000 tonnes est atteinte, avant de connaître une chute importante en 2010.

Il faut signaler que ces estimations concernent la zone comprise entre le Cap Blanc et le Cap Boujador.

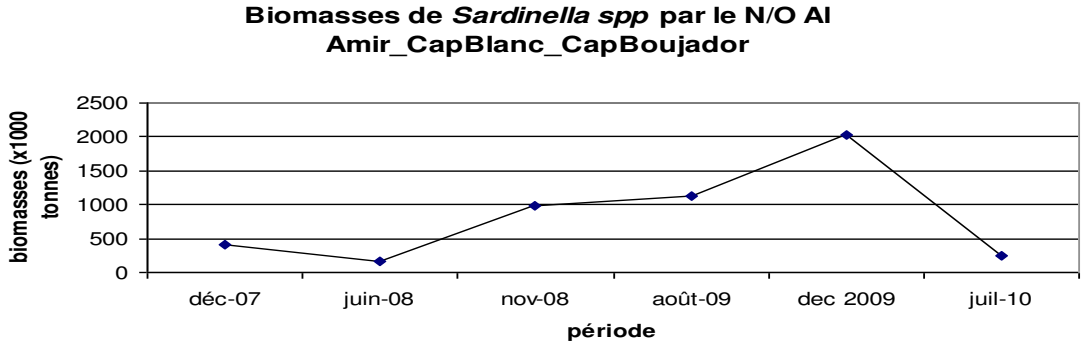



Figure 2-32 : Evolution des biomasses de sardinelles estimées par le N/O Al Amir de 2007 à 2010 (Sarré, 2012).

#### 2.4.2.1.2. Sardinella maderensis

##### *2.4.2.1.2.1. Sénégambie*

Dans la zone sénégambienne, les biomasses estimées de la sardinelle plate par le N/O Fridtjof Nansen ont connu plusieurs fluctuations avec une tendance générale à la hausse de 1995 à 2006. Hormis les années où la biomasse a connu une remontée notable (1995, 1999, 2002), elle a régulièrement augmenté durant la dernière décennie passant de 174 000 tonnes en 1996 à 504 000 tonnes en 2006. La Figure 2-33 montre cette évolution depuis 1995. La biomasse moyenne estimée durant cette période a été de 425 000 tonnes.

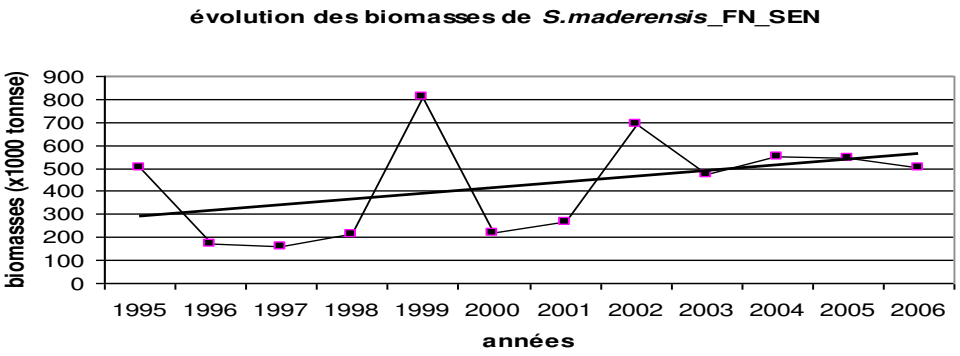



Figure 2-33 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone sénégambienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012).

La taille modale de sardinelles plates capturées durant ces campagnes révèlent en général la prédominance d'individus matures. Le Tableau 2-2 résume les tailles modales de Sardinella maderensis de 1995 à 2006 et pour chaque région du plateau continental sénégambien. La Figure 2-34 présentant l'occurrence des modes trouvés dans la zone et dans les échantillons prélevés, fait ressortir une forte occurrence des modes entre 23 et 26 cm. Les sardinelles rondes juvéniles ont été principalement rencontrées au nord de Dakar avec la présence importante d'individus mesurant entre 8 et 10 cm.

Tableau 2-2 : Tailles modales rencontrées par le N/O F. Nansen au Sénégal de 1995 à 2006 pour Sardinella maderensis.

| Année | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| modes_casa | 26 | 22 | 22 | 24 | 24 | 24 | 23;26 | 23 | 26 | 25 | 23 | 6;24 |
| modes_gambie | 6;24 | 22 | | 27 | 24 | 23 | | 18;20;23 | 23 | 25 | 24 | 23 |
| modes_centre | 24 | 24 | 23 | 25 | 24 | 25 | 8;23 | 24 | 15;25 | 24;27 | 24 | 15;17;25;29 |
| modes_nord | 15;30 | | 25 | 10 | 8;13;28 | | 8 | | 8;26 | 9;26 | 26 | 10;16;18;21;26;28 |

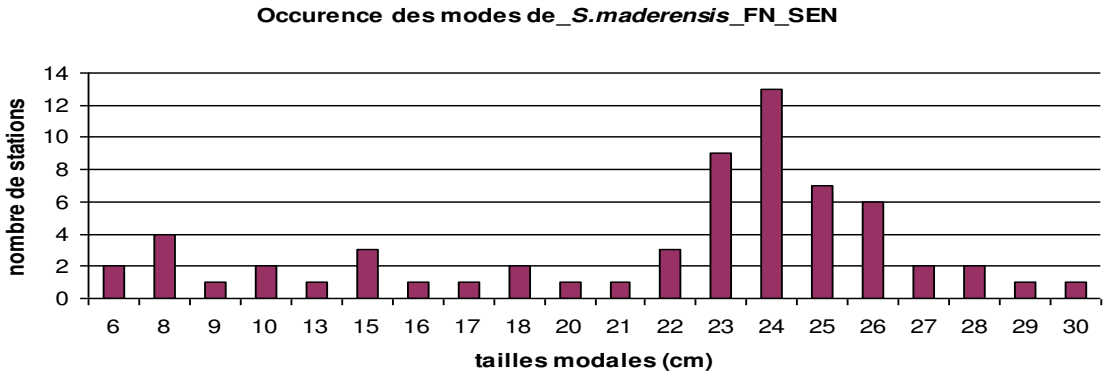



Figure 2-34 : Occurrence des tailles modales de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006 (TL en cm) (Sarré, 2012).

L’évolution des structures de tailles de Sardinella maderensis de 1995 à 2006 est illustrée par la Figure 2-35 et Figure 2-36.

Quant aux biomasses enregistrées par le N/O Itaf Déme pour la sardinelle plate et pour la période de 2003 à 2008, elles ont été assez stables autour d’une moyenne de 350 000 tonnes bien que des fluctuations aient été constatées sur cette période. La Figure 2-37 montre l’évolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008.

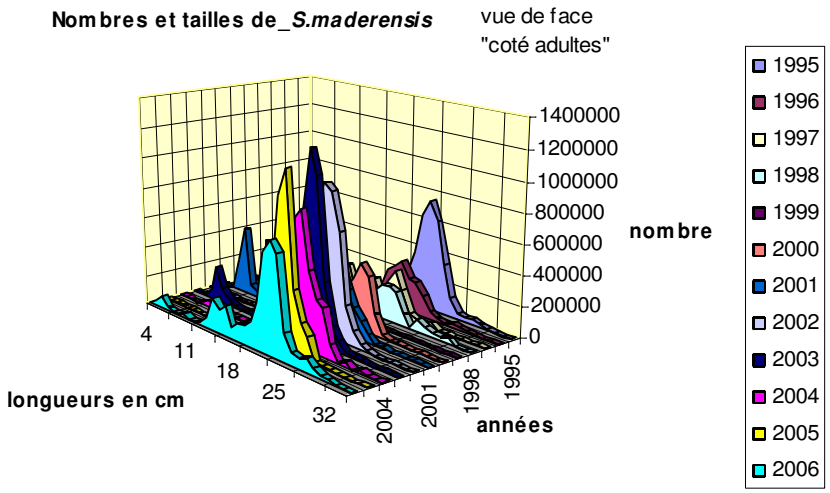



Figure 2-35 : Evolution des structures de tailles de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006, Vue agrandie des adultes en présence. (Sarré, 2012).

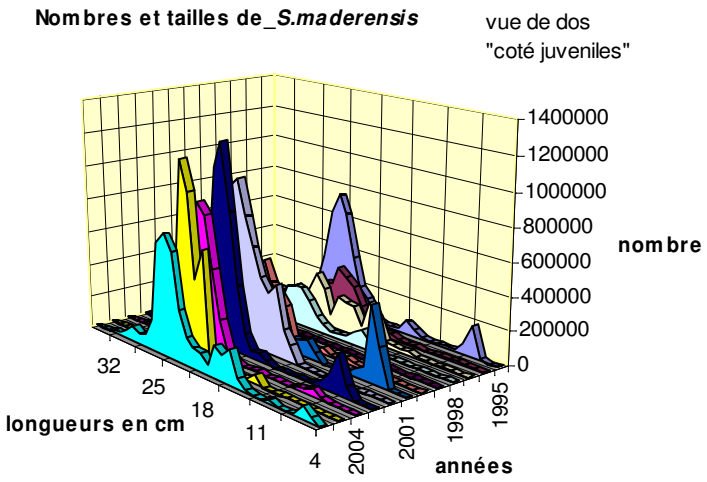



Figure 2-36 : Evolution des structures de tailles de S. maderensis en zone sénégambienne de 1995 à 2006, Vue agrandie des juvéniles en présence (Sarré, 2012).

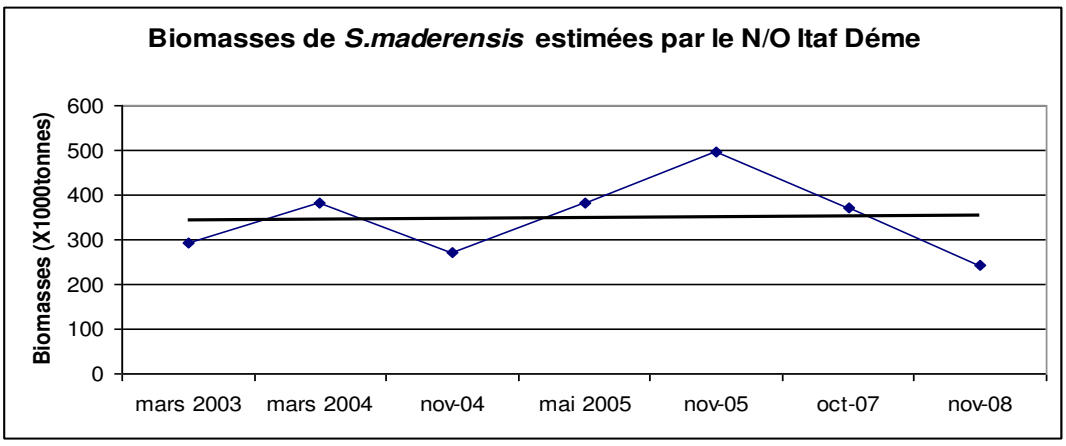



Figure 2-37 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone sénégalaise par le N/O Itaf Déme de 2003 à 2008. (Sarré, 2012).

### *2.4.2.1.2.2. Mauritanie*

Les biomasses estimées des sardinelles plates par le N/O Fridtjof Nansen ont connu une chute progressive depuis 1995 où la biomasse, estimée à 1060 000 tonnes durant cette année, est passée à seulement 145 000 tonnes en 2001. Une tendance à la hausse a été néanmoins observée depuis 2001 avec une pointe remarquable de 1 330 000 tonnes en 2004. La Figure 2-38 montre cette évolution depuis 1995.

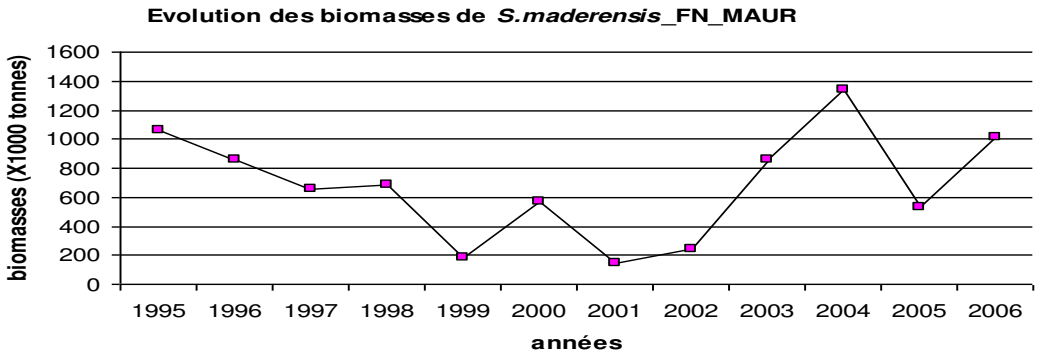



Figure 2-38 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone mauritanienne, par le N/O Fridtjof de 1995 à 2006 (Sarré, 2012).

De 1995 à 2000, dans la zone entre Saint-Louis à Cap Timiris et durant toutes les campagnes du N/O Fridtjof Nansen, le mode des sardinelles plates est resté dans la fourchette de 30-31 cm. Durant la même période et au nord entre Cap-Timiris à Cap Blanc, la taille modale maximale enregistrée a été de 10 cm pour les sardinelles plates. A partir de 2001 des tailles plus petites ont commencé à être enregistrées au sud lors des campagnes. Des difficultés ont très souvent été rencontrées pour l'échantillonnage pélagique pour les profondeurs inférieures à 20 m et les profondeurs supérieures à 70 m.

Concernant les évaluations faites par le N/O Al Awam, les biomasses enregistrées pour la sardinelle plate ont connu une chute progressive de mars 2005 à novembre 2006 avant de remonter depuis cette date pour atteindre la valeur maximale de la série (449 000 tonnes) en juillet 2010. La Figure 2-39 montre l'évolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010.

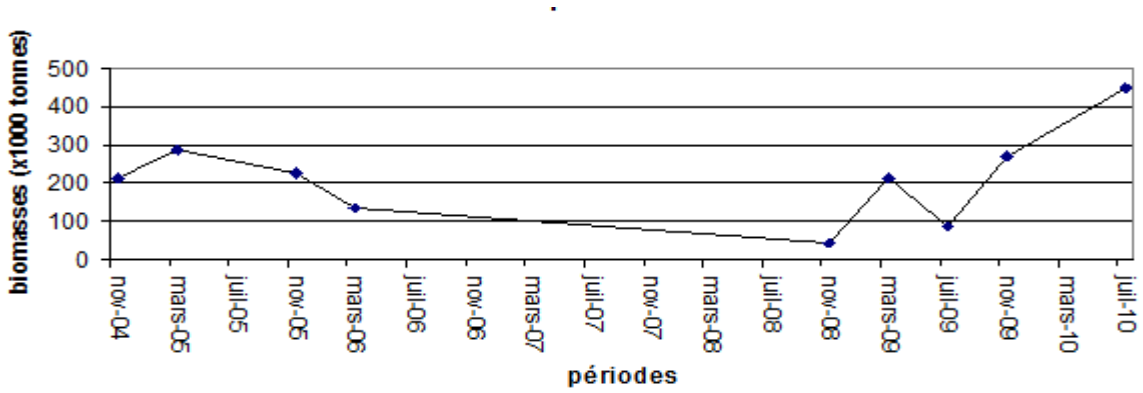



Figure 2-39 : Evolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le N/O Al Awam de 2004 à 2010 (Sarré, 2012).

Des biomasses relativement faibles par rapport à celles estimées par le R/V Fridtjof Nansen ont été enregistrées par le R/V Atlantida en Mauritanie. Le maximum depuis 1995 est atteint en 2007 pour une valeur de 316 000 tonnes pour la sardinelle plate. La Figure 2-40 montre l'évolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010.

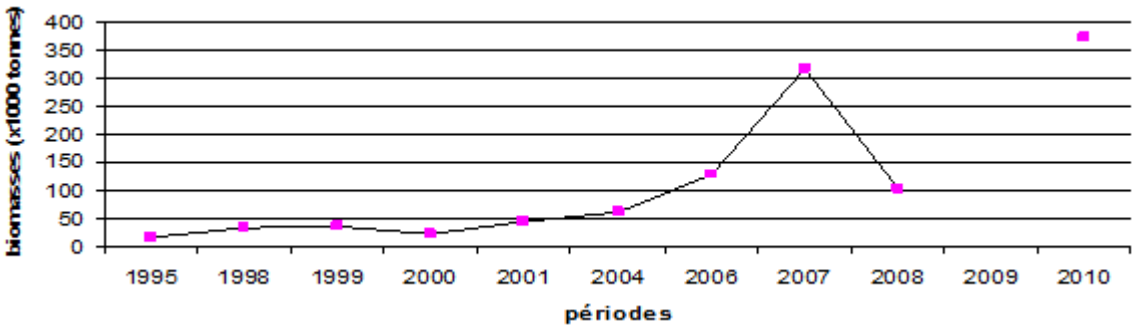
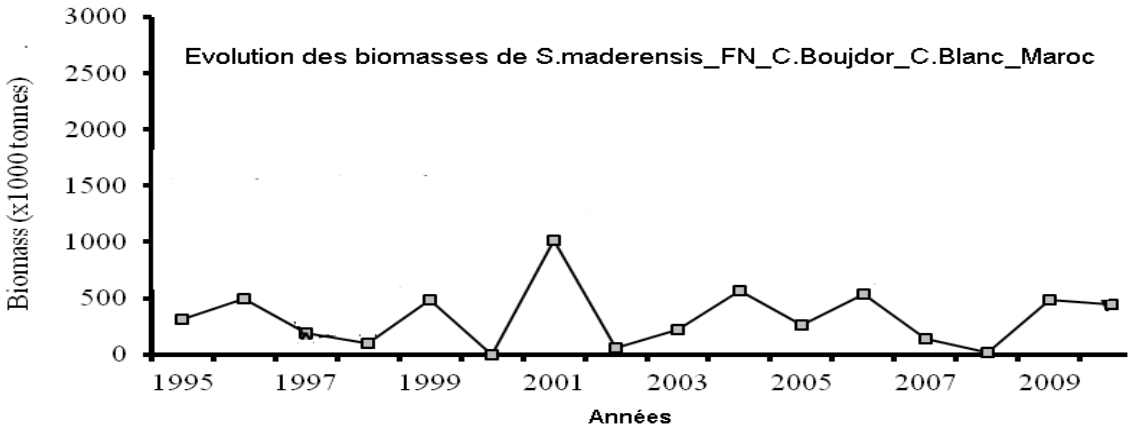



Figure 2-40 : Evolution des biomasses de sardinelles plates estimées par le R/V Atlantida de 1995 à 2010 (Sarré, 2012).

Maroc

Dans la zone comprise entre le Cap Bojador et le Cap Blanc, les biomasses estimées par le N/O Fridtjof Nansen pour la sardinelle plate connaissent de larges fluctuations entre 1995 et 2004 (Figure 2-41). Les pics enregistrés en 1996 et 2001 sont suivis de creux importants en 1997 et 2002. Durant les années 2004, 2005 et 2006, la sardinelle plate a représenté respectivement 67%, 75% et 57% de la biomasse totale estimée des sardinelles dans la zone



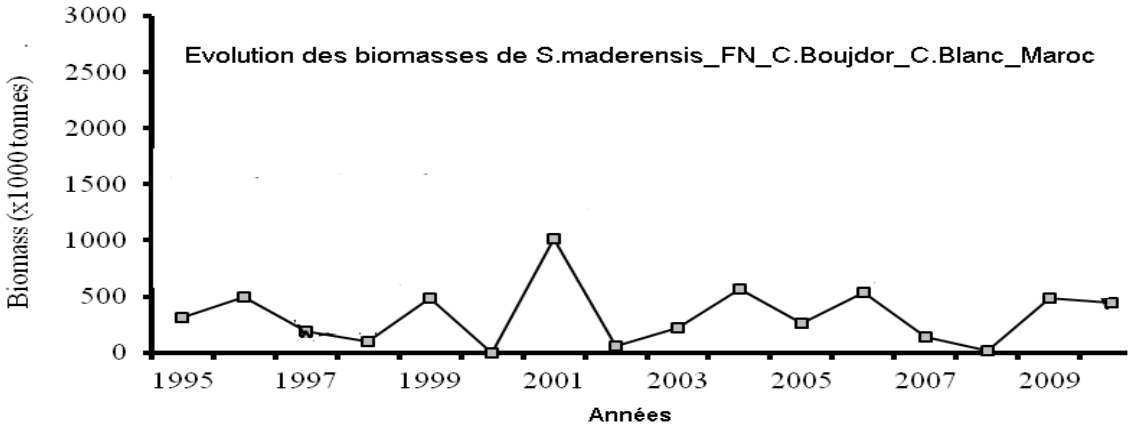




Figure 2-41 : Biomasses estimées de la sardinelle plate dans la zone marocaine par le N/O Fridtjof de 1995 à 2010 (Sarré, 2012).

## 2.5. Améliorations nécessaires sur les évaluations par campagnes acoustiques

### 2.5.1. Comparabilité des résultats de campagnes acoustiques dans la région

Les résultats obtenus par les navires locaux (N/O Itaf Dème, Al Awam, Al Amir) ont montré des différences significatives avec ceux du navire de référence (DFN) sur les estimations de biomasse des espèces, comme on a pu l'observer dans le paragraphe précédent. Ces différences sont liées à trois facteurs :

- La subjectivité liée aux allocations des valeurs $S_A$ lors des interprétations des echogrammes. C'est cette limitation qui a conduit le Planning Group a initié l'étude pour produire la note technique sur l'identification des espèces et présentée en chapitre 1.
- La performance différente des engins de pêche utilisés sur chaque navire ainsi que la disponibilité d'instruments sophistiqués d'aide à la détection et la capture de certaines espèces. En particulier, les sardinelles sont connues pour leur rapidité et leur capacité d'évitement aux chaluts (Brehmer et al, 2006) et seuls des navires bien équipés en termes de dispositifs d'aide à la pêche peuvent les capturer en quantité. La représentativité des échantillons issus des pêches de contrôle est prépondérante pour avoir la structure démographique la plus rapprochée des populations détectées.
- L'identification des surfaces couvertes par les espèces. Ces surfaces sont mesurées de différentes manières, la méthode la plus usuelle dans les campagnes acoustiques étant l'utilisation d'un planimètre ou d'un logiciel de calcul de surfaces irrégulières. Les différences pouvant être constatées dans les résultats sont plus liées à une bonne identification des zones où l'espèce a été trouvée, qu'à l'instrumentation utilisée. Ceci ramène alors cette limitation à celle liée aux performances des engins de pêche, d'où la nécessité de disposer de moyens adéquats d'aide à la pêche pélagique.

### 2.5.2. Incertitudes sur les valeurs de TS (Target Strength) utilisées

La valeur de la constante $b_{20}$ de la relation du « target strength » $TS= 20\log L + b_{20}$ est celle du hareng (Clupea harengus) a défaut de valeurs plus pertinente de réactualisation dans la région. Actuellement la valeur de $b_{20}$ utilisée pour S.pilchardus est de -72.6 db à 38khz et un $b_{20}$ de -71.9 db à 38khz pour S.aurita.

Toutefois des tentatives ont été effectuées dans la recherche de solution à cette situation et les initiatives doivent continuer dans ce sens mais en associant l'ensemble de la région pour que les résultats soient consensuels, sachant encore que nous avons des ressources pélagiques partagées entre les pays de la région.

#### 2.5.2.1. Tentatives de réactualisation du TS en 2007 à Nouadibou

En octobre 2007, suite aux mesures de TS dispensés par les experts norvégiens Egil Ona et Engvald Svellingen tenu à Dakar en 2004, un atelier de mesure d'index de reflexion s'est tenu à Nouadibou avec la participation du Sénégal (Abdoulaye Sarré), la Mauritanie (Jiyid Mohamed Ahmed) et le Maroc (Salahedine Elayoubi). Cet atelier intilutlé « Mesures de l'index de

réflexion 'Target Strength'de la sardinelle ronde » s'inscrivait dans le cadre des recommandations issues du groupe de planification des campagnes acoustiques de la region nord ouest africaine organisé à Dakar en octobre 2006 par la FAO en collaboration avec le Programme Nansen. L'Institut Mauritanien des Recherches Océanographiques et des Pèches (IMROP) s'est chargé de mettre à disposition le navire de recherche Al Awam pour effectuer la campagne.

Une valeur de $b_{20}$ = - 67.4 dB a été trouvée à 38khz pour S. aurita, supérieure à -71.9 dB relatif au harreng. Toutefois la calibration s'est déroulée dans des conditions peu favorables à cause de la force des vents et de l'agitation de la mer avec pour conséquence un étalonnage satisfaisant de l'axe acoustique mais pas dans la totalité du faisceau, ce qui a alors pu influencer les résultats des mesures de TS dont les calculs sont basés sur les angles α et β.

L'autre limitation durant ces essais est le fait que les mesures devaient idéalement s'opérer sur des individus dont les fréquences de tailles présentent une structure unimodale. La population rencontrée durant la campagne en mer était composée d'individus dont la structure des tailles était bimodale avec une gamme des tailles comprise entre 26 et 38 cm. Par ailleurs, un nombre assez faible de données a été utilisé pour le calcul de TS du fait qu'une faible proportion d'individus s'écartait des bancs concentrés de la sardinelle, situation certainement causée par la luminosité importante de la pleine lune.

#### 2.5.2.2. Tentatives de réactualisation du TS en 2015 au Maroc

L'equipe marocaine en compagnie de la cooperation japonaise (JICA) a initié des mesures de TS en 2015 conduites par Salahedine Elayoubi et a fait l'objet d'une publication « Estimation of target strength of Sardina pilchardus and Sardinella aurita by theoretical approach » (El Ayoubi et al, 2016).

Des mesures de TS à partir des caractéristiques morphologiques de S. aurita et S. pilchardus ont été effectuées à 38 et 120khz, en mesurant les ratios entre la longueur ou la largeur de la vessie natatoire (VN) par rapport à la longueur totale (TL) de l'individu. Un méme ratio a été trouvé pour S aurita et S pilchardus entre la longueur de la VN et la largeur, mais le ratio était différent entre la longueur de la VN et la largeur. La valeur B20 trouvée a été de -64.0 db à 38khz et -67.02 db à 120khz pour la sardine avec l'hypothèse d'une distribution normale dans l'angle d'orientation des individus dans l'eau et un un écart type moyen de ± 10°, et de -66.2 db à 38khz et -67.2 db à 120khz pour la sardinelle ronde.

Comparé aux valeurs actuellement utlisées, ces valeurs sont de 6 db à 9db plus élevés à 38khz pour S. pilchrdus et 5 db à 7 db plus elevées pour S.aurita. Ceci impliquerait un risque de surestimation entre 4 et 8 pour la sardine et entre 3 et 4 pour la sardinelle ronde

Dans toutes ces tentatives les valeurs trouvées sont supérieures aux valeurs utilisées actuellement dans la région. Des mesures consensuelles avec la participation des acousticiens de la région seraient certainement importantes à réaliser pour éviter le risque de surestimation des résultats de campagnes dans la région.

### 2.5.3. Représentativité des campagnes acoustiques par rapport aux stocks ciblés

#### 2.5.3.1. Contexte

Depuis toujours, les campagnes de prospection acoustique ont permis au Sénégal, comme dans d'autres pays de la région, d'une part de donner des avis techniques pour l'élaboration des codes de la pêche maritime, d'autre part d'apporter des informations régulières sur la distribution globale de la ressource. L'échointégration au Sénégal a très souvent permis de préciser la distribution, la variation saisonniére de leur abondance et leurs déplacements. Les professionnels de la pêche ont souvent reconnue la pertinence de ces campagnes du fait de l'assistance apportée par le pilotage vers les zones de forte concentration. Par contre l'objectif trés ambitieux, de déterminer un potentiel de capture allouable à la pécherie etrangére sous forme de licences, a toujours été difficile à atteindre à cause d'une part du caractère très variable des biomasses estimées du fait des migrations nord-sud opérées par les espèces, d'autre part d'une maitrise très partielle de la zone de couverture totale des stocks concernés. Si certains stocks sont bien couverts par les campagnes acoustiques, d'autres par contre le sont beaucoup moins et leurs évaluation à des fins d'aide à la décision lors des négociations d'accords de pêche ou d'assistance aux professionnels de la pêche, ne peuvent étre pertinentes avec des campagnes classiques d'échointégration.

#### 2.5.3.2. Spatial distribution of main clupeid species in relation to acoustic assessment surveys in the continental shelves of Senegal and The Gambia

Abdoulaye Sarré[1,*], Jens-Otto Krakstad[2], Patrice Brehmer[3,1], and Ebou Mass Mbye[4]

[1] Centre de Recherche Océanographique de Dakar –Thiaroye (CRODT), BP 2241, Dakar, Sénégal

[2] Institute of Marine Research (IMR), P.O. Box 1870 Nordnes, NO-5817 Bergen, Norway

3 Institut de Recherche pour le Developpement (IRD), UMR 195 (CNRS, UBO, IRD, Ifremer) Lemar, Route des pères Mariste, BP1389, Dakar, Sénégal

[4] Ministry of Fisheries, Water Resources and National Assembly Matters, Gambia, Fisheries Department (FD), Banjul, The Gambia

*Corresponding author: Abdoulaye Sarré, Tel (221) 77 632 05 32 email: ablaysarrey@yahoo.fr

**Abstract**

This work compiles hydroacoustic recordings and catch data over Senegambia (Senegal and The Gambia) from assessment surveys on the major clupeid species to identify sources of bias in abundance estimates caused by their horizontal distribution. The latitudinal distribution of small pelagic fish is often well known, while their "across shelf" distribution on the continental shelf is less understood. The southern part of the Senegambian shelf has a wide shallow water (< 10 m) area that makes up 20 % (1500 NM²) of the total shelf surface, while the northern part accounts for 3% (200 NM²). These areas are not assessed by conventional fisheries acoustics surveys and therefore increase the uncertainty of the assessment of these species. Our findings show that this likely introduces a bias in the assessment of Sardinella maderensis, while for S. aurita no major estimation-error is caused by their horizontal distribution. The data confirm that Ethmalosa fimbriata and Ilisha africana are challenging to assess by conventional surveys, due to their mostly inshore distribution. We emphasise the usefulness of assessing S. aurita through fisheries independent hydroacoustic surveys, and propose alternative methods to survey shallow water areas to reduce biases in biomass estimates and distribution mapping.

**Keywords**: Fish distribution, Ethmalosa fimbriata, Ilisha africana, Sardinella spp., West Africa.

## 1 Introduction

The marine waters off Northwest Africa are very productive because of active upwelling that takes place and supports important fish resources (Roy et al, 1992; Auger et al, 2016). Fisheries contribute on average more than 3 percent of the gross domestic product (GDP) of Senegal, The Gambia, Mauritania and Morocco and play an important role in food security, employment and income (Ba et al. 2017). In Senegal, a few species of small pelagics make up the bulk of landings; these include sardinella (Sardinella aurita and S. maderensis), horse mackerel (Trachurus trecae and Caranx rhonchus), bonga shad (Ethmalosa fimbriata), chub mackerel (Scomber colias) and West African Ilisha (Ilisha africana). Of these, sardinella are the most important as the key food species for the Senegambian population (Senegal and The Gambia) (Thiaw et al, 2017), also bonga is an important food resource in much of West and Central Africa (Jallow, 1994), as is Ilisha africana, which is usually smoked for local consumption (Fame et al, 2017). Acoustic surveys are the basic tool for biomass assessment of sardinella species, horse mackerels and chub mackerel (Simmonds and MacLennan, 2005), and provide indices of abundance used in the models to determine the state of their exploitation. They are performed by national (RV "Itaf Deme" (ID) in Senegal) or international research vessels (mainly the Norwegian RV "Dr Fridtjof Nansen" (DFN)), at sub-regional level. The continental shelf surveyed during these acoustic surveys can be divided in two separate regions north and south of Dakar respectively, based on their bathymetric characteristics. The northern shelf is narrow with the 25 m and 500 m isobaths located on average 5 NM and 20 NM distance from the coast, while in the southern shelf is wide with a large shallow water coastal region where the 25 m and 500 m isobath lie on average 20 NM and 55 NM from the coast. The main shortcomings of these surveys are their lack of continuity since 2006, and the representativeness of the stocks covered. The main aim of assessing the abundance of small pelagic fish in North West Africa was to cover the stocks of mature fish, assuming the major distribution area of our target species were covered by the surveys. In Senegambian waters, where both sardinella species occur, the shallow shelf covers a wide area between the coastline and the 10 m isobath. It is known that the distribution of some target species of these acoustic assessment surveys continue inshore of the investigated area. This applies especially to the inner shelf and the riverine systems between the Cap-Vert peninsula (Dakar) to Casamance (south Senegal). Several studies have been carried out in these systems, mainly utilising a boat with small draft, the "Diassanga" (DS), to assess the species composition and distribution of small pelagic fish

(Albaret et al, 2004; Ecoutin et al, 2013; Sadio, 2015). These shallow areas are important spawning and nursery grounds for all the clupeid species (Diouf, 1996; Ndoye et al, 2014; Tiedemann and Brehmer, 2017) and are regarded as being of high biological importance (Sloterdijk et al, 2017). The Saloum and The Gambia River estuaries are the principal spawning areas (Panfili et al, 2004; Vidy et al, 2004). There are two main types of estuarine / riverine system in the area; the Casamance and Saloum estuaries which are "inverse estuaries" (Albaret, 1987; Guillard and Lebourges Dhaussy, 1998; Simier et al, 2004) with highest salinity up-river e.g. furthest inland, away from the ocean. The Gambia estuary, on the other hand is a classic river system (Albaret et al, 2004; Guillard et al, 2004; Simier et al, 2006), with lower salinity up-river and strong seasonality in salinity due to variations in river flow and rain. High salinities in The Gambia River are normally only recorded towards the end of the wet season and close to the sea, with a displacement upstream in the dry season (Albaret et al, 2004; Guillard et al, 2004). The distributions of clupeids are markedly different in these estuaries with highest concentrations of fish at the mouth of the normal estuary and few or no clupeids further upstream, while in the inverse estuaries (Albaret et al, 2004; Guillard et al, 2004), clupeids and in particular S. maderensis may be found far into the river systems at salinities up to 50 (Simier et al, 2004). Sardinella maderensis is known to have high physiological adaptability to different environments (Ba et al, 2016) while S. aurita is more sensitive to environmental conditions and is found on the continental shelf in clear and salty waters often reported in waters with salinity > 35 and temperatures typically below 24°C (Camarena Luhrs, 1986; Fréon, 1988). Although, during the surveys in Senegal salinities have typically been less than this (~32) in surface waters with surface temperatures higher than this (~28°C) with strong vertical gradients in both parameters. Ilisha africana is mainly encountered in estuarine areas from Senegal to Angola (Whitehead, 1985) in the depth range 0 - 25 m, with a preferred temperature of 27 °C (Sanches, 1991; Cheung et al, 2013) while Ethmalosa fimbriata, occurs in inshore waters, lagoons and more than 300 km up-stream in rivers e.g. The Gambia River and has been reported to breed throughout the year in waters of highly different salinities (3.5 – 38), preferring temperatures around 27 °C (Whitehead, 1985). Warm, low-salinity surface waters, attributed to discharge from the rivers in the area, are generally characteristics of the Casamance and the Gambia coastal areas where occasionally the Ethmalosa fimbriata are caught in trawls during regular surveys, then often together with Ilisha africana and/or Sardinella maderensis (Krakstad et al, 2005).

No study has been made so far to estimate whether a significant part of the Senegambia pelagic biomass might have been missed by surveys as has been shown for other shallow and inshore areas (Brehmer et al, 2006). This study investigated the inshore distribution of four common clupeid species in Senegambia, Ethmalosa fimbriata, Ilisha africana, Sardinella maderensis and Sardinella aurita using acoustic NASC (nautical area scattering coefficient) data and catch data from two research vessels and literature data from estuarine surveys. The aim of this study was to investigate whether the regular surveys cover the distribution area of these species adequately or if insufficient survey coverage of the shallow shelf areas and estuarine/riverine systems might introduce bias to the clupeid biomass assessment.

## 2. Materials and methods

Several acoustic surveys have been performed in Senegambia since 1995 within the framework of national or international projects. The general objectives of these surveys were to estimate biomass and map the distribution of the small pelagic fish resources. They took place during the cold season (February to April) or at the end of warm season (October) in the case of the ID, and mainly in October for the DFN (Table 1). This study also refers to, and show data from surveys performed in the rivers and estuaries to estimate the abundance of the fish species in these areas, using the shallow boat "Diassanga" (Albaret et al, 2004; Ecoutin et al, 2013; Sadio, 2015). The ID has a smaller draught than the DFN, with an inshore operating depth limit of 10 metres compared to 15 - 20 m for the DFN, while the DS is a small wooden catamaran canoe specially designed for shallow water operations.

**Table 1**. Overview of the surveys used, vessels involved (DFN: R/V Dr Fridtjof Nansen, ID: RV Itaf Deme, DS: Diassanga shallow water boat (Albaret et al, 2004; Ecoutin et al, 2013; Sadio, 2015)), surveying periods and data available. NASC: Nautical area scattering coefficient ($m^2$ $NM^{-2}$), for sardinella group (SARD = Sardinella aurita and Sardinella maderensis), horse mackerels group (HORS = Trachurus trecae and Caranx rhonchus), other clupeids group (i.e. 'P1': including Ethmalosa fimbriata and Ilisha africana) other pelagic fish group (i.e. 'P2': other than clupeids and HORS).

| Vessels | Period | Country/ Area | Data available | Interest |
|---|---|---|---|---|
| DFN | Nov 2005 to Nov 2006 | Senegal and The Gambia | Pooled NASC data [20-500 m] of SARD, HORS, P1 and P2 | NASC distribution of both sardinella pooled<br>Clupeid species occurrence in trawls, position and depth |
| | Nov 1981 to Nov 2004 | Senegal and The Gambia | Pooled NASC data [20-500 m] of SARD, HORS, P1 and P2 | Clupeid species occurrence in trawls, position and depth |
| ID | Nov 2004<br>Nov 2005<br>Nov 2007 | Senegal and The Gambia | ID as DFN but with separated NASC [10-500 m] for S. aurita and S. maderensis | NASC distribution of S. aurita and S. maderensis |
| | Mar 2003<br>Mar 2004<br>May 2005<br>Nov 2006 | Only Senegal | Idem as DFN with separated NASC for S. aurita and S. maderensis | Clupeid species occurrence per bottom depth from trawls |
| DS | 2008<br>2009<br>2010<br>2011 | Delta Saloum | Relative biomass per species (64 species among which E. fimbriata, S. maderensis, S. aurita and I. africana) | Clupeid species occurrence, position and depth |

During all the above surveys (ID and DFN), a common strategy that employed the same sampling protocol was adopted, with systematic parallel course tracks spaced 10 NM (nautical miles) apart, perpendicular to the depth isobaths (Fig. 1). To cover as much as possible of the maximum distribution area of pelagic fish, the shelf was surveyed from Cap Roxo in the south to Saint-Louis in the north, and from the 10 m (ID) or 15 - 20 m (DFN) to 500 m isobaths. Trawling was done irregularly, either to identify echo registrations or to check 'blindly' whether fish were mixed with the plankton in the upper layers of the water column. A pelagic trawl with floats was used to capture fish close to the surface. A bottom trawl with floats or a smaller pelagic trawl was used to sample pelagic fish in shallow waters (less than 30 m). The ID and DFN carry different fishing gear, including differently sized pelagic and demersal trawls. The DS used a 200 m-long purse seine.

Two complementary analyses were performed, first using acoustic data to determine the spatial distribution of the two sardinella species, which is the main target species in the pelagic assessment surveys in Senegambia. This analysis was complemented by using catch data in relation to seabed depth to describe the presence and distribution of the four species targeted in our study.

The ID has few fishing operations (n = 187; 2003-2008) compared to the DFN (n = 1320; 1981-2006), which moreover has provided most regular and standardized data; thus, only fishing operations carried out by the DFN were utilised in this study. The DFN data were analysed by counting the number of trawls containing clupeids from 15 surveys over 25 years, Occurrence and catch rate (kg $h^{-1}$) from trawl catches were used to analyse the distribution of the clupeid species in relation to bottom depth and to provide an index of catch rates (in kg per hour) per bottom depth interval. Ten meters intervals were used over the whole Senegalese continental shelf i.e. the North part (Grande Côte), the Petite Côte (including Saloum delta), The Gambia and the south (Casamance). It has been assumed that these catches, although they were not taken

at random but rather targeted, provide reliable information about the presence of these species, and less robustly, their distribution and abundance in relation to seafloor depth.

During acoustic surveys, NASC (Nautical Area Scattering Coefficient) values, representing reflected sound energy from fish and plankton in the water column, were recorded using an Simrad EK500. The echosounder was connected to a drop keel mounted (DFN) or hull mounted (ID) Simrad ES38B transducer (38 kHz) used for standard biomass estimation on-board ID and DFN. See e.g. Krakstad et al, 2005. The echosounders were sphere calibrated according to standard procedures at least once a year. See Krakstad et al (2004, 2005) for details of echosounder settings and calibration results. Recorded NASC values were scrutinized using the BEI system (DFN) or BI500 (ID). During this process NASC recordings were allocated to individual specified target groups based on a combination of visual scrutiny of the behaviour pattern as deduced from echograms and the compositions of the catches. Target groups used onboard DFN was Sardinella; S. aurita and S. maderensis, Horse mackerel; Trachurus trecae and T. Trachurus, PEL1 (Pelagic fish type 1) Ilisha africana and other clupeoid fish species, PEL2 (Pelagic fish type 2); other carangids than horse mackerel, Scombrids, Shyraenids and Trichiurids. These target groups have been chosen based on their acoustic characteristics and are standard groups used during DFN surveys. The resulting datasets were stored by 5 NM. ID used similar grouping but separated the two sardinella NASC in the same ratio as their contribution to the mean back-scattering strength in the length frequency samples during scrutinizing. The discriminated (ID) sardinella acoustic data were analysed for the surveys including The Gambia (2004, 2005 and 2007), and distinct bathymetric fish-density distributions were calculated according to their NASC values, averaged over 1 NM intervals, excluding values recorded between transects (latitudinal inter-transects), plotted against seafloor depths and mapped. From the DFN NASC data analyses, the distribution of pooled Sardinella sp. in relation to seabed depth were analysed for the last two surveys (2005 and 2006) of the time series which were re analysed by deleting all inter-transects parallel to the coastline. All the acoustic data used (ID and DFN) are from surveys of the same season (November).

From the literature, we added data obtained by the Diassanga (DS), which partially covered the Saloum delta (Guillard and Lebourges Dhaussy, 1998; Sow and Guillard, 2010; Sadio, 2015). During these DS research cruises, fish samples were taken with a 200 m purse seine (12 surveys: n = 132 purse seine operations, split into 60 operations in Bamboung and 72 operations in Sangako). We used these earlier efforts to list the main Saloum species. The NASC fish distribution, analysed through BI500 (Knudsen, 1990) and LSSS (Korneliussen et al, 2006) software, are mapped using Surfer® 8 (Golden Software, LLC) and the surface covered by the acoustic sampling scheme are estimated using Survey Mapper software (version 0.97) (Marek Ostrowski, 2004) starting from the coastline to 10 meters bottom depth for the shallow area and to 500 m depth for the whole continental shelf.

## 3. Results

### 3.1. Distribution of Clupeids in relation to seafloor depth

Approximately 5300 $NM^2$ was surveyed annually between Cap Roxo (Casamance) and the Cap-Vert peninsula (Dakar) by both vessels, plus 1140 $NM^2$ between the Cap-Vert peninsula and Saint-Louis (Grande Côte) by the DFN. Between the coastline and offshore waters deeper than 10 m, we estimated an area of approximately 1500 $NM^2$ along the Petite Côte, where no previous abundance survey had been performed (for the ID) and 200 $NM^2$ for the Grande Côte, representing 20% and 3% of the total surface area respectively (Fig. 1a). A total of 1320 trawl hauls were carried out by DFN in the study area, of these 496 stations contained the four clupeid species targeted in this study.

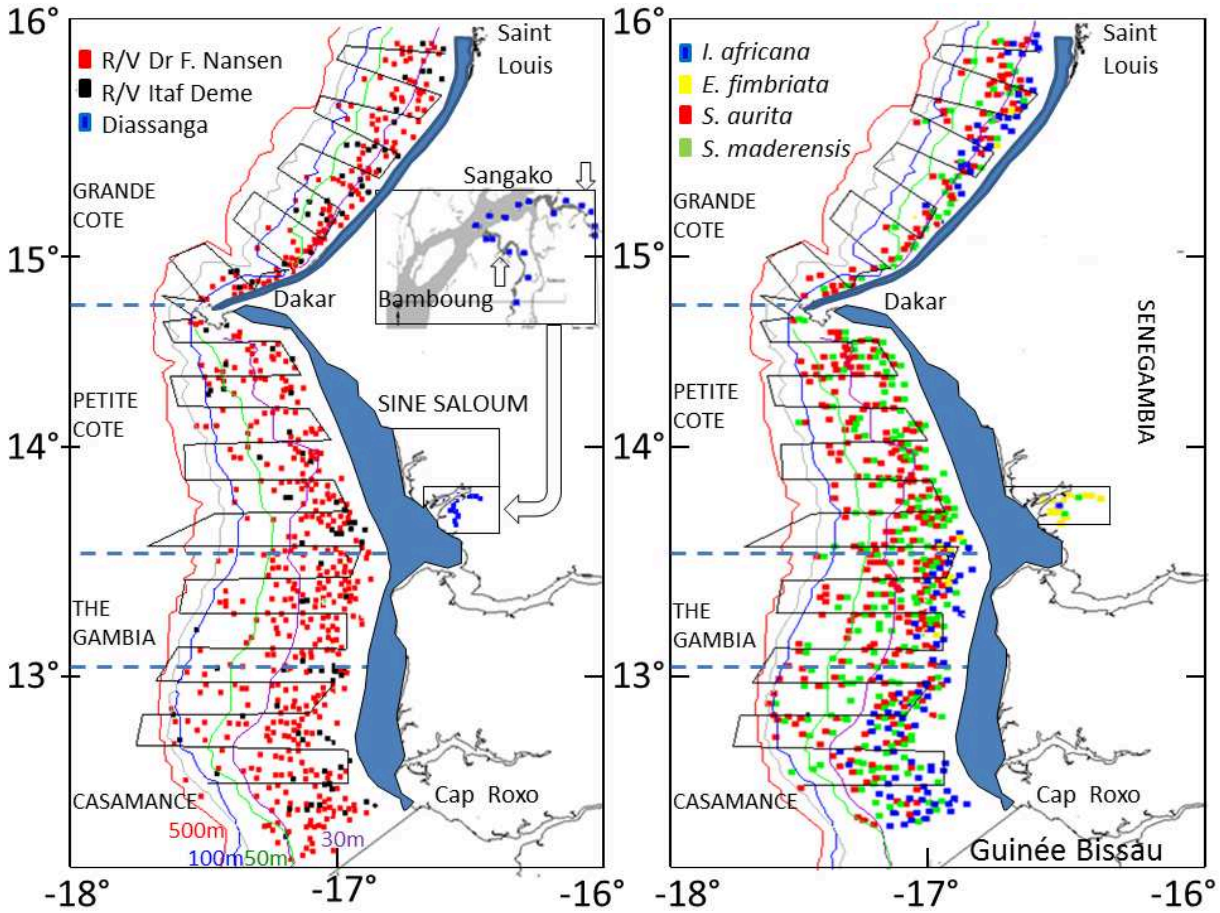



Fig. 1: **a**) Map of the study area (Senegambia) and plot of the fishing operations from three vessels: RV Dr Fridtjof Nansen (DFN), RV Itaf Deme (ID) and Diassanga. The zoom shows the localisation of Bamboung and Sangako in Saloum delta (adapted from Sadio et Ecoutin, (2013) where the Diassanga led its inshore fishing operations. Acoustic sampling design in parallel transects (DFN and ID) is overlaid in grey line. The isobath lines are shown in red (500 m), blue (100 m), green (500 m) and purple (30 m). **b**) Map of the geographical distribution of Ethmalosa fimbriata, Sardinella aurita, Sardinella maderensis, and Ilisha africana sampled from scientific trawl survey (1981-2006). The total surveyed area [10-500m] is 5600 NM² vs. 1700 NM² [0-10m] not surveyed (shallow part along the coast, in blue).

The DS catch data covering the Saloum delta confirm that S. maderensis, E. fimbriata and I. africana were distributed all the way into the delta far inshore of the area surveyed by the DFN or ID (Fig. 1b). A total of 60 fish species were registered in the Saloum delta where S. aurita is virtually absent from the DS catches, although a few individuals were recorded in Sangako (Table 2). Sardinella maderensis was the second most frequent species in the Saloum (12% of the total) after E. fimbriata (79%).

**Table 2.** Relative abundance of Sardinella aurita, S. maderensis, Ethmalosa fimbriata, Ilisha africana and other species (n = 56) in Saloum delta (Bamboung and Sangako) from 2008 to 2011 (12 surveys; 132 fishing operations) with their abundance (%Ab.) and biomass (%Bio.) in percentage (source: Sadio et Ecoutin, 2013).

| Saloum delta | Bamboung | | Sangako | |
|---|---|---|---|---|
| Species | %Ab. | %Bio. | %A | %Bio. |
| Ethmalosa fimbriata | 79,97 | 37,44 | 33,44 | 22,44 |
| Sardinella aurita | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Sardinella maderensis | 12,27 | 5,00 | 32,77 | 14,88 |
| Ilisha africana | 1,12 | 1,92 | 0,00 | 0,00 |
| Other species (n = 56) | 6,64 | 55,64 | 33,7 | 62,68 |

The maps of sardinella distribution separated (ID) based on recorded NASC values show the spatial distribution of this species (Fig. 2). The maps indicate that the main concentration of S. aurita is found on the central part of the shelf off the Gambia and Saloum River, with only few

registrations in the southern part of the Casamance shelf and with densities declining towards the inshore part of the survey area. The main distribution of S. maderensis is further inshore and southwards than that of S. aurita with main concentrations on the Casamance shelf and the Gambia. The distribution map also indicates that relatively high concentrations were extending southwards into Guinea Bissau.

From the DFN acoustic data, the average NASC recorded increased towards shallower waters and some annual variability in the distribution of sardinella was noted (Fig. 3a, DFN). Sardinella were distributed with higher NASC values further inshore in 2005. That year in particular there were no signs of biomass decreasing towards the inshore limit of the survey area i.e. less than 20 m bottom depth for the DFN.

The data from the ID covering shallower depths [10-19 m] and discriminating the two Sardinella species, showed that their NASC distributions were different (Fig. 3a, ID). The abundance of S. aurita generally dropped towards 0 at around 10 m bottom depth and was at its greatest at a seafloor depth range of 35-49 m. However, the ID data also suggest that the abundance of S. maderensis continued to increase towards the 10 m isobath. Higher NASC offshore (Fig. 3a, DFN), at bottom depths of 50 – 120 m, are mainly due to S. aurita, verified with catch data (Figure 4). No sardinella were recorded in either data-set (DFN and ID) beyond the 120 m isobath.

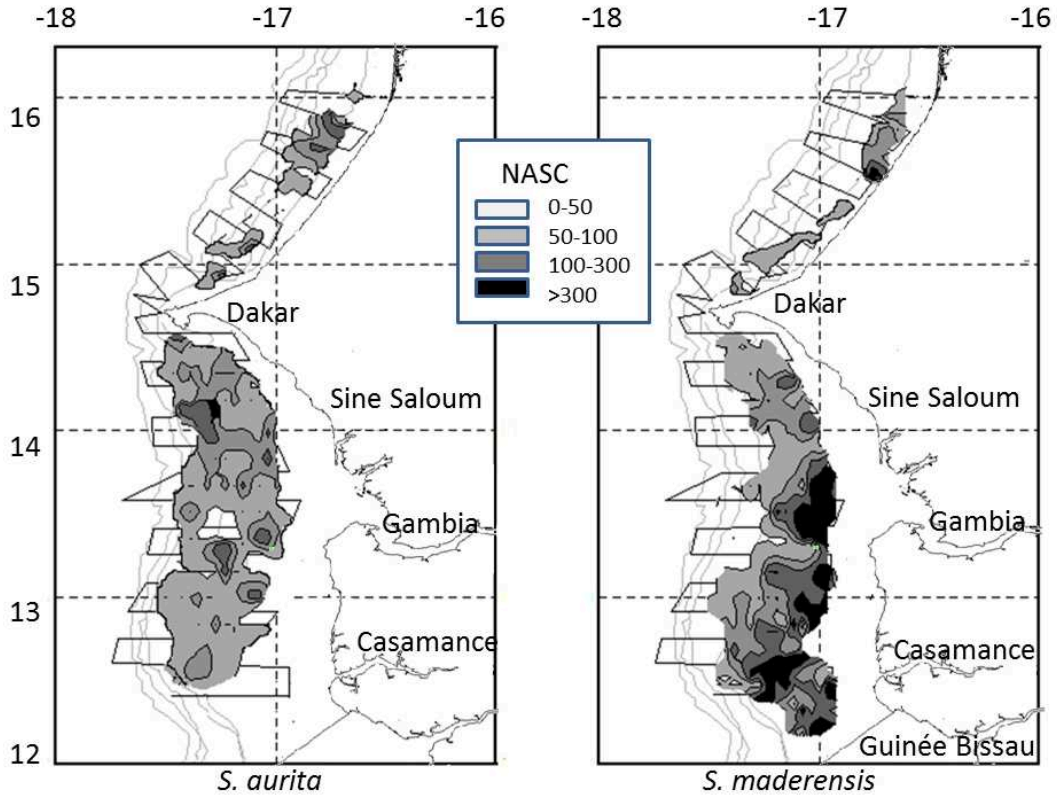



**Fig. 2**. Distribution maps of Sardinella aurita and S. maderensis (in NASC: Nautical area scattering coefficient (m² NM²)) from the three acoustic surveys of RV Itaf Deme covering the whole continental shelf of Senegal and the Gambia (Senegambia; 2005-2006-2007).

The map of occurrence, which also shows the positions of trawl catches of the four clupeid species by the DFN (1981 to 2006) (Fig. 1b) together with the histogram of distribution of catch rates relative to seafloor depth for the four species (Fig. 3b), shows their spatial distribution. These maps show the offshore distribution boundaries of I. africana (approx. 60 m bottom depth) and E. fimbriata (approx. 20 m). Ethmalosa fimbriata was only found off The Gambia (Fig. 1b), while I. africana was also distributed further south and is abundant in the Casamance area. Neither E. fimbriata nor I. africana were identified by the DFN surveys between the Saloum River and Cap Vert peninsula.

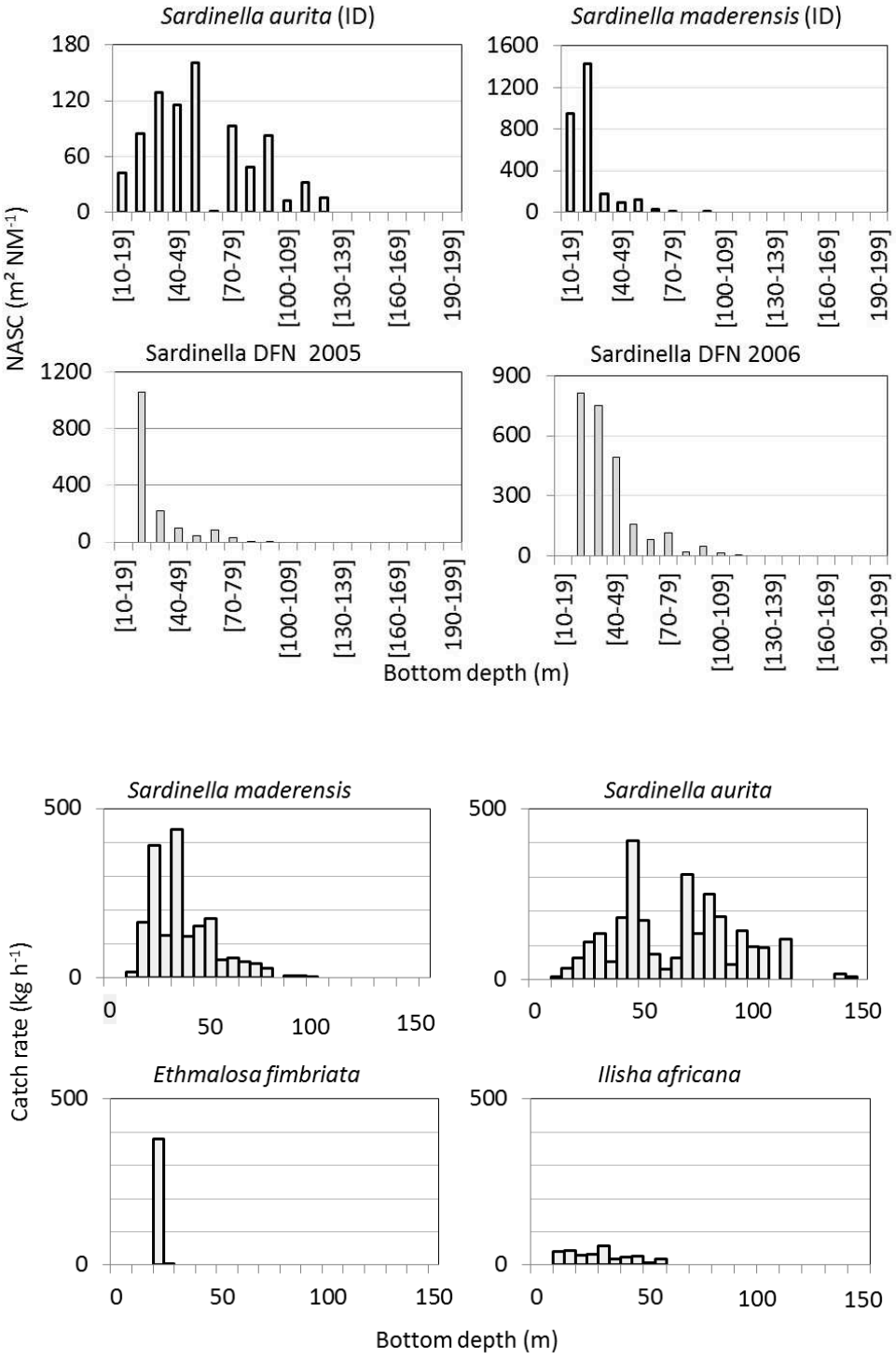



**Fig. 3.** Histograms of the a) bottom depth distribution of the NASC of Sardinella aurita and S. maderensis from the RV Itaf Deme 'ID' (acoustic small pelagic assessment survey covering the Senegambia led in 2004, 2005, and 2007) and pooled NASC of both sardinella from the RV Dr Fridtjof Nansen 'DFN'(acoustic small pelagic assessment survey led in 2005 and 2006 with sample (10-19 m) missing); b) bottom depth distribution of relative catch rates of S. aurita, S. maderensis, Ethmalosa fimbriata and Ilisha africana, from the DFN trawl operation time series (1981-2006; n = 1320).

The average catch rates of both sardinella species fell in shallow waters. Sardinella aurita declined rapidly from a modal peak at 45 m while S. maderensis displayed a slower decline from a less pronounced modal peak around 30 m (Fig. 3b). Catch rates also fell to 0 in the offshore direction, with S. maderensis encountered in areas with bottom depths of less than 80 m on the shelf, while scattered catches were also made off the shelf. Sardinella aurita has a more pronounced offshore distribution, with catches averaging 100 kg $h^{-1}$ to 100 m bottom depth (Fig. 3b) and scattered catches in areas beyond this isobath. On the Casamance shelf, Ilisha africana is well distributed (Fig. 1b). The map also shows that the distribution of I. africana extended

southwards into Guinea Bissau and that the species is also found off the Saloum delta. Ethmalosa fimbriata was only found within 20 m isobath in the DFN catches i.e. in the shallowest catches of the DFN.

From the relative proportions of S. aurita and S. maderensis in the DFN catches, the proportion of S. aurita, by weight approached 0 per cent at around 15 m bottom depth. Although some individual fish appeared in around 25% of the trawl hauls (Fig. 4). The proportion of S. maderensis likewise fell further offshore at around 60 m bottom depth, although there were some individuals in hauls at greater depths.

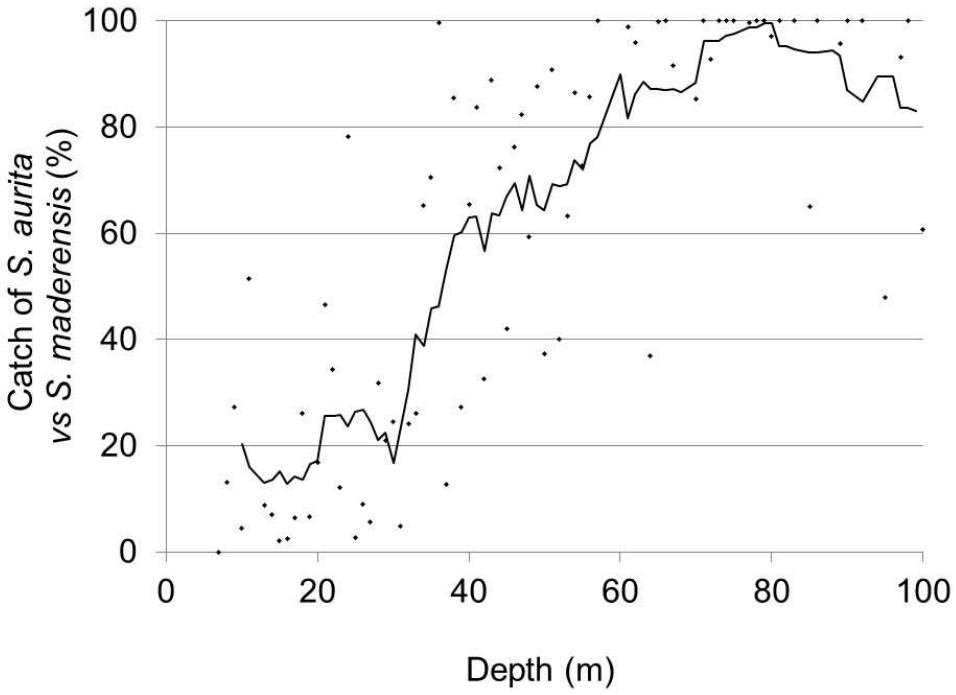



**Fig. 4.** Relative proportion per bottom depth of Sardinella aurita in comparison with S. maderensis from RV Dr Fridtjof Nansen catches (black line: 8-moving average, and associated raw data in black diamond dots) within Senegambia from 1981 to 2006 (n = 1320 trawl operations).

## 4. Discussion

Our analyses show that data from the three research vessels do not offer a complete overview of the distribution of the four main clupeids over the Senegambia continental shelf. Acoustic and catch data were used as ground-truthing information in this study, and each of them may have some limitations. The DFN acoustic database is large, but is limited by lack of separate NASC data for each of the four species. However, the ID acoustic data covering the whole Senegambian shelf over three surveys significantly contribute to fill this gap and provide reliable information of the specific distribution of the two sardinella lack.. Catch data provide less accurate information about distribution but are reliable as regards presence of the species. The vast DFN catch database provided a valuable input in this regard. Only catch data from the research vessels which covered the area were used in our analyses and more data from smaller (commercial) fishing vessels operating on the inner part of the shelf would probably have strengthened our results. However, data available from this small-scale fleet are heavily biased by its targeting of S. aurita, which is commercially more valuable than S. maderensis, and is probably also biased by the higher avoidance reaction of fish in shallow water to these vessels. Moreover, these data are not geo-localized and the station depths are not specified.

### 4.1 The case of Ethmalosa fimbriata

Registrations of E. fimbriata from the DFN surveys are few: the species is distributed in the shallow coastal waters, mainly where the seafloor depth is less than 20 m. The few registrations

off The Gambia were mainly made at bottom depths of between 15-20 m, with only one registration deeper than 20 m (Fig. 2). This inshore distribution extends inside the Saloum estuary (Table 2). The extended offshore distribution off The Gambia may be due to the flooding from The Gambia River, which provides favourable environmental conditions with among others lower salinity than the Saloum delta.

### 4.2 The case of Ilisha africana

Ilisha africana was found towards the south of the survey area, with main concentrations on the Casamance shelf, extending toward Guinea Bissau and a horizontal distribution offshore to around 60 m bottom depth, increasing towards the shallowest seafloor depth (15 - 20 m) sampled by the DFN (Fig. 2). No marked decreasing trend in the registered concentrations is observed towards the coast and these concentrations overlap roughly with the shelf areas surveyed by the DFN with minimum surface salinity, maximum temperature and relatively high species diversity (Krakstad et al, 2005; Krakstad et al, 2006). This species is known to have a great capacity for osmoregulation and sustain a wide range of salinities such as those in the hyperhaline Saloum delta, where values can reach 36 during the dry season and drop far below seawater values during the rainy season (Simier et al, 2004), and with their widest distribution during periods of maximum salinity (highest marine influence) in The Gambia River, where they also spawn (Vidy et al, 2004). We assume that I. africana was not well covered by conventional acoustic survey methods, due to what were probably high concentrations in the shallow part of the shelf (0 - 10 m bottom depth).

### 4.3 The case of sardinella

The distribution of S. aurita appears to have been covered adequately during both surveys on board DFN and ID, according to both acoustic and catch data. The acoustic data showed a typical distribution of S. aurita from 10 m down to 120 m, while the depth distribution of their captures was slightly less extensive, from 15 to 100 m bottom depth, with the highest concentrations in both analyses around the 50 m isobath, and a modal peak in catch size at around 35 - 45 m (Fig. 2). In this area, S. aurita was mixed with S. maderensis in similar densities (40% to 60%, Fig. 4). Further offshore, i.e., in layers above seafloor depths of more than 50 m, S. aurita becomes dominant with only occasional mixing with S. maderensis (Fig. 4). The distribution of S. aurita was generally further offshore and further north than for S. maderensis (Fig. 2). Concentrations of S. aurita decreases towards areas with minimum surface salinity and maximum surface temperature (Krakstad et al, 2005, 2006). Sardinella aurita have been reported as far inshore as the mouth of the Saloum estuary (Albaret et al, 2004; Simier et al, 2006) but recordings were few and the results of the present study indicate that it was not abundant in shallower bottom depths than those surveyed by the DFN.

The distribution of S. maderensis may not have been covered adequately by the DFN or even the ID surveys. The average NASC of the DFN allocated to sardinella increases towards the coast. Moreover, at 20 m bottom depth about 80% (Fig. 4) of the sardinella caught were S. maderensis. In all the years surveyed, there was also an increase in their density towards the coast, and there was no clear trend in the direction of a reduction in NASC towards the end of transects (Fig. 3a). Trawl catch data somewhat contrast these observations and indicate that the main concentrations of S. maderensis were found between 15 – 40 m bottom depth and that catches of that species were smaller closer to the shore. The concentrations increase towards areas with minimum surface salinity and maximum surface temperature (Krakstad et al, 2005, 2006), and the inner part of the distribution covered by the survey overlaps with that of I. africana. Sardinella maderensis was particularly abundant in the Saloum estuary (Albaret et al, 2004; Sadio, 2015) and in The Gambia River (Vidy et al, 2004) (Fig. 2). The tendency to congregate at shallow bottom depths was confirmed by the similar species abundance found in Saloum (Table 2).

### 4.4 Implications for biomass estimation of the clupeids

Neither of the estuarine species of marine origin E. fimbriata or I. africana (Albaret et al, 2004) were picked up by the DFN surveys along the Senegambia area north of Saloum delta. We assume that both species are more closely associated with inshore systems and do not move up the coast away from the rivers. Knowledge of differences in fish distribution patterns is essential for biomass estimation of pelagic fish species using acoustic methods (Simmonds and MacLennan, 2005). It is assumed from this study that the DFN surveys cannot expect to pick up abundance trends in the populations of E. fimbriata and I. africana during the assessment surveys. In The Gambia estuary, E. fimbriata and the I. africana were the most abundant of 70 fish species inventoried, with stocks of more than 500 000 and 100 000 tonnes, respectively (Albaret et al, 2004). They are followed at fourth place by S. maderensis with 66 000 tonnes, while S. aurita was not even listed among the 70 species inventoried. The total absence of S. aurita in this inventory might be due to its highly developed ability to avoid fishing gear (Brehmer, 2004), but a very low abundance is very likely.

Sardinella were the target species of the DFN and ID assessment surveys. Sardinella aurita seems to be covered adequately by the surveys and probably only small proportions within the surveyed area escape (Figs. 2, 3 and 4). However, the distribution of S. maderensis, which is a marine-estuarine species (Albaret et al, 2004), was shown to extend well inshore of the area surveyed by DFN. The average fish density per bottom depth interval (Fig. 3a) in 2005 and 2006, also displayed differences in how far inshore sardinella were distributed, which suggests that the proportion missed may differ from year to year, as it does in the Gulf of Lion in the south of France where a similar effect has been reported by Brehmer et al, (2006) for other small pelagic fish including clupeids (i.e. Sardina pilchardus, engraulidae). There is a seasonality in the distribution of S. maderensis in the river systems discussed here, as sardinella numbers fell during the survey period (end of October) i.e. at the end of the wet season (Albaret et al, 2004; Guillard et al, 2004), and there is a lower frequency of fish schools close to the coast. The estuaries are mainly used as nursery grounds for fry and juvenile fish, particularly by clupeids (Albaret et al, 2004; Vidy et al, 2004); such size classes were not included in the biomass estimates made by the DFN or ID. Obviously, in areas shallower than 10 m, the volume of water (i.e. the pelagic habitat) the fish can use decreases rapidly because of decreasing water depths towards the coast. It is therefore to be expected that abundance, or at least density per $m^2$, declines towards the coast in very shallow water (0-5 m) and the shape of the declining NASC curve is likely to be sigmoid. We can assume that the reduced available depth of the habitat causes the fish to spread out over a wider horizontal area, and thereby maintaining high biomass even in shallow regions. This could partly explain the high number of observations in shallow waters and should still be investigated further as done in Mediterranean Sea using a shallow boat (Brehmer et al., 2006). Looking at the NASC recordings from ID (Fig. 3a) it seems that the abundance of S. maderensis continued to increase inside the area that cannot be surveyed by the DFN (i.e. shallower than 15 m bottom depth).

We therefore conclude that the biomass missed each year was variable, and in this area may be considerable for both E. fimbriata and I. africana. Further studies should be carried out to obtain more knowledge of the spatio-temporal distribution of S. maderensis in shallow waters, although acoustic surveys limited to a minimum depth of 15 m cannot fully cover the stock. Our estimates of this species although considerable, (averaging 450 000 tonnes in the period 2000-2006, DFN estimates) must be considered minimum estimates. The continental shelf between Casamance and Cape-Vert in many ways is a worst-case scenario for conventional small pelagic assessment surveys, because the inshore unsurveyable area comprises 20% of the total continental shelf. In this area, the DFN sardinella biomasses as yielded from the different surveys showed a relative variability in abundance as illustrated in figure 5. This biomass index shows the relatively low abundance of S. aurita compared with S. maderensis, and spring yielded biomass compared to autumn estimates.

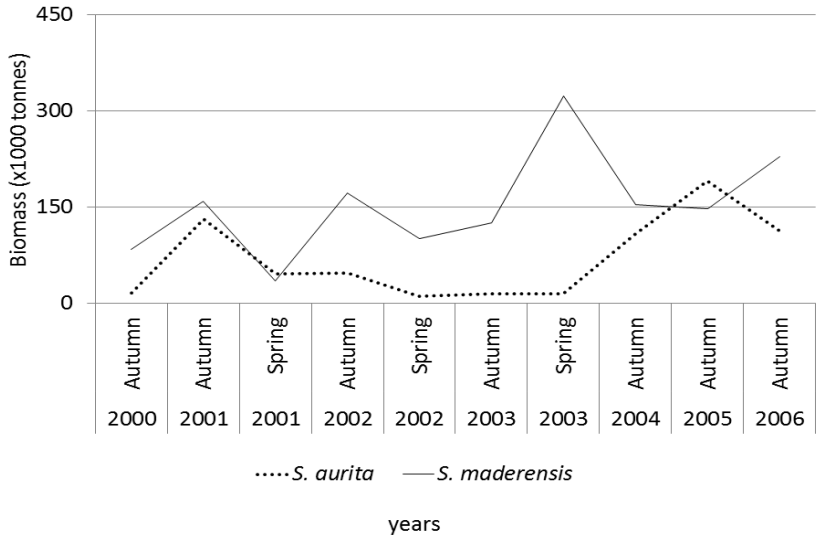



**Fig. 5.** Biomass estimates of Sardinella aurita and S. maderensis from DFN surveys in the continental shelf between Casamance and Cape-Vert in thousand tonnes, from 2000 to 2006, on autumn and spring seasons.

### 4.5 The challenge of surveying shallow water areas

It is clear that abundance surveys of fish stocks in shallow water lagoons, estuaries and lakes are subject to several problems (Brehmer et al, 2011). Traditional offshore survey vessels are inevitably too large to cover these areas (Brehmer et al, 2006), and small speedboats face human and logistical problems. Consequently, large shallow shelf areas are difficult to cover. In fact, even regular offshore surveys are already difficult to maintain in Senegambia due to financial constraints. However, small boats may still be the essential tools when focus is on the abundance and ecology of the coastal ecosystems. Complementary knowledge on fish exchange between the estuaries and the shelf could help identify both the best period to survey the offshore areas, and identify how large proportion of the stock is really missed during these offshore surveys. A recent approach developed in the last ten to fifteen years is airborne LIDAR (Light Detection and Ranging) which measures distance to a target by illuminating it with a pulsed laser light and measuring the reflected pulses. This technique is in many aspects similar to echo sounding; it has a range of around 40 m depth depending on the degree of turbidity and has no minimum depth threshold (Churnside et al, 2001). The use of aircraft has some clear advantages over vessels in shallow water surveys, as they require a very small crew while covering large survey areas in a relatively short time span. Aircraft are therefore very cost-effective in comparison with vessels. The coast of North West Africa, and particularly the shallow water areas of the Banc D'Arguin in Mauritania and the inner shelf between Cape Vert and Casamance would be a good places to test such techniques in Africa, and in combination with ground truthing of scientific catches or video observations from speedboats, could greatly increase the available information regarding the distribution and abundance of pelagic species in these shallow waters, effectively complementing classical acoustics assessments, which provide reliable standardised time series.

## 5. Acknowledgements

This work was supported by the "Nansen Programme", funded by Norad and the United Nations Food and Agricultural Organization. The authors are grateful to the research vessel crews and colleagues who participated in the surveys, as well as the joint CRODT-IRD team for their contributions to the acquisition of estuarine data. We also thank the AWA project funded by IRD and the BMBF (grant 01DG12073E) implemented by the Sub-Regional Fisheries Commission (SRFC/CSRP, Dakar), for data analysis support. We dedicate this work to Ibrahima Sow re-CRODT, who led the Saloum survey with the IRD team. We gratefully thank anonymous reviewers for their advices.

**References** Voir paragraphe références de la these.

## 2.6. Conclusion

L'aire de repartition générale des deux sardinelles est assez bien connue de nos jours, avec la sardinelle ronde en particulier opérant des migrations entre globalement 10° N et 25° N, couvrant toute la zone sénégalo-mauritanienne et ralliant les deux aires de nurseries dans la région, l'une à l'ouest du Banc d'Arguin et au sud du Cap Timiris et l'autre du sud de Dakar aux Iles Bissagos. Elle est plus active que la sardinelle plate qui est relativement sédentaire. L'exploitation des deux sardinelles au Sénégal fait état d'indices d'abondance (CPUE) de la sardinelle ronde (Sardinella aurita) assez stables pour la pêche artisanale depuis 1990, avec l'augmentation constatée à partir de 2004 principalement attribuée aux prises faites en Mauritanie par la flottille artisanale sénégalaise. Le suivi de ces ressources par les campagnes acoustiques montre toutefois une forte variabilité dans les biomasses estimées d'une année à une autre mais aussi d'un navire à un autre. En se référant aux estimations du RV Fridtjof Nansen, si une relative stabilité des biomasses, autour de 200 000 tonnes annuellement, est constatée depuis 1990 au Sénégal, une forte chute des biomasses est observée en Mauritanie. Les disparités constatées avec les navires locaux soulignent l'importance d'améliorer les outils utilisés sur ces navires. En particulier au Sénégal ces améliorations doivent aussi s'intéresser à la représentativité des campagnes acoustiques par rapport aux stocks ciblés, compte tenu des vastes zones non couvertes par les navires de recherche. L'étude menée à ce sujet nous révèle alors dans ce chapitre que si le stock de sardinelle ronde est relativement bien couvert par les campagnes classiques d'échointegration, par contre le stock de sardinelle plate semble être mal couvert avec une intrusion notable de la sardinelle plate dans la frange côtière et estuarienne. Ceci ramène à nouveau la question de la couverture des petits fonds où des moyens d'investigations différentes des campagnes classiques d'acoustique doivent étre trouvés, particuliérement au Sénégal où la question reste encore d'actualité.

# Chapitre 3

# Impact du changement climatique sur la distribution des petits pélagiques en Afrique de Ouest

# 3. Chapitre 3. Impact du changement climatique sur la distribution des petits pélagiques en Afrique de l'Ouest

## 3.1. Contexte de l'étude

Des observations caractéristiques de la région nord ouest africaine ont pu être relevées dans la revue des conditions bioécologiques et environnementales réalisée dans le chapitre initial de cette thèse. Parmi celles-ci, la présence de zones d'upwelling permanent ou saisonnier qui rythment la dynamique des petits pélagiques, avec des remontées d'eaux froides profondes riches en sels minéraux en permanence au-dessus de 20° Nord (Mauritanie) et saisonnièrement au sud de cette latitude (Sénégal). Ces upwellings sont liés aux régimes de vent qui ont été globalement décroissants dans la région depuis plusieurs décennies, selon les résultats des extractions satellitaires réalisées dans cette thèse. Des éléments caractéristiques plus localisées sont observés comme au Sénégal, un processus de salinisation progressif de l'eau de mais aussi des apports terrigènes importants venant de fleuves (le Sénégal, la Gambie, le Saloum et la Casamance) drainant vers la mer des quantités relativement importantes d'eaux fluviales et jouant souvent un rôle notable dans l'alimentation et la survie de juvéniles de poissons marins (Diouf, 1996). Rappelons ici surtout la montée exceptionelle des températures de surface des eaux, constatée dans la région et surtout au Sud du Cap Blanc.

Dans l'étude qui suit, les differents paramétres physiques susceptibles d'agir sur la dynamique de ces petits pelagiques sont analysés sur le long terme et mis en relation avec les changements dans la distribution de ces ressources.

## 3.2. Intense warming causes a spatial shift of small pelagic fish: early warning for food security in North-West Africa

Abdoulaye Sarré[1,*], Hervé Demarcq[2], Noel Keenlyside[3], Jens Otto Krakstad[4], Saliou Faye[1], Djiga Thiao[1], Salahedine Elayoubi[5], Jiyid Mohamed Ahmed[6], Ebou Mbaye[7], Adama Mbaye[1], Patrice Brehmer[1,8]

[1]Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye, BP 2241, Dakar, Senegal, ablaysarrey@yahoo.fr

[2]Institut de Recherche pour le Développement, UMR-248 MARBEC, Centre de Sète, Avenue Jean Monnet, CS 30171, 34203 Sète cedex, France, herve.demarcq@ird.fr

[3]Geophysical Institute, Univ of Bergen and Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, noel.keenlyside@gfi.uib.no

[4]Institute of Marine Research, P.O. Box 1870 Nordnes, N-5817 Bergen, Norway, jens.otto.krakstad@imr.no

[5]Salaheddine El Ayoubi, Institut National de Recherche Halieutique (INRH), Casablanca, Morocco, s_elayoubi@yahoo.com

[6]Institut Mauritanien de Recherche Océanographique et des Pêches (IMROP), BP 22, Nouadhibou, Mauritania, moahtaje@yahoo.fr

[7]Fisheries department (FD), Banjul, The Gambia, emmbye@gmail.com

[8]Institut de Recherche pour le Développement, Campus IRD-UCAD, UMR-195 LEMAR, BP 1386, Hann, Dakar, Senegal, patrice.brehmer@ird.fr

### Abstract

Along the coast of North-West Africa, fish supply is important at both socio-economic and cultural levels. Reports by fishermen emphasize changes in the distribution of food security important fish species. Northward shifts in the distribution of sardinella and other species have been attributed to a warming trend and the redistribution of upwelling intensity and productivity. As a result, sardinella abundance along the coast has increased in the subtropics and decreased in the intertropics. Using independent observational time series we confirm a robust northward shift in Sardinella aurita since 1995, and attribute it to the intense warming of this ocean region, where the highest increase in sea surface temperature of all tropics is found. The spatial shifts in biomass observed over several hundreds kilometres in the last 20 years are of the same order of magnitude as those recorded for surface isotherms in the sub-regional pelagic habitat of sardinella. Such changes are an important policy consideration for the management of food security in several West African countries.

**KEYWORDS**

CCLME, small pelagic fish, Climate change, fish distribution, fish stressor, sardinella.

## 1. INTRODUCTION

Climate change impacts in different sectors of the developing countries are difficult to anticipate and incorporate into policy and management planning (Cheung, Watson, & Pauly, 2013; Savo, Morton, & Lepofsky, 2017; Simpson et al., 2011), because of a lack of data, and uncertainty in future climate change and its impacts. This is especially true for marine-ecosystems and fisheries, including the highly productive Eastern Boundary Upwelling Systems (Sumaila, Cheung, Lam, Pauly, & Herrick, 2011). In North-West Africa, small pelagic fish resources are usually shared among several countries. These species constitute the main biomass of fish landings, and are dominated by sardinella (Sardinella aurita and Sardinella maderensis). Here we focus on sardinella for their food security relevance and because Senegalese fishermen are complaining about a northward and off-shore shift in their distribution, and a decrease in their abundance that has reduced the profitability of fishing over the last 20 years (Ba et al., 2017).

Small pelagic fish species are monitored through annual hydroacoustic surveys carried out by the Research Vessel Dr Fridtjof Nansen (DFN). To investigate whether an environmental change is impacting this sub-region (Bakun, 1990), the DFN database (encompassing 170 000 km sampling transects and 2 263 fishing operations (Fig.1) is evaluated to determine potential shifts in the latitudinal distribution of small pelagic fish and their relation to changing environmental conditions. The latitudinal extreme locations and annual biomass barycentre positions are used as two independent spatial indicators, which are based on standardized scientific trawl sampling and fisheries acoustics data (Simmonds & MacLennan, 2005), respectively. Historical remote sensing data sets are compiled and analysed to check the sub-regional effect of climate change on the main environmental_variables (Demarcq, 2009).

We have an incipient understanding of the main driving forces determining the productivity of pelagic habitats of the main fish species and their average patterns in the Canary Current

(Aristegui et al., 2005; Auger, Gorgues, Machu, Aumont, & Brehmer, 2016; Lathuilière, Echevin, Lévy, & Madec, 2010), but we have very little insight in to their spatio-temporal variability. Relative changes in the spatial patterns of the fishing effort are not likely to have impacted pelagic resources sufficiently to explain the observed changes in their latitudinal macro-scale distribution. A known alternative hypothesis to explain these distributional changes is that the environment changes have exceeded the homeostasis capacity of the pelagic ecosystem and consequently induced modifications in the structure of its populations (Binet, 1988). Indeed, physical and biological conditions determine an ecosystems capacity to support a given species in the food chain.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Ecological environment of sardinella

In the Eastern central Atlantic, three distinct regions where the S. aurita is especially abundant were identified (Boëly & Fréon, 1979), all characterized by coastal upwellings. We focus on the northernmost region that extends from South Morocco (26°N, Sahara bank) to Guinea (10°N) where S. aurita occurs over the continental shelf in clear and salty waters (salinity > 35), with temperatures typically lower than 24°C (Boëly & Fréon, 1979 ; Fréon, 1988). Sardinella aurita can withdraw below the thermocline in the warm season and be found at depths of 200 meters during the night (Fisher, Bianchi, & Scott, 1981), whereas schools are superficial during the day (Brehmer et al., 2007).

Sardinella maderensis, in contrast, is euryhaline and lives in the coastal zone, often associated with estuaries and water temperature over 24°C (Binet, 1988; Boëly & Fréon, 1979) and is considered to be less sensitive to environmental changes (Ba et al., 2016).

Long-term variations in small pelagic fish stocks are attributed to recruitment success as a result of oceanographic conditions during the juvenile stage (Cury & Roy, 1989; Cury et al., 2000; Demarcq & Faure, 2000a; Diankha et al., 2017; Huggett, Fréon, Mullon, & Penven, 2003). The area is characterised by recruitment favourable upwelling that occurs seasonally, except in the area between 21–26 °N where the upwelling is quasi-permanent.

Migrations of sardinella in the North-West African region

The populations of S. aurita along the North-West Atlantic coast of Africa migrates seasonally between upwelling convergence zones (Boëly, Chabanne, Fréon, & Stéquert, 1982; Boëly & Fréon, 1979). The first adults passes the peninsula of Cape Vert (Senegal) in December-January and concentrate between Dakar and Guinea-Bissau, where they spawn and stay until April before starting their northward migration with the heating of the surface waters. After spawning, the juveniles leave the nursery in southern Senegal and join the seasonal migrations of the adults. They reach their northernmost distribution, north of Cape Blanc, Mauritania (24°-25°N) in October-November, in the period when the stock assessment surveys are carried out. The adults scatter from October to January off Mauritania and quickly migrate southward in January-February. The annual migration of S. aurita in North-West Africa is associated with the seasonal dynamics of the Canary Coastal upwelling in the region (Boëly, Chabanne, Fréon, & Stéquert, 1982).

Sardinella maderensis has a less pronounced migratory behaviour than S. aurita (Longhurst & Pauly, 1987). Sardinella maderensis is reported to be relatively sedentary (Cury & Fontana,

1988), and its movements in Senegal and Mauritania are confined to the nursery areas. In Senegal, young individuals less 20 cm concentrate in January-February between The Gambia and Guinea Bissau, and there is a high concentration of the young spawners in this area in March and April (Boëly & Ostvedt, 1976). On July, they migrate towards Dakar and probably further north, before beginning their migration southwards in October. The movement of adults is less known: However, we do know that they leave Senegalese coasts around 22-23 cm size and are found along the coast of Mauritania from February to September and in the vicinity of Cape Blanc from October to January; few adults larger than 24 cm are found in Senegal and maximal size in Mauritania is 32 cm (Chavance, Ba, & Krivospitchenko, 1991).

Until the 1970's, the northern limit of the migrations of S. aurita was considered around 24°N (Boëly, Chabanne, Fréon, & Stéquert, 1982; Conand, 1977), and the Senegalese-Mauritanian stock of S. maderensis, less studied, was distributed along the coast around 26°N to 10°N.

### 2.2. The West African hydro-acoustics surveys 1995-2015

The DFN has carried out regular acoustic surveys to assess the small pelagic fish stocks in North-West Africa covering the region from Casamance (12°16´ N) in Southern Senegal to Cape Cantin (32°30´ N) in Morocco (Fig. 1). These surveys were conducted annually in November-December from 1995 to 2006 and then in 2011 and 2015. The surveys always went far beyond the northern distributional limit of the sardinella (Table 1), with the possible exception of the 2005 survey that stopped in Morocco at 26°18´ N. The surveys were specifically designed to assess the small pelagic fish stocks, except in 2011 (Table 1) where there was a slightly less dense acoustic sampling grid and slightly fewer pelagic trawl sampling stations. The fish sampling protocol was consistent through the time series, with high sampling intensity (2 263 trawls performed in total from 1995 to 2015) and the same fishing gear ("Akrahamn" pelagic trawls and "Gisund super bottom trawl"). Distributional maps of pelagic fish and the abundance estimation was based on data recorded from a Simrad 38-kHz transducer connected to a scientific echo sounder (EK 500 and later EK60); the sounder was calibrated using standard techniques (Foote, Knudsen, Vestnes, MacLennan, & Simmonds, 1987) and constant sounder parameters e.g. 20 log R time varied gain function (R is the range, in m), 1 ms pulse length. Post processing of data was done with the Bergen Echo Integrator (Knudsen, 1990).

The search for spatial shifts of sardinella and other tropical pelagic fish stocks over the past two decades is based on two spatial indicators: the latitudinal extreme presence and the barycentre of the biomasses, both computed by survey i.e. per year. Note, our statistical analysis considers the uncertainties introduced by the temporal gaps in the biomass data. This limitation is not present for the satellite derived environmental data that cover a range of nearly thirty years.

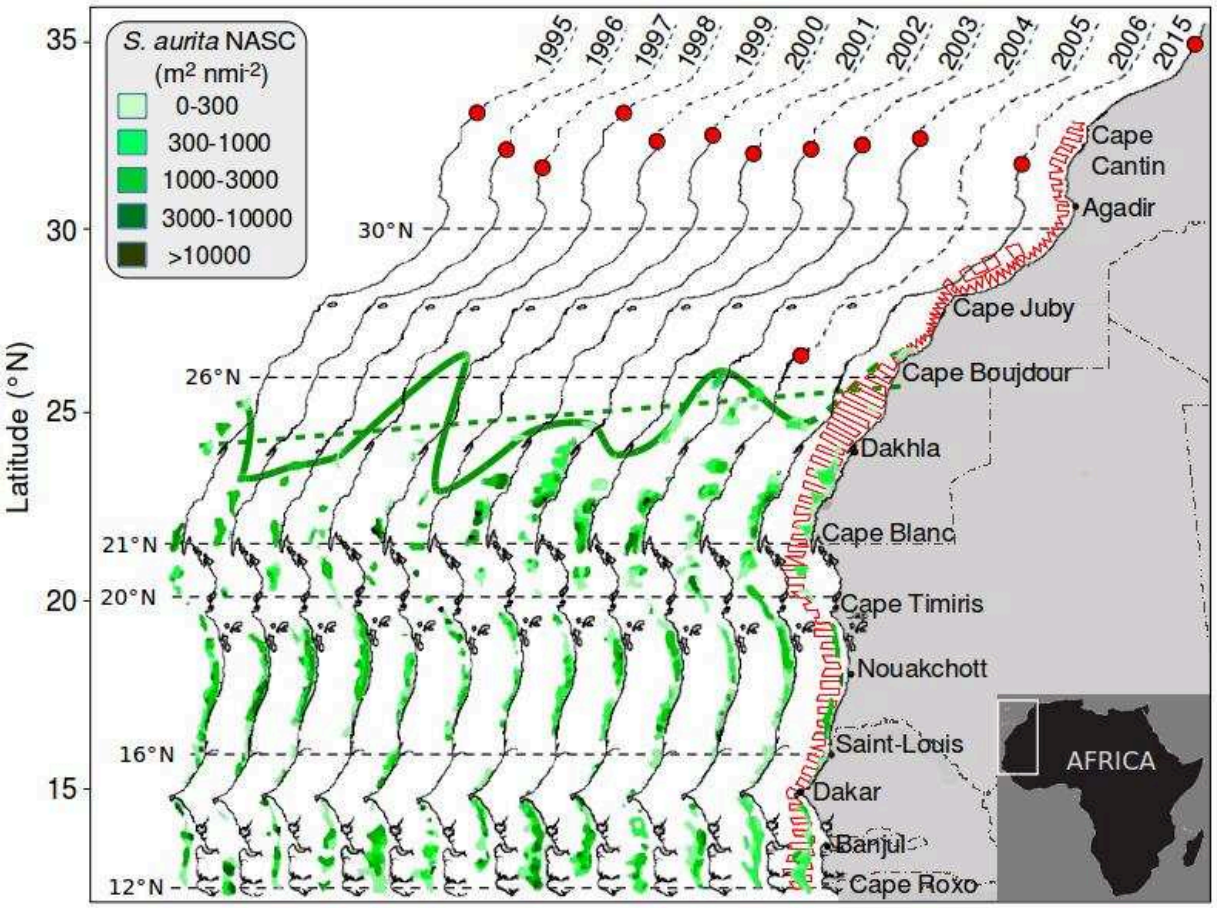



**Figure 1 Northward trend in the distribution of sardinella, along their habitat extension from Cape Roxo (Senegal) to Cape Boujdour (Morocco), from 1995 to 2015 based on annual acoustics surveys.** Fish density (nautical area backscattering coefficient 'NASC' expressed in $m^2$ $nmi^{-2}$) is indicated by different intensities of green. The northern limit of detection identified by fishing operations is shown as a dark green line. Red circles indicate the northernmost latitude in which vessels operated each year. Red lines show typical acoustic transects. This distribution includes the two sardinella species (Sardinella aurita and S. maderensis), with S. aurita being the main contributor to the north of 20 °N.

## 3. Methodological approach

### 3.1 Acoustic data processing

To detect possible spatial changes in species distribution, we analysed time series of the northern extreme latitude where they were caught in the trawls. The analysis was made on the data set of pelagic species present in the DFN database. The species selection have been made on five criteria: the species must be exploited, important for food security (locally consumed), of sub-tropical or tropical affinity, frequently encountered in the catch (Table 1) and their northern limit of abundance (not occurrence) must be included in the coverage of the DFN surveys (Fig. 1). Eight species follow these criteria: both sardinella species (S. aurita and S. maderensis) and six others: Trachurus trecae, Decapturus rhonchus, Selene dorsalis, Chloroscombrus chrysurus, Brachydeuterus auritus and Sphyraena guachancho. Given the linear trend function 'f' of the northernmost latitudes of each species, the related shift is estimated as $\Delta f = f(2015) - f(1995)$. The statistical significance of the northern shift in S. aurita for the period 2000-2015 compared to 1995-1999 was tested against a bootstrap distribution, created by 100000 random resampling of the northern limit and barycentre time series. Lastly the significance of the trends were tested by a Spearman test for all species.

**Table 1. Trawl stations from 1995 to 2015 and number of trawls where each of the species occurred (%).** Southern survey limit = minimum latitude covered by the vessel; Northern survey limit = maximum latitude covered by the vessel; S_aur = Sardinella aurita ; S_mad = Sardinella maderensis ; T_tre = Trachurus trecae ; D_rho = Decapterus rhonchus ; C_chr = Chloroscombrus chrysurus ; B_aur = Brachydeuterus auritus ; S_dor = Selene dorsalis ; S_gua = Sphyraena guachancho. All surveys are performed on November-December.

| Year | Nb. of trawl (n = 2263) | Occurrence of species in trawls (%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | S_aur | S_mad | T_tre | D_rho | B_aur | C_chr | S_dor | S_gua |
| 1995 | 158 | 43 | 36 | 27 | 32 | 28 | 19 | 16 | 20 |
| 1996 | 129 | 35 | 26 | 26 | 29 | 20 | 16 | 12 | 9 |
| 1997 | 115 | 47 | 41 | 26 | 23 | 20 | 22 | 13 | 10 |
| 1998 | 155 | 37 | 30 | 32 | 28 | 17 | 17 | 14 | 8 |
| 1999 | 164 | 38 | 34 | 38 | 23 | 21 | 20 | 23 | 7 |
| 2000 | 133 | 28 | 31 | 38 | 35 | 26 | 26 | 27 | 20 |
| 2001 | 115 | 41 | 45 | 24 | 29 | 26 | 26 | 20 | 18 |
| 2002 | 185 | 30 | 28 | 44 | 22 | 15 | 16 | 15 | 10 |
| 2003 | 175 | 30 | 30 | 38 | 22 | 19 | 17 | 14 | 10 |
| 2004 | 158 | 34 | 36 | 32 | 31 | 22 | 25 | 18 | 8 |
| 2005 | 131 | 39 | 34 | 43 | 25 | 28 | 30 | 23 | 24 |
| 2006 | 155 | 35 | 37 | 41 | 21 | 22 | 20 | 18 | 14 |
| 2011 | 281 | 14 | 7 | 19 | 19 | 17 | 8 | 12 | 9 |
| 2015 | 209 | 17 | 18 | 22 | 23 | 22 | 11 | 12 | 10 |
| Mean | 162 | 33 | 31 | 32 | 26 | 22 | 19 | 17 | 13 |

DFN fisheries acoustics surveys (Simmonds & MacLennan, 2005) used in this work have been performed during the fourth quarter of the year with a high and consistent sampling intensity. During each survey of year "*a*", the barycentre "*Ca*" of the biomasses was computed for the entire region for S. aurita and S. maderensis by weighting the individual biomasses of each zone. Considering "*Bai*" the biomass in zone "$Z_i$" (Fig. 2) for year "*a*" and "*Ai*" the coordinates of the centre of "$Z_i$", the coordinates of the barycentre "*Ca*" of the biomasses fit the equation below:

$$\sum_{i=1}^{n} Bai\overrightarrow{CaAi} = Ba1\overrightarrow{CaA1} + Ba2\overrightarrow{CaA2} + \cdots + Ban\overrightarrow{CaAn} = \vec{0} \quad (1)$$

And the coordinates in latitude "*Xa*" and longitude "*Ya*" of Ca are:

$$Xa = \frac{\sum_{i=1}^{n} Bai * Xai}{\sum_{i=1}^{n} Bai} \qquad Ya = \frac{\sum_{i=1}^{n} Bai * Yai}{\sum_{i=1}^{n} Bai} \qquad (2)$$

While the barycentre indicates the mean location of the surveyed population, fish may not be present at its exact location, which may be on land (Woillez, Rivoirard, & Petitgas, 2009) because of the coastline configuration.

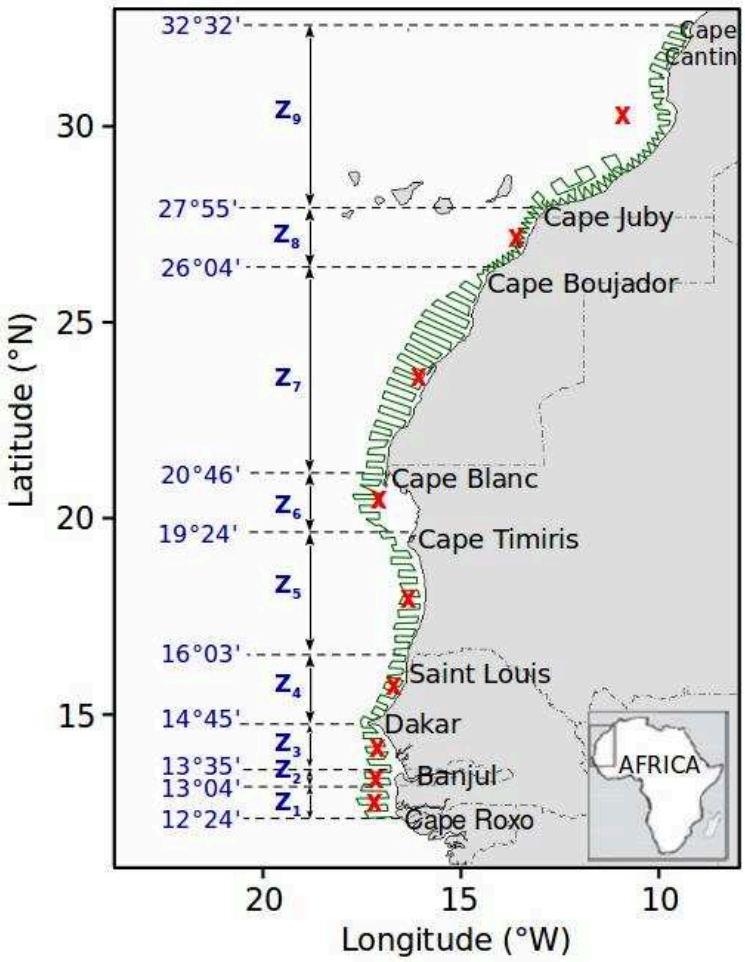



**Figure 2. Map of the study area split in zones during the RV Nansen acoustic surveys**. The nine zones are used to estimate the sardinella biomass in the sub-region (Morocco to Senegal). The red crosses show the latitudinal middle of each zone.

### 3.2. Main driving environmental forces of the distribution of pelagic stocks

Fish habitat can be defined by a set of physical parameters (such as temperature), and primary and secondary production, all being structured by the intensity and water characteristics of the coastal upwelling system. In order to find the potential drivers of the changes in distribution of the small pelagic fishes, we consider changes in (1) the upwelling-favourable meridian wind speed at the sea surface (as an upwelling index because of the average North-South coastline orientation (Benazzouz, Mordane, et al., 2014) ; here after "upwelling wind"); (2) the sea surface chlorophyll-a concentration (SSC), a reasonably good proxy of the primary productivity of biomass-based models, whose trends are known to be similar (Demarcq, 2009); and (3) the sea surface temperature (SST). All variables are extracted in five characteristic zones within the North West African region: North of Cape Boujdour, between Cape Blanc and Cape Boujdour, around the Cape Blanc between 20 and 21°N, and the Mauritanian and Senegalese zones (Benazzouz, Mordane, et al., 2014; Benazzouz, Pelegrí, et al., 2014), as shown in Fig. 1.

All environmental data are derived from satellite remote sensing products available from the US NOAA agency. The wind data is extracted from the daily CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) wind product V2.0 at 0.25-degree spatial resolution, available at http://www.remss.com/measure-ments/ccmp, from 1988 and updated through May 2016. The chlorophyll-a data was collected daily from the AQUA-MODIS sensor from 2003 to 2012

available at (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/). All data have been monthly averaged. The SST data is extracted from the daily day-time series of the pathfinder AVHRR data set version 5.2 from 1982 to 2012 at 4 km resolution, (available at http://pathfinder.nodc.noaa.gov) (Casey, Brandon, Cornillon, & Evans, 2010) and from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) data for the recent period (2012-2015). The two products were merged after checking their consistency (specially absence of bias) during the common AVHRR-MODIS period from 2003 to 2012 (Fig. 3). We analyse the whole time series to explore the relative warming before and during the study period (1995-2015), i.e., in the context of the longer term climate-induced warming.

The spatial averages of the satellite data are computed for the five coastal zones using a fixed distance from coast of 100 km. This average quantifies the coastal upwelling signatures, particularly in terms of SST trends. We show for two contrasted regions (Fig. 4) that no significant difference is visible in term of temporal trend between this criteria and a more refined averaging restricted to the continental shelf (0-200m isobaths), at a variable distance generally included in the 100 km distance from coast.

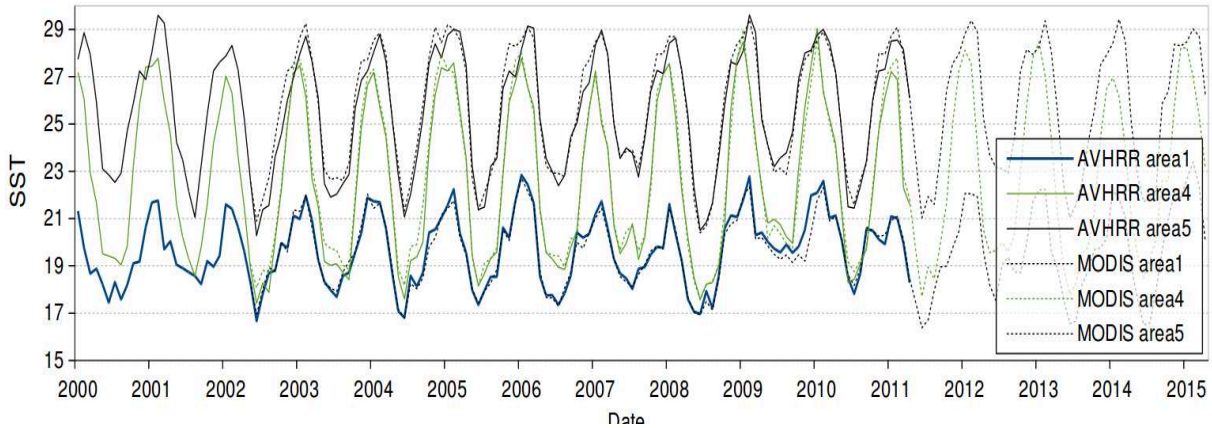



**Figure 3. Comparison of AVHRR and MODIS sensors for coastal sea surface temperature (SST).** Because of possible discrepancies in coastal SST retrieval due to sensor characteristics, calibration, SST algorithms and various atmospheric correction procedures including cloud masking, it is important to compare both data sets in the Canary upwelling region. Daytime SST from both AVHRR and MODIS sensors have been compared for the 2003-2012 period (2000-2015 shown). Because limited differences were observed and specially no significant bias, a simple arithmetic average has been performed during this period, minimizing the effect of possible residual differences in the computation of trends over the whole 1982-2015 period.

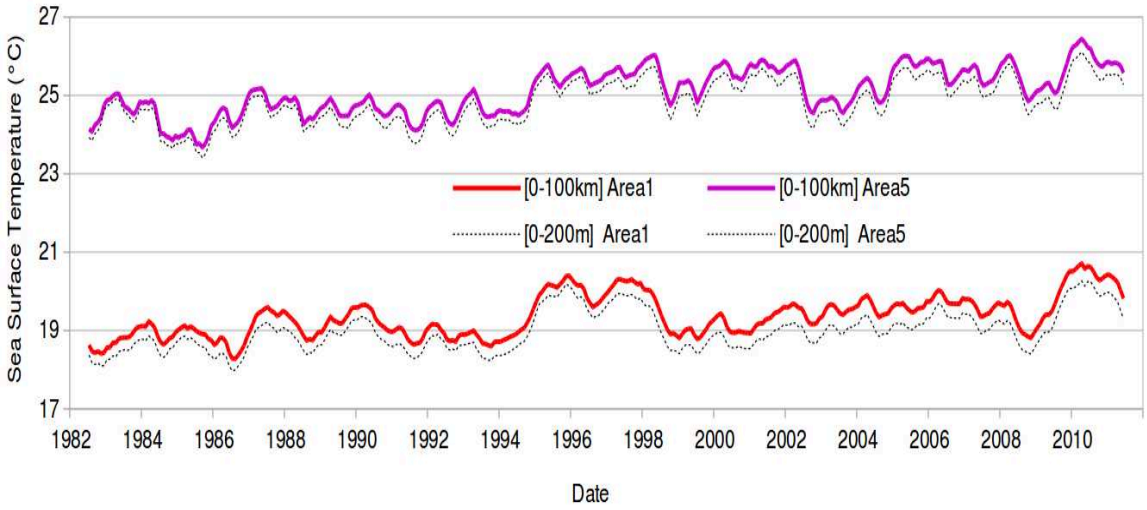



**Figure 4. Coastal sea surface temperature (SST) sensitivity to spatial averaging.** Two ways of spatial averaging were compared for two contrasted areas (area 1, Southern Morocco and area 5, Senegal and Guinea): from the coast to 100 km offshore (the reference chosen in this study) and from the coast to the 200 meter isobath. Slightly lower values of SST are recorded in this case because of the proximity to the coastal upwelling. Nevertheless, the thermal dynamic depicted is identical and do not induce differences in the computation of trends. At the contrary, a 100 km distance from coast adequately reflects the spatial patterns of the trends, as shown in figure 3 (right panels).

## 4. Results

### 4.1. Changes in the distribution of Sardinella species

Several key species exhibited a northward shift over the last 20 years (Fig. 5; Table 2), including S. aurita (Fig. 5). Fish surveys indicate that this shift is not linear and mostly associated with S. aurita. The barycentre of the acoustic-based biomass of S. aurita from 1995 to 2015 (Fig. 5a) is characterized by a northward shift, with a similar displacement of its northern distribution limit, both statistically significant ($p<0.01$). Sardinella aurita migrated up to 250 km northward since 1995, while S. maderensis showed a quasi stable distribution.

The distributional shifts in sardinella species are thus investigated in relation to environmental changes. During this period, the upwelling wind showed a highly significant intensification from Cape Timiris (19.5° N) to Agadir (30° N) and further north (Fig. 6a, areas 1–3). In comparison, quasi-stability in the upwelling wind was observed in Mauritania (Fig. 6a, area 4), while their intensity severely decreased in Senegal (Fig. 6a, area 5). However, the strongest trends of all region occurred between Cape Cantin and Agadir (30 to 32 °N). In the quasi-permanent upwelling region (21–26 °N, area 2), the upwelling wind increased in the southern part but were remarkably stable in the north (25-26 °N), at the location of the strong upwelling cell south of Cape Boujdour. The upwelling wind also increased around Cape Blanc (20–22 °N, area 3).

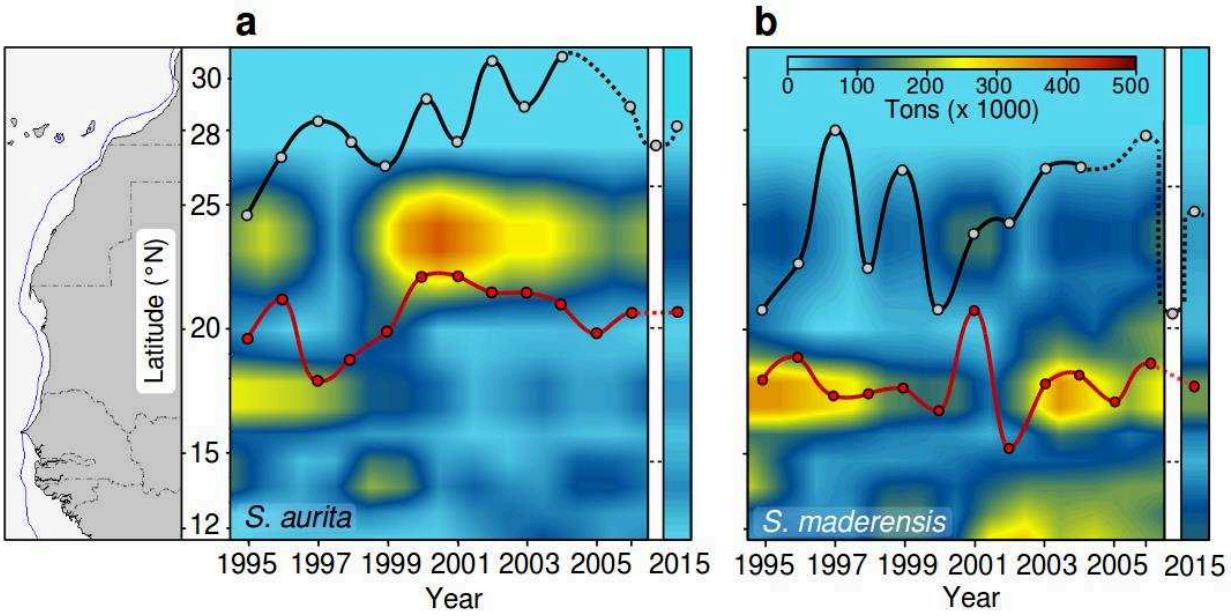



**Figure 5. Spatio-temporal changes in the distribution of Sardinella aurita (a) and S. maderensis (b) stocks detected by annual acoustics sea surveys over their distribution area (map).** The barycentre of the distribution is plotted as a red line, while the northernmost detection of the species from the trawl fishing stations is plotted as a black line. The dotted sections of the lines represents periods without year-to-year surveys. Annual biomass is expressed as thousands of tonnes. The white area represents the 2011 survey without acoustic biomass estimate. The blue line on the map shows the 200 meters isobath.

None of the trends in primary production, based on the concentration of sea surface chlorophyll-a (SSC), were statistically significant (Fig. 6b). Nevertheless, a general decrease occurred in Senegal and Mauritania, in the line with the long term projected trends expected in the tropical Atlantic Ocean (Kwiatkowski et al., 2017). In contrast, no positive trend in primary productivity was observed north of 26°N despite the sustained strengthening of the upwelling. Furthermore, the Saharan region (area 2) where upwelling wind is maximum (over 5.5 $m^{-3}$ $s^{-1}$ in the last years) showed a slight decrease in SSC, nevertheless compensated by an increasing in its southern part, off Cape Blanc.

The SST showed a strong warming in the whole region since 1982 (Fig. 6c), dominated by a positive shift between 0.5 °C and 1 °C in 1994-95. The warming is reflected in the northward displacement of the isotherms (Fig. 7). It is particularly strong to the south of Cape Blanc (Fig. 6c), with values > 0.5 °C per decade. The mean position of the 24 °C isotherm was located at the coast by Dakar from 1982 to 1998, and moved to Saint-Louis 15 years later (1999–2015), representing a latitudinal shift of approximately 230 km (Fig. 7). While in the north, the 19°C isotherm off South Morocco shows a northward shift of 280 km. All isotherm displacements (Table 2b) and warming rates (Figure 9d) show a decreasing northward tendency, with the maximum warming rates south of Cape Blanc.

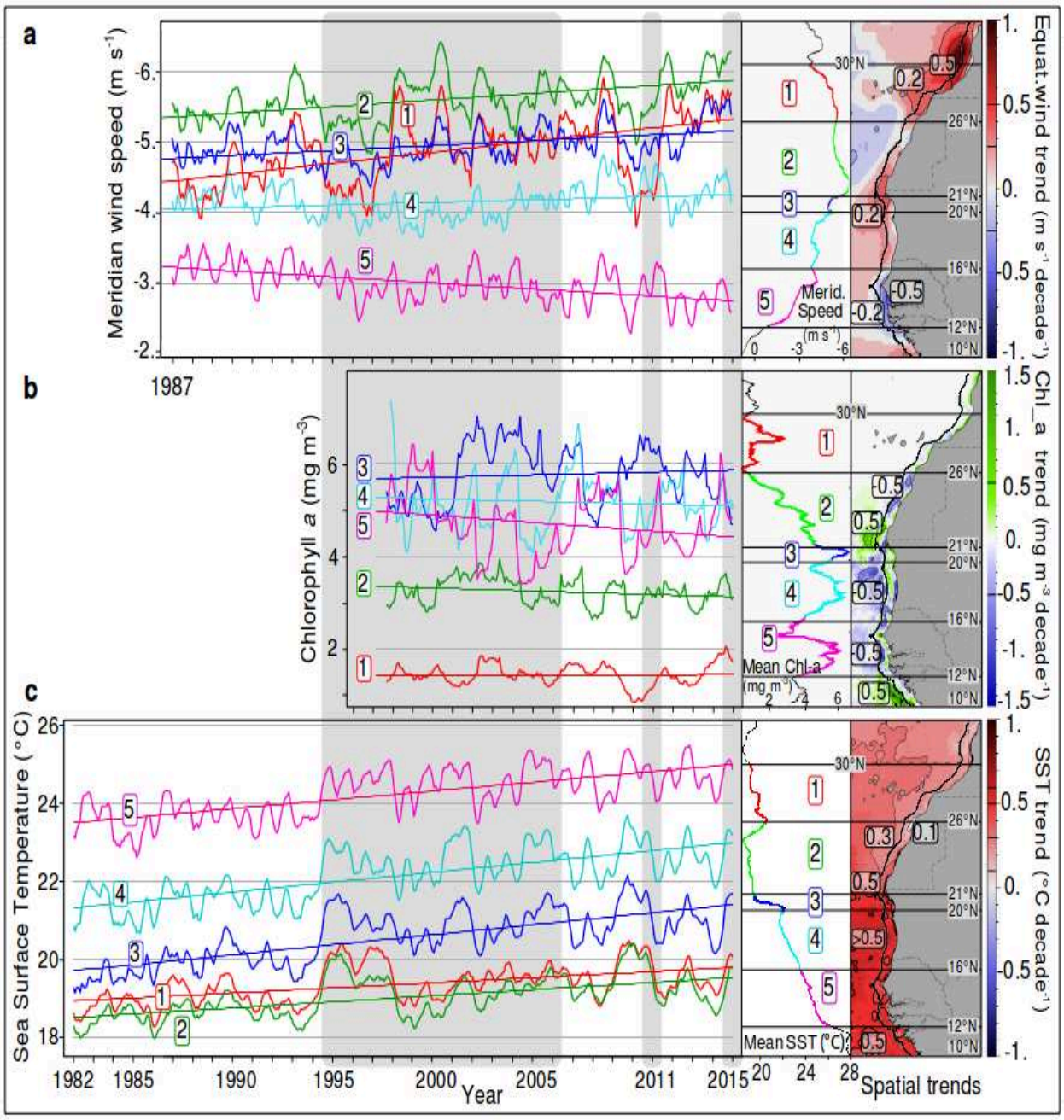



**Figure 6. Changes in hydro-climatic conditions along the North-West coast of Africa.** Monthly averages (13-term moving averages) of the equatorward wind speed component (CCMP satellite composite data, **a)**, chlorophyll-a (SeaWiFS and MODIS-corrected data, **b)** and sea surface temperature (AVHRR and MODIS data, averaged during the period 2003-2012, **c)** from southern Morocco to Senegal (area 5) from 1987, 1998 and 1982 to 2015, respectively. All data are spatially averaged from the coast to 100 km offshore (black line in the maps) for each latitudinal area (numbered 1 to 5 from North to South). The middle plots represents the continuous latitudinal profile of the same data and the maps the spatial trends during the same period. The periods covered by the biological data (1995 to 2006, 2011 and 2015) are shaded in grey. Enlarged maps are provided Fig. 9.

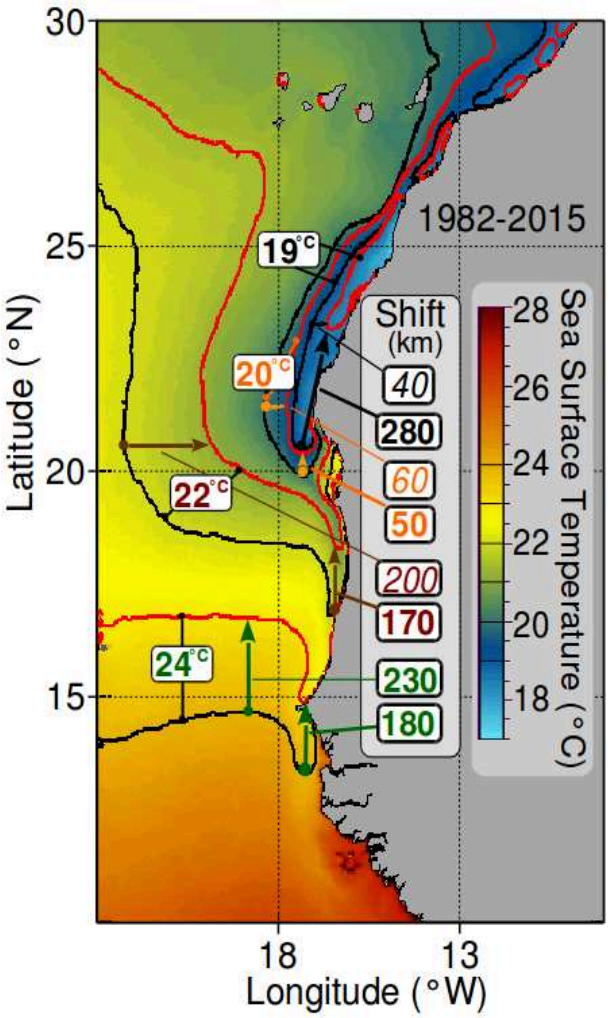



**Figure 7. Changes to the sea surface isotherms in the southern Canary Current Upwelling System from 1982 to 2015.** Blue and red isotherms 19 °C (black), 20 °C, (orange) 22 °C (brown) and 24 °C (green) are shown for the two 17-year periods 1982 to 1998 and 1999 to 2015, respectively. The background colours represent the average sea surface temperature from 1999 to 2015. The difference in the main displacement of the isotherms in the two periods is illustrated by coloured arrows, with the number of kilometres being presented in the central "shift" frame. The distances in italic represents the offshore shifts of the isotherms and the distances in bold the northern shifts only.

### 4.2. Changes in the distribution of other small pelagics

Other species than both sardinella also showed significant northward distribution shifts (Fig 8): T. trecae moved regularly toward the north from 1995 to 2004 and then returned southward, so that by the end of the record they were found only south of around 24°N, the northern limit in 1995. The northern limit of the distribution of C. chrysurus was around 18°N in 1995, and progressively moved northward to be around 21°N in the most recent years, including 2015; this represents a distribution shift of more than 330 km. Brachydeuterus auritus showed a slower, but still clear trend. It was not found north of 20°N before 2000 in DFN surveys; during five years after 2000 it exceeds this latitude and can now be found to the North of the Cape Blanc. This corresponds to shift from 1995 to present of about 180 km. The distribution area of S. guachancho gradually extended northward since 1995 (Fig. 8). Its northernmost limit was south of 17°N in 1995 and expanded northwards to 20°N; this is a considerable shift of about 375 km, the highest one reported in this study after C. chrysurus. A slight northward shift in the distribution area of S. dorsalis is also observed. Like S. maderensis, some tropical species do not

show any marked shift in their distribution (Table 3; Fig. 8). This is the case with the false scad (D. rhonchus) that shows a relatively stable area of distribution. Its northward limit is found North of Dakhla (around 24°18 N). The Table 2a summarises the distribution changes of the tropical small pelagic species from 1995 to 2015. A shift distance of around 180-370 km is observed for many species, with S. guachancho, C. chrysurus and T. trecae registering the most remarkable northward extension.

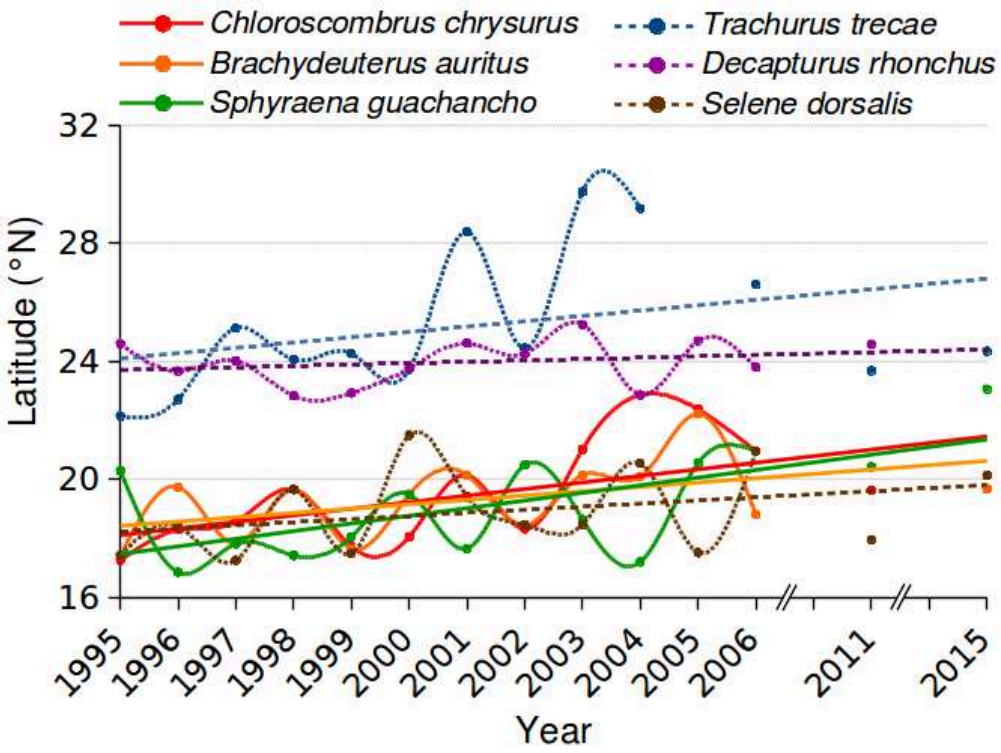



**Figure 8. Changes in the distribution limits of the pelagic stocks of several species sampled during the surveys from 1995 to 2015**, from their northernmost detected limit from scientific trawl sampling (n = 2263). Like Sardinella aurita (Fig. 5a), Trachurus trecae, Chloroscombrus chrysurus, Brachydeuterus auritus, Sphyraena guachancho and Selene dorsalis show a northward trend while for Decapterus rhonchus no marked trend is observed as for Sardinella maderensis (Fig. 5b). The linear trends statistically significant at p-value < 0.05 are marked as full line and non-significant in dotted line (Table S4).

**Table 2. (a) Mean coastal distances shifted by key small pelagic tropical species from 1995 to 2015**. Latitudinal Northern limit and respective displacements of the small pelagic tropical species from 1995 to 2015 as sampled by trawl. (b) Position (°North) of the isotherms (°C) split in two periods of 17 years (1982-1998 and 1999-2015) and the northward shift (in km, Methods) of the isotherms for the whole period and for the period covered by the acoustic survey (1995-2015).

**a)**

| Species | Mean latitudinal North limit (°N) 1995 | 2015 | Shift distance (in km) |
|---|---|---|---|
| Sardinella aurita | 26.77 | 29.17 | 267 |
| Sphyraena guachancho | 17.24 | 20.61 | 375 |
| Trachurus trecae | 23.59 | 26.61 | 335 |
| Chloroscombrus chrysurus | 17.75 | 20.73 | 332 |
| Brachydeuterus auritus | 18,28 | 19,94 | 184 |
| Selene dorsalis | 17,98 | 19,93 | 217 |
| Decapterus rhonchus | 23,72 | 24,14 | 48 |
| Sardinella maderensis | 24,10 | 24,95 | 94 |

**b)**

| Isotherm (°C) / Period | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1982-1998 | 20.5 | 20.0 | 18.5 | 16.9 | 15.0 | 13.3 |
| 1999-2015 | 23.0 | 20.5 | 19.9 | 18.4 | 17.5 | 14.9 |
| Shift 1982-2015 | 280 | 50 | 150 | 170 | 170 | 180 |
| Shift 1995-2015 | >200 | 30 | - | 50 | 20 | 40 |

**Table 3**. Species northern limit from 1995 to 2006 scientific DFN catch data adding 2011 and 2015, the significant trend (r Spearman $p < 0.05$) are marked in bold and the associated correlation coefficient in italic bold ($p < 0.10$). S_aur = Sardinella aurita ; S_mad = Sardinella maderensis ; T_tre = Trachurus trecae ; D_rho = Decapterus rhonchus ; C_chr = Chloroscombrus chrysurus ; B_aur = Brachydeuterus auritus ; S_dor = Selene dorsalis ; S_gua = Sphyraena guachancho.

| Year | S_aur | S_mad | T_tre | D_rho | B_aur | C_chr | S_dor | S_gua |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1995 | 24.60 | 24.50 | 22.15 | 24.60 | 17.43 | 17.27 | 17.43 | 20.30 |
| 1996 | 27.17 | 22.48 | 22.72 | 23.68 | 19.75 | 18.30 | 18.43 | 16.87 |
| 1997 | 28.40 | 28.02 | 25.13 | 24.02 | 17.83 | 18.58 | 17.27 | 17.83 |
| 1998 | 27.35 | 22.02 | 24.07 | 22.83 | 19.67 | 19.67 | 19.67 | 17.43 |
| 1999 | 26.42 | 26.42 | 24.27 | 22.93 | 17.67 | 17.73 | 17.50 | 18.07 |
| 2000 | 29.03 | 20.83 | 23.73 | 23.77 | 19.50 | 18.07 | 21.50 | 19.50 |
| 2001 | 27.73 | 23.83 | 28.40 | 24.62 | 20.15 | 20.15 | 19.42 | 17.67 |
| 2002 | 31.23 | 24.27 | 24.45 | 24.27 | 18.47 | 18.33 | 18.47 | 20.50 |
| 2003 | 29.03 | 26.63 | 29.75 | 25.25 | 20.15 | 21.03 | 18.48 | 18.65 |
| 2004 | 30.10 | 25.73 | 29.18 | 22.87 | 20.10 | 22.87 | 20.55 | 17.22 |
| 2005 | - | 25.08 | - | 24.70 | 22.23 | 22.38 | 17.53 | 20.57 |
| 2006 | 28.77 | 27.95 | 26.60 | 23.80 | 18.81 | 20.97 | 20.97 | 20.97 |
| 2011 | 27.38 | 21.72 | 23.69 | 24.59 | 20.43 | 19.64 | 17.96 | 20.43 |
| 2015 | 28.16 | 24.72 | 24.35 | 25.72 | 19.68 | 19.68 | 20.14 | 23.07 |
| **r** | *0.51* | 0.12 | 0.46 | 0.42 | 0.55 | 0.66 | 0.43 | 0.62 |
| ***p*-value** | ***0.07*** | 0.69 | 0.11 | 0.14 | **0.04** | **0.01** | 0.12 | **0.02** |

### 4.3. Changes in hydro-climatic conditions since twenty years

#### Examination of trends in wind speed

The analysis of the upwelling wind shows a statistically significant intensification (see Table 4) for all areas (1-3) north of Cape Blanc (20°N) during the 1990-2012 period (Fig. 6a and 9b). These trends show a distinct spatial pattern in comparison to total wind speed increase (Fig. 9a), much more spatially homogeneous over the whole region. However, this increase in upwelling wind (Fig. 6a) is not temporally uniform, with a decrease from 1994 to 1997. The Mauritanian region (area 4) is stable (Fig. 6a) without a significant trend in the upwelling wind (Table 4), while the Senegalese region shows a highly significant and regular decrease of the upwelling wind. Consequently, the Southern Morocco (area 1, 26-30°N) and the Senegalese region show strong and opposite trends (respectively positive and negative) of the upwelling wind during the last 29 years. The upwelling wind in Southern Morocco increased from 4.5 m $s^{-1}$ in 1990 to 5.5 m $s^{-1}$ after 2012 while its average value in Senegal decreased from 3.2 m $s^{-1}$ to 2.8 m $s^{-1}$ during the same period.

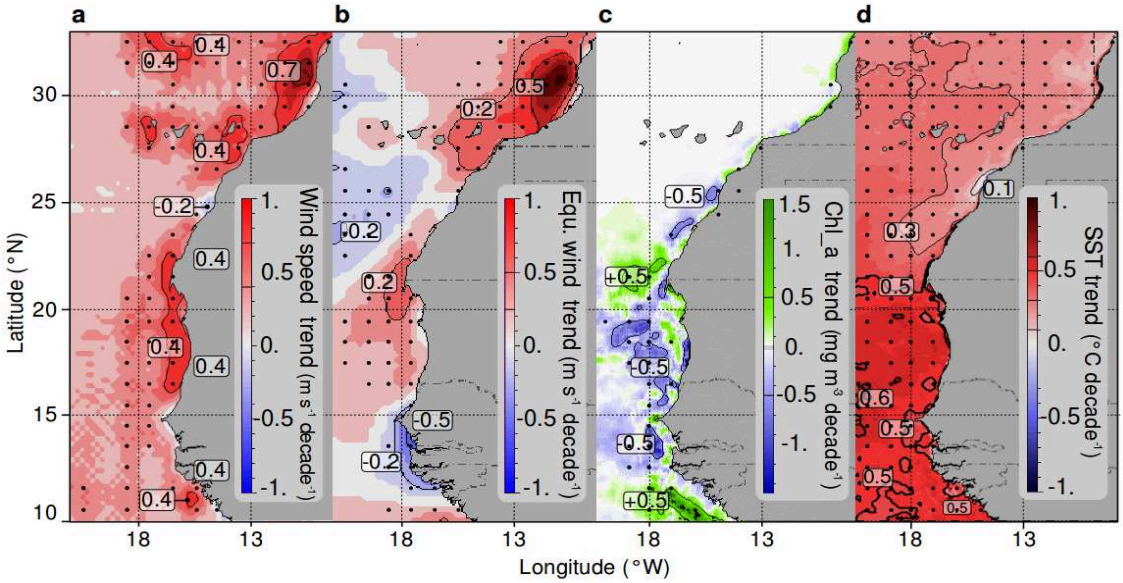



**Figure 9. Spatial trends: High changes in hydro-climatic conditions in North West Africa coastal waters.** Spatial linear trends of the wind speed (a) the equatorward wind component (b) (CCMP satellite composite data), chlorophyll-a (c) (SeaWiFS and MODIS-corrected data) and sea surface

temperature (d) (AVHRR and MODIS data) from Guinea to northern Morocco, respectively computed from 1987, 1998 and 1982 to 2015; with points (by 1° box) where the trend is significant ($p < 0.05$).

**Changes in surface chlorophyll-a**

In the whole region from 1998 to 2016, positive and negative trends in SSC (Fig. 6b and Fig. 9c) are only partly related to similar trends in the upwelling wind (Fig. 9b). None of the temporal trends (Fig. 6b) are statistically significant (Table 4), mostly because of the high inter-annual variability of SSC south of Cape Blanc.

More surprising is the absence of a trend in SSC for area 1 (southern Morocco), despite the very significant upwelling winds increase observed from 1998 in this region, except at 25°N, south of Cape Boujdour. Temporal trends in SSC north of Cape Blanc (area 2) are more complex, first increasing from 1998 to the beginning of 2002 and then decreasing from 2002 to 2006. The sign of this change as well as its timing (2001) are coherent with the change previously observed in upwelling wind speed. Area 3 (20-21°N) registers remarkable high and variable levels of SSC between 5 and 7 mg $m^{-3}$.

Further south, in Mauritania (area 4, 16-20°N), where the upwelling is strongly seasonal, the primary production remains at the highest levels of the whole Canary system (Fig. 6b), without significant trend, while the upwelling wind is slightly increasing (but not statistically significant) during the period 1988-2006 (Fig. 6a).

In the Senegalese region (12-16°N), the regular decrease of the upwelling wind from 1998, an exception in the Canary system, is associated to a non-significant but sensible decrease in primary productivity, except very locally over the continental slope (Fig. 9c).

**Trends in Sea Surface Temperature**

SST trends show a regular and homogeneous warming of the surface waters in the whole region (Fig. 6c and 9d); all trends are highly significant during the 1982-2015 period (Table 4). The warming is especially high south of Cape Blanc (areas 3 to 5) with cummulated increases between 0.5 °C and 1.5 °C in the last 34 years. This is also the only region where the warming is significant during the shorter 1993-2015 period.

**Table 4. Trend significance of the monthly time series of the environmental parameters** over the continental shelf (displayed in Fig. 3): Wind speed, Chlorophyll-a concentration and Sea Surface Temperature. Significant values are shown in bold; r: Pearson correlation coefficient to measure linear trend.

| | | r | *p*-value | r | *p*-value |
|---|---|---|---|---|---|
| WIND | | (1988-2015) | | (1993-2015) | |
| | Area 1 | **0.54** | **0.003** | 0.38 | 0.075 |
| | Area 2 | **0.48** | **0.010** | 0.40 | 0.060 |
| | Area 3 | **0.41** | **0.030** | **-0.49** | **0.016** |
| | Area 4 | 0.21 | 0.280 | **0.44** | **0.035** |
| | Area 5 | **-0.53** | **0.004** | **-0.42** | **0.044** |
| CHL *a* | | (1998-2015) | | | |
| | Area 1 | 0.07 | 0.779 | - | - |
| | Area 2 | -0.18 | 0.476 | - | - |
| | Area 3 | 0.01 | 0.978 | - | - |
| | Area 4 | -0.24 | 0.340 | - | - |
| | Area 5 | -0.18 | 0.484 | - | - |
| SST | | (1982-2015) | | (1993-2015) | |
| | Area 1 | **0.56** | **6.00E-04** | 0.25 | 0.248 |
| | Area 2 | **0.61** | **1.18E-04** | 0.33 | 0.124 |
| | Area 3 | **0.74** | **4.91E-07** | **0.40** | **0.057** |
| | Area 4 | **0.73** | **8.03E-07** | **0.43** | **0.042** |
| | Area 5 | **0.77** | **7.47E-08** | **0.46** | **0.026** |

The SST increase has been evaluated in term of northward displacement of isotherms (Fig. 7) by comparing the last 17 year period (1999-2015) with the previous one (1982-1998). The 24 °C isotherm, originaly located in front of Gambia (13°30′N) moved 180 km north of Dakar (15 °N). A similar shift of the 22 °C isotherm is observed further north from southern to Central Mauritania, while the 19 °C isotherm moves 280 km north, far beyond Cape Blanc.

The warming is not spatially uniform, with a moderate coastal SST increase in the northern part of the region (Fig. 6c and Fig. 9d), with an enhancement of the upwelling wind and a clear latitudinal split at Cape Blanc (21°N). Further south, the warming rate is the highest recorded (> 0.5°C decade$^{-1}$), with uniform warming over the continental shelf and far beyond in the upwelling transition zone. North of Cape Blanc, the warming is high outside the active part of the upwelling (0.3 °C per decade), while moderate in a coastal band of approximately 200 km, with several local minima of 0.1 and 0.2 °C per decade to the south of two major coastal upwelling cells i.e., Cape Boujdour (26 °N) and Cape Ghir (30 °N). In contrast, the minimum SST trend is observed at 26 °N and is related to a local stability in upwelling wind intensity (Fig. 6a, b).

## 5. Discussion

### An unprecedented spatial shift

The northward shift observed for S. aurita during the period 2000-2015 is consistent with the strong increase in S. aurita catches recorded in Morocco in a single decade (FAO, 2013) and doubtless forced by the exceptional warming observed south of Cape Blanc, the strongest recorded in the tropical ocean during the study period (Liao, Lu, Yan, Jiang, & Kidwell, 2015). These facts supports the increasing density of sardinella biomass observed from Cape Blanc to Dakhla (Fig. 1 and 5) after 2000 through the DFN surveys and the Moroccan small pelagic fish assessment led in 2015. The DFN scientific catch data indicate a northward shift of 270 km for S. aurita from 1995 to 2015. Like S. aurita, several other small pelagic fish species show significant northward trends in their distribution (Fig. 8; Tables 2 and 3) while others exhibit no trend. In particular, S. maderensis present no marked shift in its northern limit or the barycentre of in its acoustic-based biomass (Tables 2 and 3). Because all surveys were performed during the fourth quarter of the year, the observed shifts are unlikely to be related to an irregular timing design of the surveys. This observed shift cannot be attributed to a global increase of the stock biomasses.

The fishing activity cannot explain the distributional shifts in sardinella. Catch levels have been fairly stable since 1990 (FAO, 2013), with an average level for both sardinella species (dominated by S. aurita within the Canary system) of 300 000 tonnes per year until 2007 followed 550 000 tonnes per year between 2008 and 2011. This increase applied to all countries, apart from Mauritania that maintained relatively stable catch levels. Although these levels are not considered sustainable (FAO, 2013), they provide no evidence that fisheries alone could explain the observed distribution shifts. Latitudinal shifts in the fishery have been assessed through calculation of a monthly catch gravity centre (Zeeberg et al., 2008). However, the authors noted that the use of catch rates per vessel as an index of fish abundance can be disputed, because it also depends on catchability and financial considerations taken by the vessel captains, at least in Mauritanian waters where the fishery is mostly industrial. In our study, the abundance index used for computation of the centre of gravity is the standardized sardinella biomasses estimated from annual acoustic research surveys. Some stochasticity must be expected in the

observations from the surveys at sea, meaning that the absolute latitudinal limit of the species is not necessarily observed. The records have been made from trawls to identify all schools of pelagic fish. The officers on duty start fishing operations only when they observe significant acoustic densities of pelagic fish. Minor densities or fish inshore of the survey area have probably been overlooked (Brehmer, Guillard, Guennégan, Bigot, & Liorzou, 2006).

**Spatial considerations**

The Cape Blanc boundary at around 21°N roughly corresponds to the position of the Cape Verde Frontal Zone (Zenk, Klein, & Schroder, 1991) that occurs in November off Mauritania and separates the North and South Atlantic Central Waters in the eastern North Atlantic Subtropical Gyre (Martínez-Marrero et al., 2008). This location is until now considered to be a "faunistic limit" for many benthic (Intes & Le loeuff, 1984), planktonic (Weikert, 1982) and ichtyoplanctonic (Hamann, John, & Mittelstaedt, 1981) populations. It is also considered the northernmost distributional area for several small pelagic fishes in North-West Africa (Binet, 1988). Fish surveys now indicate several key species are moving past this boundary (Fig. 1 and Fig. 8).

The warming patterns observed appear to play a primary role in reshaping the spatial structure of pelagic fish populations, including those of S. aurita. Of interest, the distances that migratory pelagic fish shift was in the same order of magnitude as those observed for the isotherms in the region (150–300 km) since 1995 (Fig. 7; Table 2). It is likely that SST is a major environmental parameter explaining the movements of S. aurita (Sabatés, Martín, Lloret, & Raya, 2006), even though combinations of physical and ecological factors, as a continuous upwelling wind and productivity decrease to the South of Cape Blanc contribute to this change.

The trend in S. aurita biomass showed that the portion of the stock north of Cape Blanc increased from 38% to 65% from 1995 to 2015 (Fig. 10). Of note, the northern part (Fig. 6, area 1), characterized by a strong summer coastal upwelling (Benazzouz, Mordane, et al., 2014), is the region with one of the greatest increases in upwelling wind intensity over the entire Canary Current ecosystem over the last 28 years, including the period of the DFN surveys. The observed northwards shift of the S. aurita stock, as well as those of other pelagic species, will affect (decrease) their abundance south of Cape Blanc.

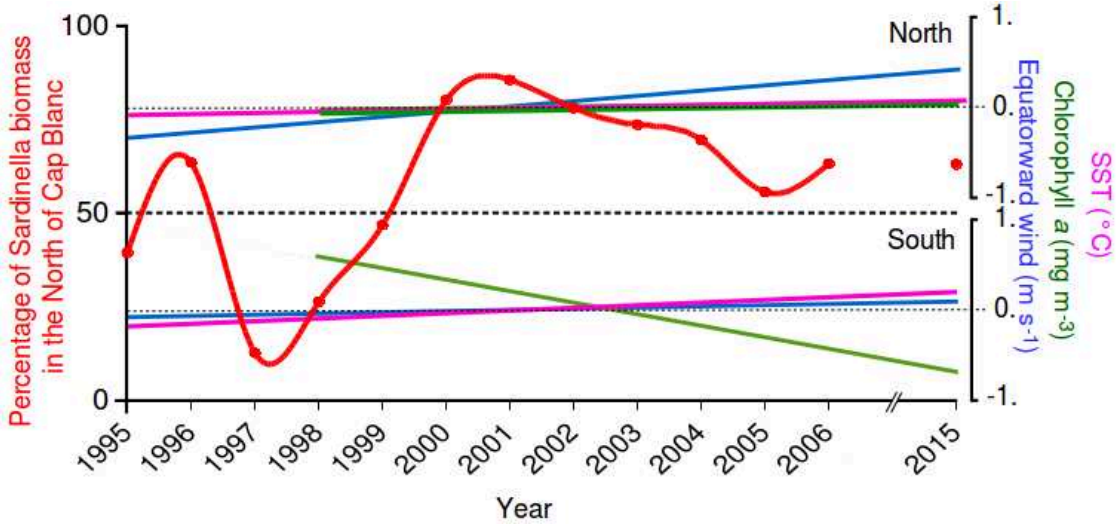



**Figure 10. Relative variation of Sardinella aurita biomass and associated environmental trends from 1995 to 2006 and 2015 in the North and South of Cape Blanc**. The Cap Blanc play the role of pivotal zone separating the region of permanent upwelling to the subtropical region of seasonal upwelling. The trend in percentage of S. aurita biomass (data from FAO, 2001[48]) situated in the north of Cape Blanc (red dotted line) showed a northward displacement

since 1995 from a mean average of the five first and last years of the time series, of 38% to up to 65%, respectively. The increase in the upwelling activity (meridian wind speed) in the north part associated to a lower warming and a stable productivity while the productivity decreases in the south benefits to the Northern part of the system (Moroccan area) and significantly decrease the abundance of S. aurita in the Southern part of the system, i.e. South of Cape Blanc.

Although the whole Canary system is particularly affected by long-term warming, the upwelling increase in the northern part of the region (North of Cape Blanc) clearly limits the coastal heating while maintaining its productivity level. Thus, it preserves better environmental conditions and a relatively stable habitat for small pelagics, including S. aurita. In contrast, in the southern part of the system there is an increase in SST increase and a decrease in planktonic productivity; thus this region is now probably a less suitable habitat for the same species.

The long term trends in this region have led to a upwelling wind north of Cape Blanc, close to 5–6 m $s^{-1}$, now fully in the optimum environmental window defined for the recruitment success of small pelagic fishes (P Cury & Roy, 1989). The greater increase in wind over the continental shelf than over the transition zone (Fig. 9a, b) is also in line with the Bakun theory of summer warming (Bakun et al., 2015).

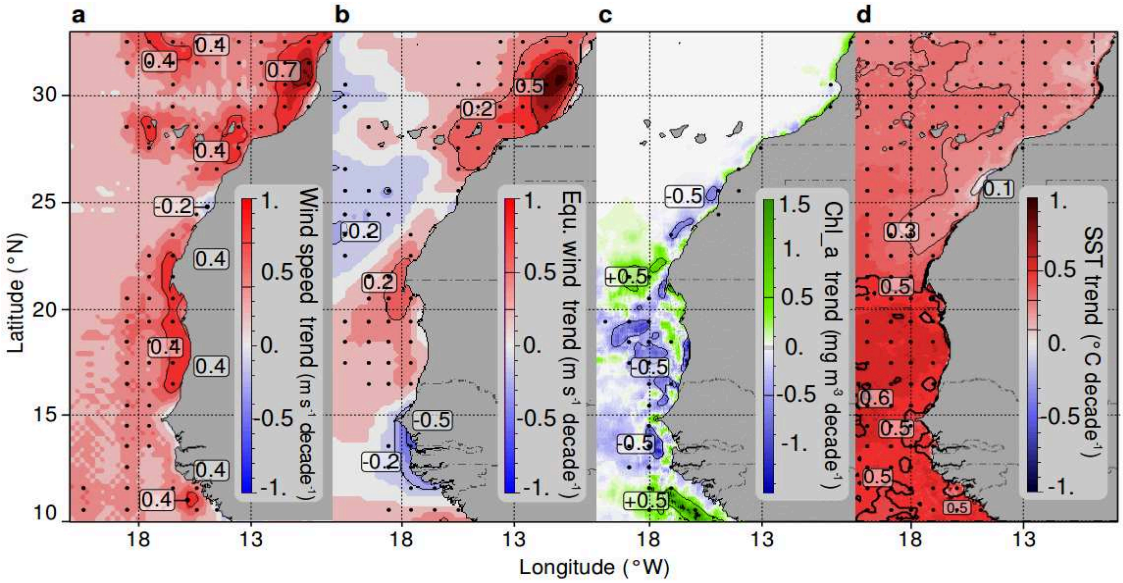



**Figure S2. Spatial trends: High changes in hydro-climatic conditions in North West Africa coastal waters.** Spatial linear trends of the wind speed (a) the equatorward wind component (b) (CCMP satellite composite data), chlorophyll-a (c) (SeaWiFS and MODIS-corrected data) and sea surface temperature (d) (AVHRR and MODIS data) from Guinea to northern Morocco, respectively computed from 1987, 1998 and 1982 to 2015; with points (by 1° box) where the trend is significant ($p < 0.05$).

### Ecological responses

The absence of a significant shift in the distribution of S. maderensis might be explained by their high physiological adaptability to environmental disturbance (Ba et al., 2016). Alternatively, while opportunistically taking advantage of any enrichment of the environment (Roy, Cury, Fontana, & Belvèze, 1989), S. aurita is more sensitive to temperature and, therefore, less adapted to strong and continuous changes in the environment.

The spatio-temporal shift in low thermal tolerance species, such as S. aurita, off Mauritania seems to be primarily controlled by thermal constraints rather than water enrichment gradients (Thiaw et al., 2017). Alternatively, the shift in these species might be related to the raising of the minimum oxygen zone (Stramma, Johnson, Sprintall, & Mohrholz, 2008), which occurs on the shelf to the south of the system. Such temperature and oxygen changes might influence the trophic relationships, leading to major changes in the composition of planktonic preys. Sardinella aurita is an opportunist feeder (Fréon, 1988), primarily feeding on phytoplankton (mainly diatoms) in offshore waters (Nieland, 1982), but also copepods, both of which are the two most abundant phytoplankton and zooplankton groups in the study area. Any change in the plankton community can disturb the whole food web (Beaugrand & Reid, 2003). However, the observed shift in S. aurita beyond 26 °N appears not be related to the average level of primary production, as there was no significant increase of SSC to the north of Cape Blanc (Table S3). The relative spatial coherency observed between upwelling wind trends and planktonic productivity (Fig. 9b, c) underlies complex bio-chemical processes and differences in planktonic compositions that also probably varies seasonally.

Like S. aurita, other species showed significant northward distribution trends (Fig. 5) in DFN data as well as in Moroccan acoustic surveys, which have detected in 2015 exceptional high densities of small pelagic fish off Casablanca (33.5° N) (Mamza, El Ayoubi, & Araabab, 2015). The stock of T. trecae, known to extend southward beyond the DFN survey area for the whole period as evidenced by sea surveys (Fall, Fall, Thiam, & Sarre, 2013), is regularly moving northward. Other species as C. chrysurus, B. auritus and S. guachancho are now commonly observed north of 20°N since 2003.

## 6. Conclusion

Considered as a natural ecological boundary for many species (Binet, 1988), the Cape Blanc is more and more often crossed in recent years by tropical species, such as C. chrysurus, B. auritus, S. guachancho and S. dorsalis. The moderate warming north of Cape Blanc, specially over the shelf could have an important consequence in reshaping the spatial structure of populations of pelagic fish, such as S. aurita by reducing its preferred habitat.

This reshaping in the distribution of S. aurita, north and south of Cape Blanc is important because this species of low commercial value provides a key source of proteins for human populations in the sub-region, where fish consumption per capita is high and is particularly well included in their diet. Consequently, any shift in the distribution of this stock might induce significant economic and social instabilities. In Mauritania and south Morocco, fishing activity constitutes a significant part of the gross domestic product, particularly as major investments have been made in constructing fish meal factories (Corten, Braham, & Sadegh, 2017) targeting this species. Finally, for the whole sub-region, small pelagic fish regulate the trophic dynamics of the upwelling ecosystem (Cury, Bakun, Crawford, Jarre, & Quinones, 2000); consequently, any change in their abundance might disturb the whole food web, triggering unknown changes in biomass production and species composition, which, in turn, might impact the whole fisheries sector.

The observed shift in the distribution of this species provides an early alert on its future availability and potential consequences for the food security of millions citizens in West Africa. This is particularly important in the context of the recurrent overexploitation of the stock and the increasing number of fish meal factories being constructed that target this species in the sub-region.

## 7. Acknowledgements

The data analysis was done inside the AWA project funded by IRD and the BMBF (grant 01DG12073E), www.awa-project.org (SRFC: Sub Regional Fisheries Commission) and the Preface project funded by the European Commission's Seventh Framework Program (2007-2013) under Grant Agreement number 603521, https://preface.b.uib.no/. The data for this study was collected through the EAF-Nansen project, www.eaf-nansen.org a partnership between FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nation), www.fao.org, Norad (Norwegian Agency for Development Cooperation), www.norad.no, and the Institute of Marine Research (IMR), in Norway. The fisheries surveys were conducted in close collaboration with the coastal countries in the region and in later years through "the Canary Current Large Marine Ecosystem project". The authors are grateful to vessel crew and local hosting institution. We thank several contributors for their help particularly Dr Reidar Toresen (Norway), Dr Najib Charouki (INRH, Morocco) and Pierre Lopes (IRD, France).

**References** Voir paragraphe références de la these.

### 3.3. Déplacement du barycentre des biomasses de sardinelles depuis 1995.

La Figure 3.3-1 illustre autrement les déplacements du barycentre des biomasses des deux sardinnelles depuis 1995. Les décalages opérés y sont visibles avec une nette remontée pour S.aurita.

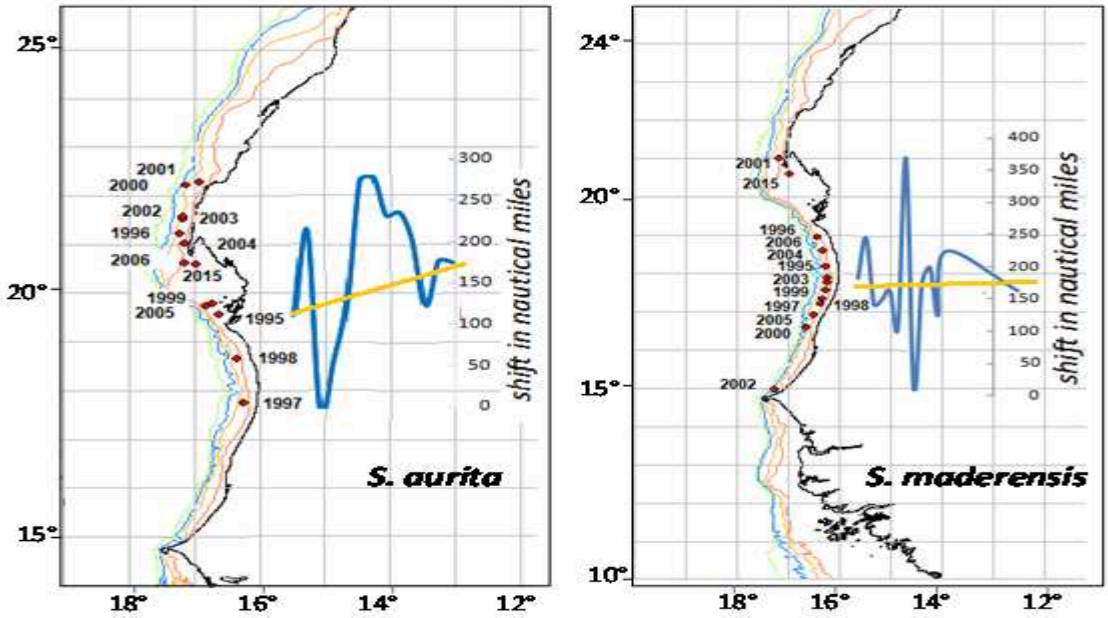



Figure 3.3-1 Shifts des barycentres de 1995 à 2015.

Le centre de la gravité peut se retrouver sur terre (Woillez et al, 2007). Pour une interprétation plus facile, l'effet de l'axe des ordonnées qui peut mettre le barycentre sur la terre avait été corrigé pour que l'emplacement apparaisse sur la côte.

### 3.4. Les observations supplémentaires du décalage latitudinal de la sardinelle ronde

Le décalage latitudinal vers le nord du barycentre de la biomasse et de la limite extrême nord de la sardinelle ronde est également visible avec d'autres études. Les comportements des pêcheurs sénégalais changent et indiquent qu'ils vont de plus en plus vers le nord. Ceci est aussi

visible grâce à d'autres éléments présentés ci-dessous, liés à l'exploitation dans la sous région ou par des résultats de campagnes acoustiques marocaines.

### 3.4.1. Résultats des campagnes acoustiques du navire marocain

La campagne d'évaluation acoustique des ressources des petits pélagiques effectuée dans l'Atlantique Nord depuis Cap Spartel jusqu'à Cap Cantin effectuée à l'aide du navire marocain R.V. ''Al Amir Moulay Abdallah'' en septembre 2015 a revélé des détections exceptionelles de sardinelles jusqu'à Casablanca comme le montre les cartes suivantes extraites du rapport de mission (Figure 3.4.1-1).

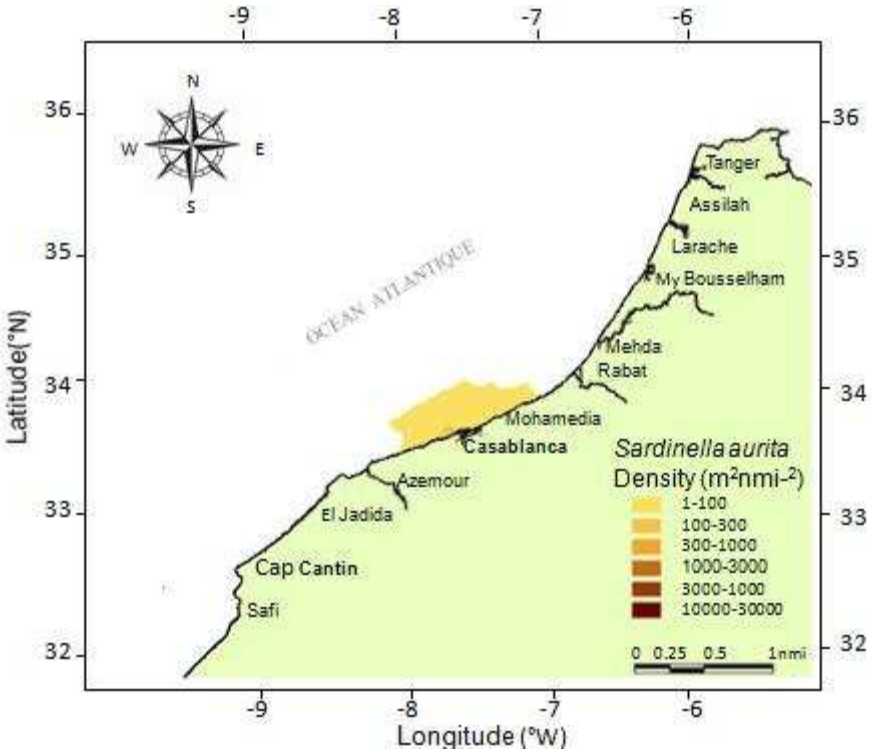



Figure 3.4.1-1 Carte de distribution des sardinelles durant la campagne d'évaluation acoustique du navire marocain R.V. ''Al Amir Moulay Abdallah'' en septembre 2015.

### 3.4.2. Evolution des captures de sardinelles de la flotte russe au Maroc :

Dans la zone C située au nord du Cap Blanc, les sardinelles sont exploitées par une flottille marocaine de senneurs côtiers et par des chalutiers RSW (refrigerated water tank). Elles sont également exploitées par des chalutiers industriels de la Fédération de Russie et de l'Union européenne. Les captures de S.aurita par les flottes russes et ukrainiennes (Figure 3.4.2-1) ont significativement augmenté durant la derniére décade (FAO, 2015) selon les données disponibles au niveau du « Small Pelagic Working Group in North West Africa ». Ces évolutions dans les prises pourraient étre étroitement liées au shift de la sardinelle ronde notée dans cette étude.

Figure 3.4.2-1 Captures des flottes russes et ukrainiennes aux Maroc depuis 2005

### 3.4.3. Changement de comportement des pêcheurs sénégalais

De plus en plus les pêcheurs sénégalais étendent leur zone de pêche vers le nord pour augmenter la quantité de prises. S'il leur est difficile d'accéder à la zone marocaine compte tenu de l'éloignement, ils vont de plus en plus s'aventurer dans les eaux mauritaniennes.

Le rendement de la pêche pour la sardinelle ronde au cours des trente dernières années (Figure 3.4.3-1) montre une période de forte abondance avant 1995 suivie d'une chute importante. La situation difficile vécue au-delà de 1995 a motivé le Sénégal à signer des accords de pêche avec la Mauritanie (en 2004). Les captures de la sardinelle ronde par les pêcheurs sénégalais en Mauritanie ont alors eu pour effet d'augmenter fortement les rendements de pêche (CPUE) à des niveaux jamais atteints depuis plusieurs décennies. La diminution importante de l'abondance de sardinelle ronde au Sénégal comparée au niveau observé dans la même période dans des eaux mauritaniennes pourrait être partiellement liée au changement remarqué dans ce travail dans la distribution de la sardinelle ronde.

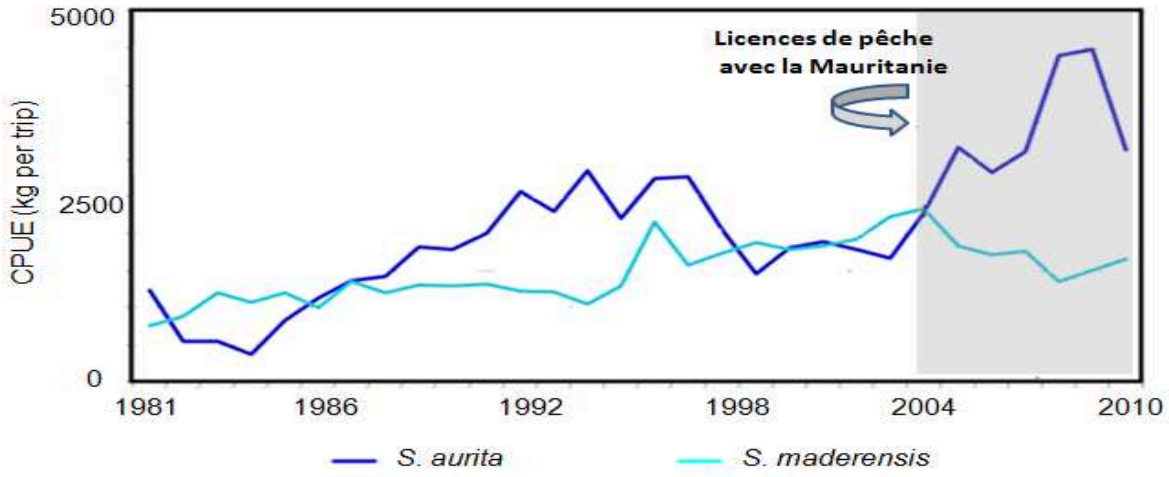



Figure 3.4.3-1 Evolution des rendements de pêche (cpue) des sardinelles dans toute la zone.

### 3.5. Conclusions

Les données utilisées dans ce travail mettent en évidence des perturbations importantes dans la distribution des espèces de petits pélagiques de la région avec en particulier une translation significative du stock de S. aurita vers le nord. L'environnement dans lequel évoluent ces ressources pélagiques est marqué par des éléments très caractéristiques de la région. Premièrement l'existence d'un upwelling sur toute la région même si il n'est permanent qu'au sud du Maroc. La deuxième caractéristique est lié à des phénomènes plus isolés tels que la salinisation des eaux sur plusieurs stations côtières du Sénégal. La troisième, et non la moins importante, est le réchauffement des eaux de surface constaté au niveau régional depuis plusieurs décennies. Ce réchauffement constaté s'affiche comme le plus important parmi les régions tropicales du globe depuis 1982 avec un déplacement notable des isothermes vers le nord depuis les années 80'. L'analyse des paramètres environnementaux à l'aide des données des capteurs satellitaires, démontrant ce réchauffement au niveau régional,fournit comme explication majeure les translations opérées par la sardinelle ronde,. La S. aurita est connue pour sa sensibilité à la température et son besoin d'aller chercher l'habitat optimal qui lui convient (Cury et Roy, 1989), contrairement à la sardinelle plate qui a la capacité de s'adapter aux divers changements pouvant intervenir dans son environnement. L'activité de pêche à elle seule ne peut expliquer de tels déplacements latitudinaux de certains stocks de petits pélagiques et de celui de S. aurita en particulier dans la région. Les données de la FAO montent que les niveaux des captures dans la région étaient globalement stables avec une moyenne pour les deux sardinelles (dominées par la S. aurita dans le système des Canaries) d'environ 300 000 tonnes par année jusqu'en 2007. Il faut cependant remarquéun pic de capture jusqu'à environ 550 000 tonnes par an entre 2008 et 2011. Ce pic a concerné tous les pays de la région sauf pour la zone Mauritanienne qui montre une stabilité relative. Même si ces captures ne sont pas considérées soutenables par le groupe COPACE, elles ne peuvent expliquer à elles seules ce déplacement observé de la sardinelle ronde vers le nord. Les investigations que nous avons alors entreprises ici en direction de l'environnement excluent un déplacement de conditions favorables de la production primaire vers le nord, celle-ci ayant été relativement stable dans l'ensemble des 5 zones étudiées même si la composante méridionale du vent a affiché des niveaux faibles au Sénégal et très importants en Mauritanie et au Maroc.

Cette nouvelle configuration de la distribution de S. aurita ainsi que de plusieurs autres espèces clés de la chaine alimentaire au sud du Système des Canaries affecte inévitablement l'abondance au sud du système. Ces changements dans la distribution bénéficient essentiellement aux pays du Nord tel que le Maroc. Entre le Cap Blanc et le Cap Boujador, la sardinelle est exploitée par une flotte de chalutiers russes et ukrainiens et les données disponibles au sein du Groupe de Travail sur les Petits Pélagiques de la FAO révèlent une hausse graduelle de la capture de ces flottes depuis une décennie, hausse potentiellement imputable au décalage septentrional de la ressource décalages observés dans ce travail. Cette reconfiguration pourrait aussi s'accompagner d'un repeuplement du stock par d'autres espèces telles les Sherbos (venant de la Guinée) comme cela a déjà été observé pour des espèces demersales (Caveriviére et Thiam, 1994). Néanmoins au Sénégal, même si les processus hydroclimatiques actuels pourraient conduire à un repeuplement par d'autres espèces du sud, le déplacement spécifique de S. aurita doit alerter. Cette espèce constituant avec la S. maderensis la principale source de protéines pour les populations au sud de la région, une perturbation de ce stock pourrait entrainer une instabilité significative dans la chaine alimentaire. Ces changements observés pour S. aurita représentent un signal fort sur sa disponibilité future et les conséquences

pendantes sur la sécurité alimentaire de millions de citoyens africains, particulièrement dans un contexte de surexploitation récurrente du stock et de la mise en œuvre croissante d'usines de farine de poisson visant cette espèce en Mauritanie particulièrement.

# Chapitre 4

# Conclusion générale, discussions et perspectives d'études

## 4. Conclusion générale, discussions et perspectives d'études

### 4.1. Rappel d'éléments de contexte

Secteur stratégique pour le développement et la lutte contre la pauvreté en Afrique de l'Ouest, la pêche constitue un élément essentiel pour la croissance économique et l'équilibre de la balance des paiements, en contribuant fortement à la sécurité alimentaire, à la création d'emplois et à l'entrée de devises étrangères par le biais des exportations et des accords de pêche. Au Sénégal en particulier, les recettes proviennent essentiellement de la pêche et les ressources de petits poissons pélagiques sont au premier plan pour la satisfaction des besoins en protéines animales pour les populations (e.g. Déme, 2016). Ceci explique l'intérêt que portent les autorités locales à la gestion de ces ressources et leur suivi dans le cadre du Système des Courants des Canaries où elles évoluent en effectuant des migrations saisonnières. Une bonne connaissance de leur dynamique et leur distribution spatiale est d'un enjeu majeur pour arriver à les exploiter judicieusement, les gérer, voire anticiper sur leurs potentielles perturbations. **Cette problématique constitue la quintessence de cette thèse**.

### 4.2. Conclusion générale, discussions et apports de cette thèse

Un écosystème tend à évoluer naturellement vers un état d'équilibre, tout en étant capable d'évolution et d'adaptation au contexte écologique et abiotique. Comprendre l'organisation et le fonctionnement du réseau trophique est donc essentiel pour comprendre un écosystème. Pour trouver des réponses à la problématique posée, il nous a fallu revisiter d'abord le contexte bioécologique et l'habitat de ces petits poissons pélagiques. **Nous avons ainsi identifié à ce niveau, les éléments caractéristiques de l'environnement des petits pélagiques de la région** aussi bien au niveau continental qu'estuarien. Parmi ceux-ci, la présence de zones d'upwelling permanent ou saisonnier qui rythment la dynamique des petits pélagiques, avec des remontées d'eaux froides profondes riches en sels minéraux en permanence au-dessus de 20° Nord (Mauritanie) et saisonnièrement au sud de cette latitude (Sénégal). Ces upwellings sont liés aux régimes de vent qui ont été globalement décroissants dans la région depuis plusieurs décennies, **comme nous avons pu le confirmer à partir des extractions satellitaires que nous avons menées dans cette thèse**. Des éléments caractéristiques plus localisées sont observés comme au Sénégal, un processus de salinisation progressif de l'eau de mer constaté depuis 1970 d'après les données des stations côtières relevées par le CRODT mais aussi des apports terrigènes importants venant de fleuves (le Sénégal, la Gambie, le Saloum et la Casamance) drainant vers la mer des quantités relativement importantes d'eaux fluviales et jouant souvent un rôle notable dans l'alimentation et la survie de juvéniles de poissons marins (Diouf, 1996). Mais de loin l'élément le plus marquant dans la région durant les dernières décennies aura été sans conteste la montée des températures de surface des eaux, constatée dans la région et surtout au Sud du Cap Blanc (sans négliger bien entendu l'augmentation constate et récurrente de l'effort de pêche). A l'échelle mondiale, **le réchauffement constaté dans nos investigations se trouve être le plus important parmi les régions tropicales du globe depuis 1982** avec un déplacement notable des isothermes vers le nord depuis les années 1980.

Ce contexte bioécologique bien dressé en premier abord, il nous a fallu ensuite, toujours pour répondre à la problématique posée, diagnostiquer l'outil pour l'évaluation des ressources de petits pélagiques par rapport à son utilisation par les experts de la région. Bien que des efforts

notables d'organisation aient été réalisés à ce niveau, des insuffisances subsistent encore dans les résultats obtenus**, ce qui nous a conduit dans cette thèse à apporter notre modeste contribution pour analyser et proposer des recommandations sur l'une de ces insuffisances**, relative à la couverture des stocks ciblés. En effet depuis les années 70, les petits pélagiques sont suivis au niveau régional en s'appuyant sur les méthodes hydroacoustiques d'évaluation de stocks. La région a ainsi été le siège de nombreuses campagnes de prospection acoustique depuis plusieurs décennies, depuis les campagnes du RV Idrissi (1973) au Maroc, du RV Almoravide (1970) en Mauritanie et du RV Capricorne (1973) au Sénégal, la série la plus longue et la plus régulière (1995-2006, 2011, 2012, 2015) ayant été celles du navire norvégien RV Fridtjof Nansen affrété par la FAO organe des nations unies. Ces campagnes ont permis de fournir aux autorités locales une base scientifique solide en matière de prise de décision à des fins d'aménagement des pêcheries pélagiques mais aussi afin de mettre à disposition des expertises fiables lors des négociations d'accords de pêche avec les partenaires étrangers. Depuis l'année 2000, des efforts d'organisation ont été entamés avec l'aide de la FAO et c'est ainsi que les évaluations acoustiques ont été encadrées au niveau régional à travers un « Acoustic Planning Group » dont l'objectif était de trouver ensemble des réponses aux nombreux défis que pose l'utilisation de l'outil acoustique. Ce groupe devrait être relancé dans le nouveau plan stratégique de la FAO dans la mise en œuvre du nouveau projet Nansen (2017-2020).

Parmi les défis auxquels j'ai participé à trouver des solutions dans le cadre de ce « Acoustic Planning Group », et que je souhaite mentionner dans les conclusions de ce travail, se trouvent les tentatives de lever les incertitudes sur les valeurs de TS (Target Strength) utilisées dans la région. En effet, à défaut de valeur plus pertinente pour actualiser la valeur de la constante $b_{20}$ de l'équation TS= 20 log L + $b_{20}$ (MacLennan & Simmonds, 1992), la valeur $b_{20=}$ - 71.9 dB (Foote, 1987) correspondant à celle du hareng (Clupea harengus) est utilisée dans la région pour les petits pélagiques. Ensemble avec les collègues acousticiens de la région, **nous avons tenté en 2007 en Mauritanie d'actualiser le $b_{20}$ pour la sardinelle ronde** mais la valeur $b_{20}$ = - 67.4 dB trouvée à 38 kHz n'a pas été validée compte tenu de certaines limitations dont des conditions de mer défavorables. Les mêmes tentatives ont été effectuées par l'INRH en 2015 où une valeur de $b_{20}$ = -66.2 dB à 38 kHz a été trouvée pour S. aurita. Il aurait été important durant cette importante étude d'associer les collègues de la sous-région comme en 2007 pour arriver à un consensus sur la validation et l'adoption de ces résultats pour le compte global de toute la région.

Un autre défi à relever pour l'amélioration des résultats de campagne d'évaluation acoustique des petits pélagiques a été de réduire la subjectivité liée à l'interprétation des échogrammes et à l'allocation des valeurs $S_A$ aux différentes espèces sur la base des résultats de pêche mais aussi la forme des échogrammes quand l'échantillonnage biologique n'est pas disponible. Se basant alors sur les études menées en Angola par Lawson (2001) et en Afrique du Sud par Velho (2006) montrant la possibilité d'identifier certaines espèces à partir de leurs descripteurs statistiques, j'ai mené avec l'équipe marocaine une collecte d'échogrammes typiques des espèces cibles durant près de deux mois à bord du DFN (du Sénégal au Maroc), **collecte ayant abouti à une note technique importante pour l'identification de certaines espèces (Annexe 3)** Une Analyse en Composante Principale (ACP) sur les descripteurs collectés pour chaque espèce cible avec le logiciel Echoview a permis de tirer des corrélations entre les paramètres extraits et les espèces, et de constater que les bancs des petits pélagiques sont plus marqués le jour que la nuit, certainement à cause d'un comportement grégaire de ces espèces durant le jour ce qui

rejoint les observations faites par Brehmer et al (2007). Cette caractéristique notable implique pour la région de privilégier les interprétations durant le jour pour mieux dissocier les espèces cibles. L'étude a révélé également que la sardine et les sardinelles sont très souvent identifiables puisque corrélées à des valeurs sA plus importantes par rapport aux autres espèces. Un résultat de cette étude très fréquemment utilisé au Sénégal est celui relatif au chinchard noir (Trachurus trecae) très bien corrélé au « kurtosis » et au « skewness » qui illustrent d'une manière imagée la platitude et l'asymétrie de la distribution observée sur l'échogramme, donc souvent assez aisé à identifier visuellement (i.e. echotrace (Petitgas et Levenez, 1996) sur l'écran.

Enfin, parmi les défis pour améliorer les résultats dans la région, se pose la question de la représentativité des campagnes de prospection acoustique par rapport aux stocks ciblés. **Ce travail de thèse contribue à y répondre pour la zone sénégalaise en montrant que les campagnes classiques d'échointégration en prospection de type radiale inter-radiale parallèle à la côte fournissent des évaluations représentatives de la couverture spécifique de Sardinella aurita.** En effet, les incertitudes sur la biomasse estimée des espèces lors des campagnes augmentent avec la proportion du stock présente dans les aires non couvertes par les navires de recherche. Sur le plateau sénégambien (Sénégal et Gambie), la zone sud présente une part importante de petits fonds (< 10 m) représentant 20 % (1500 nmi²) du plateau continental et non couverte par les navires acoustiques conventionnels. Sur la base de 22 campagnes scientifiques du DFN compilées depuis 1981 et complétées par des études antérieures au niveau des estuaires, **nous avons pu montrer que les campagnes classiques couvrent raisonnablement le stock de S. aurita**. Par contre, d'autres types de campagnes ou outils sont nécessaires pour prendre en compte totalement les stocks de S. maderensis qui est d'un intérêt majeur en Sénégambie, et de deux autres espèces de petits pélagiques i.e. de l'éthmalose (Ethmalosa fimbriata) et de Ilisa africana. Pour le cas spécifique de S. maderensis, la proportion du stock non couverte par les campagnes acoustiques varie toutefois avec la saisonnalité. En effet, des études antérieures dans les estuaires montrent une baisse de l'abondance des sardinelles à la fin octobre, durant la période des campagnes du DFN en Sénégambie (traitées dans le cadre du présent travail), ainsi qu'à la fin de la saison hivernale (Albaret et al 2004, Guillard et al 2004) mais fréquence de détection plus élevée des bancs de poissons en février dans la frange côtière (Guillard and Lebourges 1997). Par ailleurs, ces estuaires sont principalement des nurseries abritant surtout des juvéniles (Albaret et al 2004), dont la biomasse n'est pas prise en compte dans les estimations des campagnes acoustiques parce que constituée d'éléments immatures. Une dernière considération, pouvant atténuer le biais causé par l'impossibilité pour les grands navires, pour des raisons de sécurité maritime principalement, de prospecter ces petits fonds, est la réduction de l'habitat dans ces zones à profondeur réduite où le volume d'eau disponible est faible. Toutefois la densité de S. maderensis semble augmenter dans ces fonds selon les tendances observées des valeurs $S_A$ (nmi² $nmi^{-2}$) de la campagne du navire Itaf Dème de 2007. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour déterminer la part de biomasse de S. maderensis ignorée par les campagnes acoustiques.

Une fois l'habitat et la bio-écologie des petits pélagiques mieux cernés, et sachant que notre étude montre la bonne représentativité des évaluations de stock menées sur le cas spécifique de S aurita au Sénégal, nous avons tenté dans ce travail de thèse, toujours pour répondre à la problématique posée au départ, d'identifier les changements intervenus à l'échelle régionale dans la distribution des petits pélagiques ainsi que leurs causes probables dans le contexte du

réchauffement marqué de cet habitat mis en évidence au cours de ces dernières années sur une large part de son étendue. En effet, **L'analyse des données in situ,**, exceptionnelles du point de vue spatiotemporel (de Cap Roxo au Sénégal à Cap Cantin au Maroc, et de 1995 à 2015) collectées à travers les campagnes du DFN, **nous ont permis de mettre en évidence des changements importants dans la distribution des espèces de petits pélagiques de la région avec en particulier un déplacement significatif du stock de S. aurita vers le nord.** Ce travail montre aussi, qu'en plus de S aurita, les distributions de plusieurs autres espèces cibles de la région tendent aussi à remonter au-delà du Cap Blanc dont Trachurus trecae, Chloroscombrus chrysurus, Brachydeuterus auritus, Sphyraena guachancho et Selene dorsalis tandis que Sardinella maderensis et Decapterus rhonchus ont montré une relative stabilité de leur distribution au cours des deux dernières décennies. Le Cap Blanc, sépare la région d'alternance nord et la région subtropicale (Berrit, 1973, Benazzouz et al, 2014). C'est une limite faunistique pour les peuplements benthiques (Intès et Le Loeuff, 1984), planctoniques (Weikert, 1982) et ichtyo-planctoniques (Haman et al., 1981). Pour plusieurs espèces pélagiques en Afrique du Nord, la limite extrême nord de leur distribution se trouve autour de Cap Blanc (Binet, 1988). Les données in situ utilisées dans ce travail de thèse montrent que plusieurs espèces cibles dépassent maintenant cette limite ou frontière écologique. Même si les données utilisées dans ce travail présentent quelques insuffisances dont les gaps notés sur plusieurs années après 2006, elles ont l'avantage d'être très consistantes et régulières dans le temps (méthodologie et outil identiques et campagne toujours réalisées en novembre), avec le même navire (DFN) et le même protocole d'échantillonnage, afin de rendre les résultats comparables d'une année à l'autre. Cette consistance dans le temps permet par ailleurs de ne pas attribuer les décalages observés sur la ressource à des variations saisonnières dans la distribution des espèces.

**L'analyse des paramètres environnementaux à l'aide des données issues des capteurs satellitaires nous ont fourni comme explication majeure des déplacements opérés par la sardinelle ronde, le réchauffement au niveau régional déjà constaté dans la région**. La S. aurita est connue pour sa sensibilité à la température et son besoin d'aller chercher l'habitat optimal qui lui convient (Cury et Roy, 1989), contrairement à la sardinelle plate qui a la capacité de s'adapter aux divers changements pouvant intervenir dans son environnement (Ba et al 2016). L'activité de pêche à elle seule ne peut pas expliquer de tels déplacements latitudinaux de certains stocks de petits pélagiques et de celui de S. aurita en particulier dans la région. Les données disponibles au niveau de la FAO montent que les niveaux des captures dans la région ont été globalement stables dans leur ensemble, i.e. sur l'intégralité du stock, avec une moyenne pour les deux sardinelles (dominées par la S. aurita dans le système des Canaries) se situant autour de 300 000 tonnes par année jusqu'en 2007, où une hausse jusqu'à environ 550 000 tonnes par an entre 2008 et 2011 a été observée. Cette hausse a concerné tous les pays de la région exceptée une relative stabilité en Mauritanie. Même si ces captures dépassent les maximums considérés soutenables par le groupe COPACE, elles ne peuvent expliquer à elles seules ce déplacement observé de la sardinelle ronde vers le nord. Les investigations que nous avons alors entreprises ici en direction de l'environnement excluent également un déplacement des conditions favorables à la production primaire vers le nord, celle-ci ayant été relativement stable (tendance non significative) dans l'ensemble des cinq zones étudiées dans nos analyses et composant la région nord-ouest africaine, même si la composante méridionale du vent (moteur de l'upwelling) a affiché des niveaux faibles au Sénégal et très importants en Mauritanie et au Maroc. On peut noter une légère augmentation de la production primaire au Nord tel que reflétée par la concentration en chlorophylle 'a' mais les niveaux de production restent tout de même plus

élevés au Sud en affichant une tendance (non significative) à la baisse. Plusieurs signes supplémentaires ont confirmé dans cette étude le décalage latitudinal vers le nord du barycentre de la biomasse et de la limite extrême nord de la sardinelle ronde. Parmi ces signes, on peut relever le comportement des pêcheurs sénégalais qui sentent de plus en plus le besoin d'aller pêcher au nord en signant des licences avec la Mauritanie. Un autre signe est fourni par l'analyse descampagnes acoustiques marocaines qui révèlent des détections exceptionnelles de sardinelles jusqu'à Casablanca durant leurs récentes campagnes (Mamza et al 2015). Enfin, les captures de S. aurita par les flottes russes et ukrainiennes en zone marocaine, qui ont significativement augmenté durant la dernière décade (FAO, 2015) selon les données disponibles au niveau du « Small Pelagic Working Group in North West Africa », renforcent aussi cette tendance.

Cette nouvelle configuration de la distribution de S. aurita ainsi que de plusieurs autres espèces clés de la chaine alimentaire au sud du Système des Canaries affecte inévitablement l'abondance au sud du système, son organisation et donc son fonctionnement. Ces changements dans la distribution profitent essentiellement aux pays du Nord tel que le Maroc. Cette reconfiguration pourrait aussi s'accompagner d'un repeuplement par des espèces du stock de Sherbo (venant de la Guinée) comme cela a été le cas dans le passé pour des espèces démersales (Caveriviére et Thiam, 1994). Néanmoins au Sénégal, même si les processus hydroclimatiques actuels pourraient conduire à un repeuplement par d'autres espèces du sud, le shift spécifique de S. aurita doit alerter, cette espèce constituant avec la S. maderensis la principale source de protéines pour les populations au sud de la région. Une diminution de ce stock peut entrainer une instabilité significative dans la chaine alimentaire. Ces changements observés pour S. aurita représentent un signal fort sur sa disponibilité future et sur les conséquences en terme de sécurité alimentaire de millions de citoyens africains, particulièrement dans un contexte de surexploitation récurrente du stock et de la mise en œuvre croissante d'usines de farine de poisson visant cette espèce en Mauritanie particulièrement.

L'impact des changements climatiques sur les ressources halieutiques est d'un intérêt majeur pour nos régions et préoccupent ainsi les gouvernants. Les projets d'adaptation au changement climatique concernant le milieu littoral/marin ont concentré l'attention sur les impacts visibles tels que l'érosion côtière, mais ont pour la plupart ignoré les impacts critiques sur la pêche. Le secteur de la pêche, au Sénégal tout particulieèrement, est essentiel pour la sécurité alimentaire. Les ressources pélagiques constituent la principale source de protéine animale et représente un des leviers moteurs pour assurer l'atteinte des objectifs initiés au niveau national dans le cadre du Plan Sénégal Emergent (PSE) et des Objectifs de Développement Durables (ODD) au niveau international notamment le ODD14. Dans ce travail, nous avons mis à contribution des données in situ les plus vastes au niveau régional, tant du point de vue spatial que temporel. Ces séries temporelles uniques à la méso-échelle, aussi bien sur la ressource (données acoustiques) que sur l'environnement (données de télédétection spatiale), nous ont fourni ici une base solide pour lancer un signal d'alerte précoce dans le changement de la distribution des principaux stocks de petits pélagiques qui au regard de notre étude semble se produire dans la sous-région.

## 4.3. Perspectives d'étude sur la variabilité du micronecton

Au cours de nos travaux nous avons réussi à compiler et analyser un grand nombre de données de campagnes scientifiques en nous focalisant sur l'analyse des ressources exploitées de petits poissons pélagiques. Notre perspective logique est de coupler ces analyses avec des analyses de données acoustiques centrées sur les proies des petits pélagiques. Ce chapitre vise à définir les travaux à effectuer pour réaliser ce couplage afin de comparer les résultats obtenus dans cette thèse avec la distribution du micronecton dans la région. Ce travail est réalisé en utilisant les outils disponibles au sein de l'IRD de Brest (France), et tout particulièrement l'outil « Matecho » de traitement des données acoustiques (Perrot et al, soumis) dont nous avons contribué au développement au cours de voyages d'étude en France.

### 4.3.1. Introduction : Les couches diffusantes

Une part des organismes marins forment dans les océans à diverses profondeurs des agrégations en couches qui réfléchissent les ondes ultrasonores et se caractérisent sur l'échogramme d'un échosondeur sous forme de couches diffusantes (Figure 4.3.1-1). Ces couches diffusantes ont été observées dans les océans à travers le monde (Remond, 2015).

La composition spécifique exacte d'une couche diffusante est très difficile à déterminer. Il y a une grande diversité d'espèces mélangées et une large gamme de tailles en présence, il est donc essentiel de disposer d'une gamme de fréquences la plus large possible pour étudier la composition spécifique des couches diffusantes (Lawson et al. 2004). Aux fréquences utilisées couramment en acoustique halieutique, la détection porte essentiellement sur le macrozooplancton et les poissons méso-pélagiques, bien que certaines études aient montré que le phytoplancton est aussi rétrodiffusant (Dekshenieks et al 2001, Cheriton et al 2007).

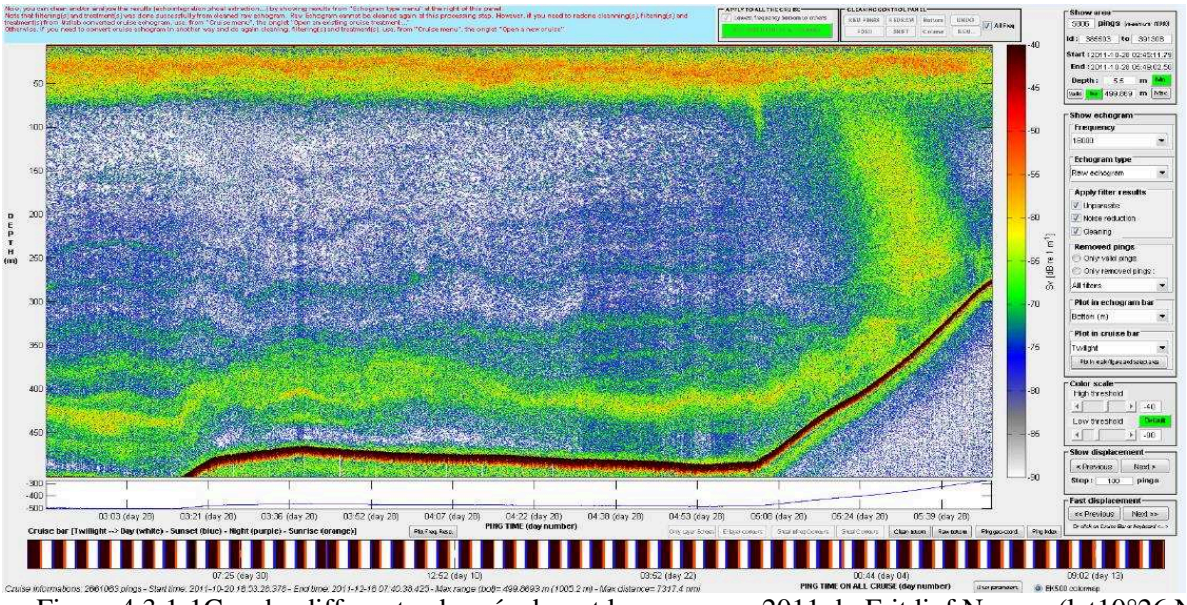



Figure 4.3.1-1Couche diffusante obervée durant la campagne 2011 du Fritdjof Nansen (lat10°26 N)

Dans le cadre de ce travail, plusieurs campagnes du RV Fridtjof Nansen ont été analysées pour étudier l'évolution des couches diffusantes sur la région nord-ouest africaine depuis 1995. Toutefois, bien que 4 fréquences aient été utilisées dans certaines campagnes, seule la fréquence

38 kHz a été disponible de 1995 à 2002. Nous nous sommes donc limités ici à une étude générale sur le micronecton, sans tenter une quelconque discrimination au niveau des organismes constituant les couches dont la distribution est étudiée ici.

### 4.3.2. Méthodes

#### 4.3.2.1. Compilation des données disponibles

Les données disponibles pour aborder une étude de la distribution du micronecton en Afrique de l'Ouest et que nous présentons ici proviennent de quatre navires : le navire Dr Fridtjof Nansen, le N/O Itaf Dème, le NRH Thalassa et le RV Atlantida. Compte tenu de la régularité des campagnes du Dr Fridtjof Nansen et dans un souci de comparabilité des résultats d'une année sur l'autre, la série du Dr Fridtjof Nansen est privilégiée dans l'exploitation de ces données (Tableau 4.3.2.1-1).

Tableau 4.3.2.1-1 Récapitulatif des données de campagnes hydroacoustiques disponibles.

| Navire | Années | Fréquence (kHz) | Format données | Données CTD/nb stations | Direction/ vitesse/ vent | Données papier |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F.Nansen | 1981 avril | -- | -- | -- | -- | rapport |
| F.Nansen | 1981 sept | -- | -- | -- | -- | rapport |
| F.Nansen | 1982 fév | -- | -- | -- | -- | rapport |
| F.Nansen | 1986 nov | -- | -- | -- | -- | rapport |
| F.Nansen | 1992 fév | -- | -- | -- | -- | rapport |
| F.Nansen | 1995 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /64 | oui | rapport |
| F.Nansen | 1996 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /142 | oui | rapport |
| F.Nansen | 1997 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /72 | oui | rapport |
| F.Nansen | 1998 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /41 | oui | rapport |
| F.Nansen | 1999 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /77 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2000 juin | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /117 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2000 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /117 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2001 juin | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /83 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2001 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /83 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2002 juin | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /74 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2002 nov | 38 Khz | EK500/BI500 | Oui /145 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2003 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/BI500 | Oui /246 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2004 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/BI500 | Oui /234 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2005 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/BI500 | Oui /185 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2006 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/BI500 | Oui /215 | oui | rapport |
| F.Nansen | 2011 juin | 18,38, 120, 200 | EK500/Raw | oui | oui | rapport |
| F.Nansen | 2011 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/raw | oui | oui | rapport |
| F.Nansen | 2012 mai | 18,38, 120, 200 | EK500/raw | oui | oui | rapport |
| F.Nansen | 2015 nov | 18,38, 120, 200 | EK500/LSSS | oui | oui | rapport |
| Itaf Deme | 2003 mars | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2004 avril | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2004 oct | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2005 mai | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Itaf Deme | 2005 oct | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2006 mars | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2007 oct | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| Itaf Deme | 2008 oct | 38, 120 | EK60/ Raw | oui | -- | rapport |
| ECOAO 2013 | 2013 Mars | 38,70, 120, 200 | EK60/ Hac | oui | -- | rapport |
| Atlantniro | 2012 déc | 38, 120 | -- | oui | -- | rapport |

A partir du Fridtjof Nansen, les données acoustiques ont été collectées :

- Pour les campagnes antérieures à novembre 2002, à l'aide d'un sondeur Simrad EK-500, 38 kHz Un échointegrateur Bergen Echo Integrator system (BEI) a servi à archiver les raw data issues du sondeur; les calibrations de l'échosondeur à 38 kHz ont été réalisées selon le protocole recommandé par Foote et al. (1987) en utilisant une boule de cuivre Cu-60.
- Pour les campagnes à partir de novembre 2003, à l'aide d'un sondeur Simrad ER-60/18, 38, 120 and 200 kHz. Les différentes calibrations de l'échosondeur ont été réalisées pour chaque fréquence selon Foote et al. (1987) à l'aide des boules Cu-64, Cu-60, WC-38.1 et WC-38.1 pour respectivement les fréquences 18, 38, 120 et 200 kHz. Le détail des réglages du sondeur pour le 38 kHz figure en annexe 7.1.
- Les valeurs d'intégrations sont stockées dans la base de données de l'IMR. La résolution horizontale est de 0.1, 1 ou 5 miles nautiques ; verticalement il y a 500 cellules disponibles pour la couche pélagique, soit une résolution de 1 m pour une profondeur de 500 m (profondeur maximale des zones prospectées) et de même, il y a 150 cellules disponibles pour la couche référencée au fond subdivisée en deux zones : une zone de 10 m au-dessus du fond et une zone de 5 m en dessous, ce qui correspond pour l'ensemble de ces deux zones à une résolution de 10 cm.
- Les valeurs d'intégrations $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) collectées à 38khz sont allouées aux espèces cibles durant les campagnes d'évaluation des ressources pélagiques, en fonction des résultats des pêches de contrôle effectuées à la rencontre des bancs de poissons, de la forme des échotraces et de la profondeur où les détections sont présentes. Les seuils utilisés varient en fonction des espèces en présence et s'étalent habituellement entre environ –40 dB jusqu'à 60 dB pour, respectivement, des cibles à fort pouvoir de réflexion comme les sardinelles ou des cibles à pouvoir de réflexion moyen comme les chinchards ou les maquereau. Le seuil utilisé pour extraire le miconecton est de -79 dB.

#### 4.3.2.2. Outil de traitement

L'outil de traitement des données acoustiques "Matecho" disponible pour l'étude du micronecton a été developpé au sein de l'IRD de Brest. Il s'agit d'un outil automatisé open-source permettant de traiter divers formats issues de sondeurs halieutiques de plusieurs générations (EK500, EK60, EK80). Il offre des possibilités de nettoyage et filtrage automatiques des données afin de les préparer aux traitements et extractions finales comme l'échointégration et l'extraction d'agrégations.

Nous nous proposons dans la présente étude, en utilisant « Matecho », de comparer l'évolution des barycentres du micronecton avec celle des barycentres pour S.aurita et autres espèces ayant montré des tendances de remontée vers le nord. Dans cette étude comparative, nous avons choisi la même échelle spatio-temporelle et les mêmes neuf zones que dans l'étude sur le « poisson » (voir figure S1, Chapitre 3).Toutefois nous utilisons ici un jeu assez restreint

de la base de données disponible, qui sera élargi ultérieurement étant donné le volume important des données à traiter. Le jeu de donnée a été choisi pour sa consistance spatiale, le barycentre ne pouvant être appliqué que pour des années où la donnée est disponible sur les neufs zones retenues. Les années ayant présentées des déficits à ce niveau n'ont pas été choisies et celles finalement utilisées sont : 1995, 1996, 1997, 1999, 2002 et 2015. Les données raw disponibles à Brest lors de ce traitement pour la campagne 2015 ne couvrent à ce jour que le Sénégal. Toutefois, les valeurs $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) totaux trouvées lors de la campagne de 2015 sont disponibles et nous les avons utilisés dans cette étude pour compléter la série. En effet, le barycentre indiquant la position moyenne d'une population, il est théoriquement le même pour les $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) cumulées calculées par « Matecho » et les $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) totaux à 38 kHz livrés par le BI500 juste à la fin de la campagne.

### 4.3.3. **Résultats**

Le Tableau 4.3.3-1 fournit pour chaque région les valeurs moyennes sA ($m^2$ $nm^{-2}$) issues du traitement par « Matecho » et complétées par les estimations BI500 issues directement de la campagne 2015.

Tableau 4.3.3-1 valeurs moyennes sA ($m^2$ $nm^{-2}$) par zone et par année.

| zones | 1995 | 1996 | 1997 | 1999 | 2002 | 2015 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Z9 | 133971 | 83872 | 81302 | 77366 | 47418 | 1820 |
| Z8 | 142953 | 23707 | 121044 | 89006 | 118040 | 2864 |
| Z7 | 148321 | 91985 | 55130 | 40701 | 98454 | 3295 |
| Z6 | 156446 | 313326 | 112799 | 78088 | 39648 | 1590 |
| Z5 | 108766 | 108158 | 69719 | 58958 | 89908 | 1981 |
| Z4 | 181409 | 64278 | 154644 | 130736 | 290180 | 1647 |
| Z3 | 61216 | 16809 | 34672 | 23926 | 20037 | 1528 |
| Z2 | 38288 | 29235 | 27574 | 78922 | 15135 | 3595 |
| Z1 | 33650 | 88478 | 42702 | 41149 | 19561 | 4577 |

La distribution relative du micronecton sur la région de 1995 à 2015 est alors illustrée par la Figure 4.3.3-1 où l'on perçoit plutôt une descente vers le sud au cours de la série.

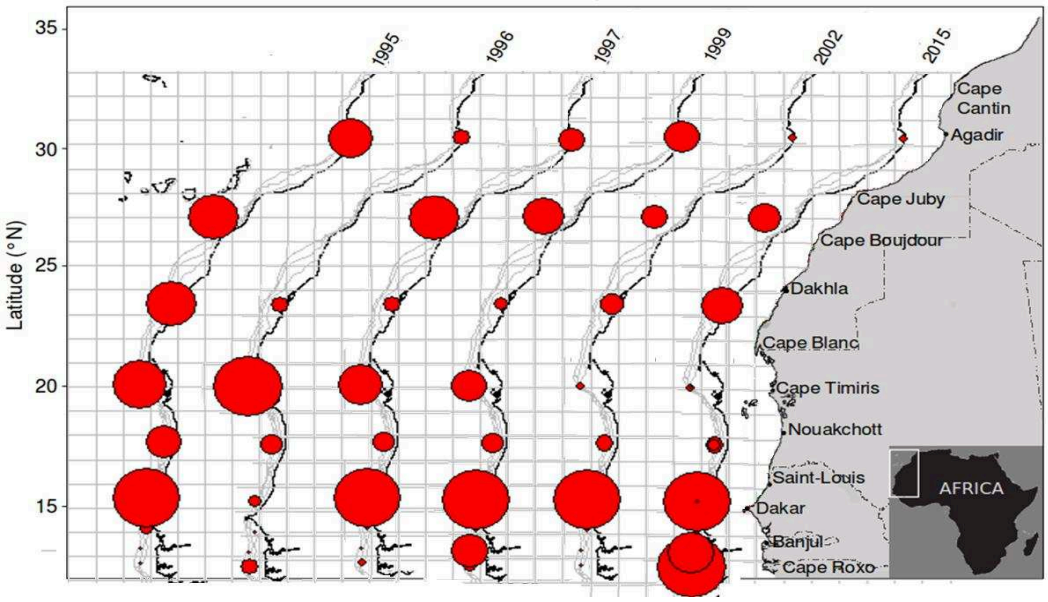



Figure 4.3.3-1 Distribution relative du micronecton sur la région pour les années 1995, 1996, 1997, 1999, 2002 et 2015, Pour une année donnée, le diamètre des cercles dans une région donnée indique l'abondance relative du micronecton dans cette région par rapport aux autres.

L'évolution du barycentre du micronecton de 1995 à 2015 illustrée par la Figure 4.3.3-2 confirme cette descente perçue ci-dessus. Ce résultat signifierait alors que le micronecton ne suit pas les remontées des espèces pélagiques déjà décrites.

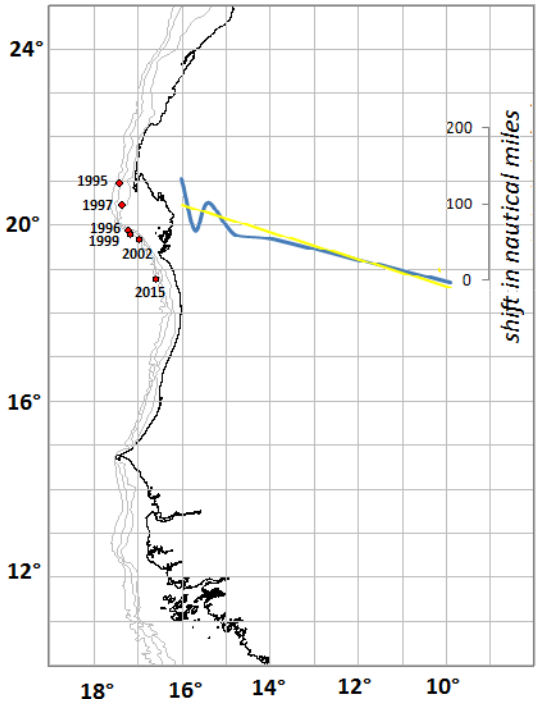



Figure 4.3.3-2 Shifts des barycentres (en bleu ; courbe de tendance en jaune) du micronecton de 1995 à 2015.

### 4.1.1. Discussions

Bien que le jeu de données ici se limite seulement à 6 années, la tendance qui se dégage indique clairement un déplacement du micronecton vers les régions du sud depuis 1995, en sens inverse du déplacement constaté pour plusieurs espèces pélagiques dont S.aurita. Un tel résultat viendrait alors soutenir l'hypothèse avancée dans nos investigations du chapitre précédent, où la température s'est imposée comme le principal déterminant des déplacements constatés sur les espèces pélagiques.

Toutefois il faut signaler la forte variabilité de la dynamique des populations micronectoniques, ce qui pourrait relativiser cette descente constatée à leur niveau à partir des barycentres de leurs valeurs $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) écho-intégrées. Au niveau du Courant des Canaries, sur la base des échantillonnages disponibles sur les couches, les organismes qui dominent sont les copépodes le micronecton est essentiellement composé de populations de copépodes où ils représentent 60%-95 % de l'abondance du zooplancton (Fernández de Puelles, 1986; Salah et al). Nous avons une compréhension limitée des principaux éléments moteurs déterminant les pics en abondance, la variabilité et les modèles dans le Courant de Canaries (Arístegui et al., 2005; Lathuilière et al, 2010; 2014b; Auger et al, 2016) et les connaissances sur la variabilité régionale dans la structure de communauté de plancton restent clairsemées, malgré quelques exceptions locales bien documentées mais insuffisantes pour tirer des modèles géographiques de variabilité (Arístegui et al., 2009a). On s'accorde toutefois sur la forte variabilité de leur dynamique, le zooplancton présentant des cycles de vie très courts, de l'ordre de quelques semaines (Hays et al., 2005; Richardson et al., 2009). Dans une campagne de prospection acoustique configurée en radiales-interadiales et de durée importante (une campagne du DFN dure 52 jours dans la région), on rencontre dans la collecte du micronecton une variabilité haute fréquence, des blooms de micronecton pouvant apparaitre et disparaitre sur une échelle de temps réduite.

Par ailleurs, nous avons utilisé dans cette étude une approche mono-fréquentielle (38khz) qui est donc limitative quant à la validation des $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) utilisée comme celle effective du micronecton. Les espèces micronectoniques spécifiques au moment de la campagne n'étant pas connues, il est difficile de statuer sur l'évolution de biomasse complexe du compartiment micronectonique en se basant sur une seule fréquence, étant entendu que plusieurs organismes pourraient répondre mieux à une autre fréquence, ce qui modifierait notablement les contributions au $s_A$ ($m^2$ $nm^{-2}$) obtenues.

Enfin il faut signaler que les eaux au sud du Courant de Canaries sont connues pour l'importance de la diversité marine par rapport aux eaux plus au nord (Maroc). Cette diversité se reflète durant les campagnes acoustiques où la grande mixité des espèces en présence complique notablement les allocations des valeurs d'intégration aux différentes espèces cibles (opération de « scrutinising »). Cette opération est de loin plus aisée au Maroc qu'au Sénégal. Ceci témoigne de la diversité des organismes marins à toutes les échelles aussi bien nectonique que micronectonique au sud du Système, pour la plupart ne faisant pas partie de la chaîne de valeur alimentaire, mais pouvant contribuer largement dans la rétrodiffusion acoustique, ce qui pourrait expliquer des niveaux de micronecton élevés dans ces régions. Nous signalons ici que des blooms importants de méduses ont été signalés au Sénégal, lorsqu'on sait que les méduses répondent assez bien au 38kHz. Durant la dernière campagne de l'UEMOA de mars 2015 dans la région, les méduses représentaient 6 % des captures globales et ont été classées comme 2ème groupe après les poissons osseux (ostéichtyens), se positionnant ainsi devant les crustacés, les échinodermes, les gastéropodes, les bivalves et les céphalopodes (UEMOA, 2015).

### 4.4. Perspectives générales d'études

La perspective première découlant de ce travail est d'utiliser l'approche multifréquence pour affiner les résultats obtenus et confirmer les différents groupes qui ont été étudiés ici avec seulement la fréquence 38kHz. Dans cette perspective, 4 fréquences sont disponibles avec le jeu de données du DFN. Il s'agira concrètement de développer ou adapter un algorithme de

classification des détections, qui convienne à ce milieu du CCLME, afin de différencier les groupes d'espèces ou de familles micronectoniques de l'écosystème Nord Ouest africain en couplant avec des données d'identifications spécifiques détections à l'aide des échantillonnages biologiques collectés avec le multinet par strates de profondeur. Les données biologiques de la campagne ECOAO pourraient servir à ce niveau.

Une seconde perspective, utile pour contribuer au processus d'amélioration des résultats de campagne acoustiques déjà initié dans le cadre du « Acoustic Planning group » est de prendre appui sur l'approche multifréquentielle couplée avec les échantillonnages biologiques collectés avec le multinet, pour affiner et améliorer les critères de classification des groupes et les allocations durant les campagnes acoustiques dans la région, en particulier du Dr Fridtjof Nansen et du N/O Itaf Dème, où des critères plus pertinents sont attendus pour discriminer les groupes.

Pour éclairer davantage sur la variabilité de la dynamique des populations micronectoniques, une troisième perspective de ce travail serait d'étudier cette dynamique sur le long terme en point fixe ou différents endroits du plateau de l'écosystème Nord Ouest africain, durant toute une saison, particulièrement la saison d'upwelling, pour voir les dynamiques temporelles de ces communautés micronectoniques. Une telle perspective est réalisable certainement au niveau de grands projets embrassant toute la région mais fournirait des informations essentielles pour une meilleure compréhension de la variabilité de ce compartiment où le déficit de connaissance est signalé (Arístegui et al., 2005; Lathuilière et al, 2010; 2014b; Auger et al, 2016).

Enfin il a été noté dans ce travail, devant la raréfaction annoncée de certaines espèces cibles de la région, qu'une telle situation pourrait aussi s'accompagner d'un repeuplement par des espèces du stock de Sherbo (venant de la Guinée). Le jeu important de données disponibles, en particulier concernant les pêches scientifiques du DFN, doit permettre de confirmer ces remplacements par des espèces du sud. Une perspective intéressante serait donc de mener la même étude que celle effectuée ici sur la distribution de S.aurita , pour des espèces d'intérêt commercial qui pourraient, avec les changements observés sur le climat de la région, remonter pour peupler le sud du Système des Canaries, en particulier le Sénégal.

# Liste des références bibliographiques

## 5. Liste des références bibliographiques


Albaret, J. J., Simier, M., Darboe, F. S., Ecoutin, J. M., & Tito de Morais, L., 2004. Fish diversity and distribution in the Gambia Estuary, West Africa ,in relation to environmental variables. Aquatic Living Resources, 17(1), 35–46.

Albaret, J.J., 1987. Les peuplements de poisons de la Casamance (Sénégal). Rev. hydrobiol. trop. 20, 291–310.

Albaret, J.J., Simier, M., Darboe, F.S., Ecoutin, J.M., Tito de Morais, L., 2004. Fish diversity and distribution in the Gambia Estuary, West Africa,in relation to environmental variables. Aquat. Living Resour. 17(1), 35–46.

Anonyme, 2006. Rapport final de l'étude de l'évaluation et de la gestion des ressources halieutiques en République du Sénégal. Programme de recherche sénégalo-japonais.DPM/CRODT/OAFIC/JICA, document de 290 pages

Aristegui, J., Alvarez-Salgado, X. A., Barton, E. D., Figueiras, F. G., Hernandez-Leon, S., Roy, C., & Santos, A. M. P. , 2005. Chapter 23 : oceanography and fisheries of the Canary current/Iberian region of the eastern North Atlantic (18a,E). In K. H. Brink & A. R. Robinson (Eds.), The sea : the global coastal ocean : interdisciplinary regional studies and syntheses. 877–931. Harvard: Harvard University Press.

Arístegui, J., Sangrá, P., Hernández-León, S., Cantón, M., Hernández-Guerra, A. et Kerling, J.L., 1994. Island-induced eddies in the Canary Islands. Deep-Sea Research 41, 1509–1525.

Auger, P.-A., Gorgues, T., Machu, E., Aumont, O., & Brehmer, P., 2016. What drives the spatial variability of primary productivity and matter fluxes in the north-west African upwelling system? A modelling approach. Biogeosciences, 13(23), 6419–6440. https://doi.org/10.5194/bg-13-6419-2016

Ba, K., Thiaw M., Lazar N., Sarr A., Brochier T., Ndiaye I., Faye A., Sadio O., Panfili J., Brehmer P., 2016. Resilience of key biological parameters of the Senegalese flat sardine in the context of overfishing and climate change. Plos one 11(6): e0156143.

Ba, A., Schmidt, J., Dème, M., Lancker, K., Chaboud, C., Cury, P., … Brehmer, P., 2017. Profitability and economic drivers of small pelagic fisheries in West Africa: A twenty year perspective. Marine Policy, 76, 152–158. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.11.008

Ba, K., Thiaw, M., Lazar, N., Sarr, A., Brochier, T., Ndiaye, I., … Brehmer, P., 2016. Resilience of Key Biological Parameters of the Senegalese Flat Sardinella to Overfishing and Climate Change. PLOS ONE, 11(6), https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156143

Bakun, A., 1990. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. Science, 247(4939), 198–201. https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198

Bakun, A. et al., 2015. Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. Curr. Clim. Change Rep. 1, 85–93 (2015).

Bakun, A., 1990. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. Science 247, 198–201 (1990).

Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R., & Sydeman, W. J., 2015. Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. Current Climate Change Reports, 1(2), 85–93. https://doi.org/10.1007/s40641-015-0008-4

Barra, M. et al., 2015. Interannual Changes in Biomass Affect the Spatial Aggregations of Anchovy and Sardine as Evidenced by Geostatistical and Spatial Indicators. PLOS ONE 10, e0135808 (2015).

Barton, E. D., Arístegui, J., Tett, P. et Navarro-Pérez, E., 2004. Variability in the Canary Islands area of filamenteddy exchanges. Progress in Oceanography 62, 71–94.

Barton, E.D., Arístegui, J., Tett, P., Cantón, M., García-Braun, J., Hernández-León, S., Nykjaer, L., Almeida,C., Almunia, J., Ballesteros, S., Basterretxea, G., Escánez, J., García-Weill, L, Hernández-Guerra,A., López-Laatzen, F., Molina, R., Montero, M.F., Navarro-Pérez, E., Rodríguez, J.M., Van Lenning,K., Vélez, H., Wild, K., 1998. The transition zone of the Canary Current upwelling region. Progress in oceanography 41, 455-504. Doi: 10.1016/S0079-6611(98)00023-8.

Barton, E.D., Huyer, A., Smith, R.L., 1977. Temporal variation observed in the hydrographic regime near Cabo Corveiro in the northwest African upwelling region, February to April 1974. Deep-Sea Research 24, 7–23.

Beaugrand, G., & Reid, P. C., 2003. Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. Global Change Biology, 9(6), 801–817. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00632.x

Benazzouz, A., Mordane, S., Orbi, A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., … Hervé, D., 2014. An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach – The case of the Canary Current upwelling system. Continental Shelf Research, 81, 38–54. https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.03.012

Benazzouz, A., Pelegrí, J. L., Demarcq, H., Machín, F., Mason, E., Orbi, A., … Soumia, M., 2014. On the temporal memory of coastal upwelling off NW Africa. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(9), 6356–6380. https://doi.org/10.1002/2013JC009559

Ben-Tuvia, A. Synopsis of biological data on *Sardinella aurita*, of the Mediterranean sea and other waters. 287–312 (FAO, 1960).

Berrit G. R., 1973. Recherches hydroclimatiques dans les régions côtières de l'Atlantique oriental tropical. état des connaissances et perspectives. Bull. Mus. natl. Hist. nut. Paris,Bez, N. Statistiques individuelles et géostatistique transitive en écologie halieutique. (Ecole des Mines de Paris, 1997).

Berrit, G.R. et Rebert, J.P., 1977. Océanographie physique et productivité primaire, p. 1-60. In: G.R. Berrit (éd.). Le milieu marin de la Guinée-Bissau et ses ressources vivantes. ORSTOM, Ministère de la Coopération, République Française.

Binet, D., 1988. Rôle possible d'une intensification des alizés sur le changement de répartition des sardines et sardinelles le long de la côte Ouest africaine. Aquatic Living Resources, 1(2), 115–132. https://doi.org/10.1051/alr:1988014

Boëly, T., & Ostvedt, O., 1976. Les poissons pélagiques côtiers au Sénégal : observations faites à bord du navire usine Astra de la Mauritanie aux îles Bissagos (Archive – CRODT, Dakar) 26pp

Boëly, T., Chabanne, J., Fréon, P. & Stéquert, B., 1978. Cycle sexuel et migrations de *Sardinella aurita* sur le plateau ouest-africain des iles Bissagos a la Mauritanie. in Symp. sur le courant des Canaries: upwelling et resources vivantes. Las Palmas 1–12 (1978).

Boëly, T., & Fréon, P., 1979. Les ressources pélagiques côtières. Les ressources halieutiques de l'Atlantique Centre-Est. Première Partie: Les ressources du Golfe de Guinée de l'Angola à la Mauritanie. Troadec J. P. et Garcia S.

Boëly, T. 1979. Biologie de deux espèces de sardinelles (*Sardinella aurita*, Valenciennes, 1847 et *Sardinella maderensis*, Lowe, 1841) des côtes Sénégalaises. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Paris VI. 219 p

Boëly, T. 1980. Etude du cycle sexuel de la sardinelle plate: *Sardinella maderensis* (Lowe, 1841) des côtes sénégalaise. Cybium , 3e sér ., 8: 77-88

Boëly, T., Chabanne, J., Fréon, P., & Stéquert, B. ,1982. Cycle sexuel et migrations *de Sardinella aurita* sur le plateau continental ouest-africain, des Iles Bissagos à la Mauritanie. Rapports et Procès-Verbaux du Conseil International pour l'Exploitation de la Mer, (180), 350–355.

Boëly, T., Fréon, P. & Stéquert, B., 1982. La croissance de *Sardinella aurita* (Val. 1847) au Sénégal. Ocean. Trop 17, 103–119 (1982).

Bouaziz A., 2007. La sardinelle (Sardinella Valenciennes, 1847) des côtes algériennes distribution, biologie et estimation des biomasses. Thèse Doctorat. USTHB :135p.

Brehmer P., 2004, Comparative analysis of dynamical and spatial characteristics of fish schools *Sardinella aurita*: behavioral adaptations to environment and exploitation; effect on the catchability. PhD thesis 3733 Ensar, Rennes.

Brehmer P., Do Chi T., Mouillot D., 2006, Amphidromous fish school migration revealed by combining fixed sonar monitoring (horizontal beaming) with fishing data. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 334(1), 139–150.

Brehmer, P., Guillard, J., Guennégan, Y., Bigot, J. L., & Liorzou, B., 2006. Evidence of a variable "unsampled" pelagic fish biomass in shallow water (<20 m): the case of the Gulf of Lion. ICES Journal of Marine Science, 63(3), 444–451. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.10.016

Brehmer, P., Gerlotto, F., Laurent, C., Cotel, P., Achury, A., & Samb, B., 2007. Schooling behaviour of small pelagic fish: phenotypic expression of independent stimuli. Marine Ecology Progress Series, 334, 263–272. https://doi.org/10.3354/meps334263

Brehmer P., Do chi T., Laugier T., Laloë F., Darnaude A.M., Fiandrino A., Mouillot D., 2011, Field investigations and multi-indicators for shallow water lagoon management: perspective for societal benefit. Aquat. Conserv. 21(7), 728–742.

Camarena Luhrs T., 1986, Les principales espèces de poissons pélagiques côtiers au Sénégal: biologie et évaluation des ressources. Doctoral dissertation. Université de Bretagne Occidentale, Brest, France. 187 p..

Casey, K. S., Brandon, T. B., Cornillon, P., & Evans, R., 2010. The Past, Present, and Future of the AVHRR Pathfinder SST Program. In V. Barale, J. F. R. Gower, & L. Alberotanza (Eds.), Oceanography from Space, , 273–287. Dordrecht: Springer Netherlands.

Caveriviére, A., 1982. Les fluctuations d'abondance du baliste *B. carolinensis*, 8 pages. Disponible sur le site : www.horizon.ird.fr

Chauveau, J-P., 1989. Histoire de la pêche industrielle au Sénégal et politiques d'industrialisation. Deuxième partie : L'essor thonier et les limites d'une politique nationale d'industrialisation de la pêche (de 1955 aux premières années de l'indépendance). Cah. Sci. Hum. 25 (1-2) 1989 : 259-275.

Chavance, P., Ba, I., & Krivospitchenko, S., 1991. Les Ressources pélagiques de la ZEE mauritaniennes. Bull. Cent. Nat. Rech. Océanogr. et Des Pêches, 23, 28–72.

Cheriton, O.M., McManus, M.M., Holliday D.V., Greenlaw, C.F., Donaghay, P.L., Cowles T.J., 2007. Effects of mesoscale physical processes on thin zooplankton layers at four sites along the west coast of the U.S. Estuaries Coasts.

Cheung, W.L., Watson R., Pauly D., 2013. Signature of ocean warming in global fisheries catch. Nature 497, 365-368.

Cheung, W. W. L., Watson, R., & Pauly, D., 2013. Signature of ocean warming in global fisheries catch. Nature, 497(7449), 365–368. https://doi.org/10.1038/nature12156

Churnside, J.H., Wilson, J., Tatarskii, V., 2001. Airborne Lidar for fisheries applications. Opt. Eng. 40(3), 406-414.

Conand, F., 1977. Oeufs et larves de la sardinelle ronde (*Sardinella aurita*) au Sénégal : distribution, croissance, mortalité, variations d'abondance de 1971 à 1976. Cah. ORSTOM Sér. Océan. 15, 201–214 (1977).

Corten, A., Braham, C.-B., & Sadegh, A. S., 2017. The development of a fishmeal industry in Mauritania and its impact on the regional stocks of sardinella and other small pelagics in Northwest Africa. Fisheries Research, 186, 328–336. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.10.009

CRODT, 2006. Salinités et temperatures de surface des stations côtières de Saint Louis, Cayar, Thiaroye et Mbour au cours de la période 1970-1997. Archives CRODT.

Cury P. et Morand, S., 2004. Biodiversité marine et changements globaux : une dynamique d'interactions où l'humain est partie prenante. In : Chevassus-au-Louis B, Barbault R, eds. Biodiversité et changements globaux. Enjeux de société et défis pour la recherche. Paris : éditions ADPF ; ministère des Affaires étrangères, 2004. www.adpf.asso.fr/adpf-publi/folio/textes/ biodiversite.pdf.

Cury, P., & Fontana, A., 1988. Compétition et stratégies démographiques comparées de deux espèces de sardinelles ( *Sardinella aurita* et *Sardinella maderensis* ) des côtes ouest-africaines. Aquatic Living Resources, 1(3), 165–180. https://doi.org/10.1051/alr:1988018

Cury, P., & Roy, C., 1989. Optimal Environmental Window and Pelagic Fish Recruitment Success in Upwelling Areas. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 46(4), 670–680. https://doi.org/10.1139/f89-086

Cury, P., Bakun, A., Crawford, R. J. M., Jarre, A., Quiñones, R. A., Shannon, L. J., & Verheye, H. M., 2000. Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in "wasp-waist" ecosystems. ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil, 57(3), 603–618. https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0712

Dacosta, H., 1993 - Variabilité des précipitations sur le bassin versant du Saloum. In : A.T. Diaw, M.D. Thiam, P. Bouland, L.A. Lake, M.A. Mbow, and P.N. Ndiaye, Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal, UICN, Gland, Suisse, 87-103.

Dekshenieks, M.M., Donaghay, P.L., Sullivan, J.M., Rines, J.E.B., Osborn, T.R., Twardowski, M.S., 2001. Temporal and spatial occurrence of thin phytoplankton layers in relation to physical processes. Marine Ecology Progress Series 223, 61–71.

Demarcq, H. et Samb B., 1991.- Influence des variations de l'upwelling sur la répartition des poissons pélagiques au Sénégal. In Pêcheries Ouest-Africaines :Variabilité, Instabilité et Changement. Edition ORSTOM 1991, 290-306 p.

Demarcq, H., & Faure, V., 2000. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment. Oceanologica Acta, 23(4), 391–408. https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01113-0

Demarcq, H. Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998–2007), 2009. Prog. Oceanogr. 83, 376–385.

Dème M., Sarre A., Thiao D., Ngom F. et Diadhiou H., 2012. Dynamique Des Populations De Sardinelles En Afrique Du Nord-Ouest : Contraintes Environnementales, Biologiques Et Socio-Economiques. Projet USAID/COMFISH, 124 p.

Diankha, O., Ba, A., Brehmer, P., Brochier, T., Sow, B. A., Gaye, A. T. et Demarcq, H., 2017. Contrasted optimal environmental windows for both sardinella species in Senegalese waters. Fisheries Oceanography.

Diop, N., Diop H. et Diouf P. S., 2016. Analyse des stratégies et mesures d'adaptation au changement climatique dans le secteur de la pêche au Sénégal. Préparé par l'équipe de consultants dans le cadre du processus d'élaboration du plan national d'adaptation – pêche face aux changements climatiques horizon 2035. COMFISH, DPM, DEEC, 31 p.

Diouf K., Samb B. & Sylla M., 2010. Contribution à la connaissance de la biologie des sardinelles (*Sardinella aurita* et *Sardinella maderensis*) du littoral sénégalais. Dans S. Garcia, M. Tandstad & A.M. Caramelo (eds.). Science et aménagement des petits pélagiques. Symposium sur la science et le défi de l'aménagement des pêcheries de petits pélagiques sur les stocks partagés en Afrique nord-occidentale. 11-14 mars 2008, Casablanca, Maroc. FAO Comptes rendus des pêches et de l'aquaculture. No. 18. Rome, FAO. pp. 39–56."

Diouf., 1996. Les peuplements de poissons des milieux estuariens de l'Afrique de l'Ouest : l'exemple de l'estuaire hyperhalin du Sine Saloum. Thèses et Documents Microfichés. Retrieved from http://www.bondy.ird.fr/pleins_textes/pleins_textes_7/TDM_7/010008130.pdf

Domain F, 1977. Carte sédimentologique du plateau continental sénégambien, extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinee-Bissau, Note explicative n° 68, ORSTOM, 27 p.

Domain F., 1980. Contribution à la connaissance de l'écologie des poissons démersaux du plateau continental sénégalo-mauritanien : les ressources démersales dans le contexte général du golfe de Guinée. Thèse de doctorat ès. Sciences Naturelles de l'Université Pierre et Marie Curie. Paris VI, Volume 1, 421 p.

Domanevski, L.N. et Barkova N.A, 1979. Particularités de la répartition et état des stocks de la sardine (Sardina pilchardusl) dans la région au large de l'Afrique nord- occidentale. In Rapport du Groupe de travail ad hoc sur les poissons pélagiques côtiers ouest-africains de la Mauritanie au Libéria (26 N °a 5°N). Dakar, Sénégal, 19-24 juin 1978. COPACE /PACE Sér. , (78/10) :86-91

Ecoutin, J. M., Béhagle, N., Brochier, T., Guillard, J., Laë, R., Lebourges Dhaussy, A., … Tito de Morais, L., 2013. L'aire marine protégée communautaire de Bamboung (Sine Saloum) : synthèse 2003-2011. IRD, Dakar, 77-97. Retrieved 7 June 2017, from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers13-12/010060105.pdf

Elouard, P., Faure. Hebrard, 1977. Variation du niveau marin au cour des 15000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert. Dakar - Sénégal Bull. Liaison Ass. Sénégalétude quaternaire Afrique, Dakar 50,29-49 p.

Emery K.O. et Aubrey D.G., 1991. Sea levels, land levels and tide gauges. Springer Verlag.New York, 237p

Fall, M., Fall, B. A., Thiam, N., & Sarre, A., 2013. Etude biométrique et variabilité des ressources démersales côtières de la zone maritime commune entre le Sénégal et la Guinée-Bissau. Journal Des Sciences Halieutique et Aquatique, 271–286 .

Fame, E.U., Njoku, U.G., Ogueji, E.O., Ifeanyichukwu, C., Stanley, I.C., Mbah, C.E., Ibrahim, Baba Usman, B., 2017, Analysis of technical efficiency of three fish processing methods and proximate assay on Ilisha Africana (Bloch, 1795). Int. J. Food. Sci. Nutr. 2(3), 154-158.

FAO, 2001 Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa, Nouadhibou, Mauritania, 24-31 March 2001..FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches. no. 657, 133 pp. 2001. http://www.fao.org/docrep/017/i3135b/i3135b.pdf,

FAO, 2005. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa was held in Nouadhibou, Mauritania, from 26 April–5 May 2005 FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches. 2005.

FAO, 2006. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa , Banjul, Gambie, 2 -11 mai 2006. FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches.. 2006.

FAO, 2009. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa, Nouakchott, Mauritania, 21–30 April 2009 FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches. 2009.

FAO, 2010. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa, Banjul, the Gambia, 18–22 May 2010 FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches.2010.

FAO, 2011. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa, Casablanca (Maroc), du 24 au 28 mai 2011. FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches. 2011.

FAO, 2013 Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa. Casablanca, Morocco, 24 28 May 2011. 1026. FAO Fisheries and Aquaculture Report / FAO, Rapport Sur Les Pêches et l'aquaculture. Rome: FAO.

FAO, 2015. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa, Casablanca (Maroc), du 20-25 juillet 2015. FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches. 2011.

FAO, 2016 Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa. Casablanca, Morocco, 20-25 July 2015 1122. FAO Fisheries and Aquaculture Report. Rome: FAO. http://www.fao.org/3/a-i5511bb.pdf

Fisher, w., Bianchi, g. & Scott, w.b., 1981. Fiches FAO d'identification des espèces pour besoins de la pêche. Atlantique centre-est ; zones de pêches 34-47 (en partie). Canada Fonds de Dépôt. Ottawa, Ministère des Pêcheries et Océans, en accord avec l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1-7, pag. Var.

Fischer, G., Reuter, C., Karakas, G., Nowald, N. et Wefer, G., 2009. Offshore advection of particles within the Cape Blanc filament, Mauritania: Results from observational and modelling studies. Progress in Oceanography 83: 322–330.

Folk, R.L., 1954. The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. Journal of Geology, 62, 344-359

Foote, K., G., 1983: Maintaining precision calibrations with optimal copper spheres. J. Acoust. Soc. Am. 73(3).

Foote, K. G., Knudsen, H., Vestnes, G., MacLennan, D. N. & Simmonds, E. J., 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. ICES Coop. Res. Rep. 144, (1987).

Forbe.S.T. et Nakken O., 1972. Manual of methods for fisheries resource survey and appraisal .Part2. The use of acoustic instruments for fish detection and abundance estimation. FAO Manuals Fish. Sci.No.5.Rome

Franqueville C., 1980.-Etude des nurseries de daurades *Pagellus coupei* le long de la côte ouest africaine de 10°N à 20°N. Centre Rech. Oceanogr. Dakar-Thiaroye. DOC. Scient. N°76:15p.

Fréon P., 1988. Réponses et adaptations des stocks de clupéidés d'Afrique de l'Ouest à la variabilité du milieu et de l'exploitation: analyse et réflexion à partir de l'exemple du Sénégal. Études et thèses, ORSTOM, Paris, 287p.

Fréon,P. et Stéquert B., 1979. Note sur la présence de Sardina pilchardus (Walb.) au Sénégal. 1979 Etude de la biométrie et interprétation. Cybium (3ème Sér.), (6):65-90

Gabric, A.J., García, C.M., Van Camp, L., Nykjaer, L., Eifler, W. et Schrimpf, W., 1993. Offshore export of shelf production in the Cape Blanc (Mauritania) giant filament as derived from Coastal Zone Color Scanner imagery. Journal of Geophysical Research. 98:4697-4712.

Ghéno, Y. & Fontana, A., 1981. Les stocks de petits pélagiques côtiers : les sardinelles. in Milieu marin et ressources halieutiques de la République Populaire du Congo (ed. Fontana, A.) 213–257 (ORSTOM, 1981).

Guillard J., Lebourges Dhaussy A., 1998, Preliminary results of fish population distribution in a Senegalese coastal area with depths less than 15 m, using acoustic methods. Aquat. Living Resour. 11(1), 13–20.

Guillard, J., Albaret, J. J., Simier, M., & Raffray, J., 2004. Spatio-temporal variability of fish assemblages in The Gambia Estuary (West Africa) observed by two vertical hydroacoustic methods: Moored and mobile sampling. Aquat. Living Resour., 17(1), 47–55.

Hagen, E., Zülicke, C., et Feistel, R., 1996. Near-surface structures in the Cape Ghir filament off Morocco.Oceanologica Acta 19, 577-598.

Hamann, I., John, H.-C., & Mittelstaedt, E., 1981. Hydrography and its effect on fish larvae in the Mauritanian upwelling area. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 28(6), 561–575. https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90117-5

Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., López-Laatzen, F., Martínez, A., Parrilla, G. et Vélez-Belchí, P.,2005. Canary Current and North Equatorial Current from an inverse box model. Journal of Geophysical Research. 110, C12019. Doi:10.1029/2005JC003032

Holzlöhner S. et Kloxin G., 1982 - On the species composition and the length - age structure of the important pelagic fishes off North West Africa, 1981. ICES/C.M. 1982/H : 55. Pelagic Fish Committee

Houdaut, 2004 . Impacts des conditions climatiques de l'été 2003 sur la faune et la flore marine.Rapport sous la coordination de Michel Houdart. A partir des données des réseaux de surveillance de l'Ifremer et d'observations de J-P. Allenou, O. Arnal, I. Auby, J. Boucher,P. Camus, L. Drévès, P-G. Fleury, AM. Jegou, P. Lazure,Cl. Le Bec, R. Le Goff, P. Le Mao, L. Loubersac, Cl. Pellier,M. Ryckaert http://www.ifremer.fr/envlit/documentation/documents.htm

Huggett, J., Fréon, P., Mullon, C., & Penven, P., 2003. Modelling the transport success of anchovy Engraulis encrasicolus eggs and larvae in the southern Benguela: the effect of spatio-temporal spawning patterns. Marine Ecology Progress Series, 250, 247–262. https://doi.org/10.3354/meps250247

Intes, A. & Le loeuff, P., 1984. Les annélides polychètes de Côte d'Ivoire : 3. Relation faune-conditions climatiques : unités régionales faunistico-climatiques dans le golfe de Guinée. Oceanogr. Trop. 19, 3–24 (1984).

Intes, A., & Le loeuff, P., 1984. Les annélides polychètes de Côte d'Ivoire : 3. Relation faune-conditions climatiques : unités régionales faunistico-climatiques dans le golfe de Guinée. Oceanographie Tropicale, 19(1), 3–24 .

Jallow, A.M., 1994, Utilization of bonga (*Ethmalosa fimbriata*) in West Africa. Rome. FAO Fisheries Circular No. 870, 28p.

Karakas, G., Nowald, N., Blaas, M., Marchesiello, P., Frickenhaus, S. et Schlitzer, R., 2006. High-resolution modelling of sediment erosion and particle transport across the northwest African shelf. Journal of Geophysical Research 111, CO6025. Doi:10.1029/2005JC003296.

Knudsen H. P., 1990. The Bergen Echo Integrator: an introduction, pp. 167–174.

Korneliussen R. J., Ona E., Eliassen I., Heggelund Y., Patel R., Godø O. R., Lien G., 2006. The Large Scale Survey System - LSSS. Presented at the Proceedings of the 29 th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Ustaoset.

Korneliussen, R., 2003. Synthetic echograms generated from the relative frequency response. ICES Journal of Marine Science, 60(3), 636–640. https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00035-3

Korneliussen, R. J. et al., 2006. The Large Scale Survey System - LSSS. (2006).

Krakstad J.O., Sylla S., Jallow J., Olsen M., 2005, Survey of the pelagic fish resources off north west Africa. Institute of Marine Research, Bergen. Nansen survey report Part I: Senegal, (Working paper). NORAD-FAO Project GCP/INT/730/NOR, 67p.

Krakstad, J. O., Olsen, M., Sarre, A., & Mbye, E. M. (2006). Survey of the pelagic fish resources off north west Africa. Part I: Senegal - The Gambia 31st October - 09th November 2006 (Working paper). Institute of Marine Research. Retrieved from https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/107424

Krakstad, J. O., Sylla, S., Jallow, J., & Olsen, M. (2005). Survey of the pelagic fish resources off north west Africa. Part I: Senegal - The Gambia 25 October - 3 November 2005 (Working paper). Institute of Marine Research.

Kwiatkowski, L., Bopp, L., Aumont, O., Ciais, P., Cox, P. M., Laufk?tter, C., … S?f?rian, R., 2017. Emergent constraints on projections of declining primary production in the tropical oceans. Nature Climate Change, 7(5), 355–358. https://doi.org/10.1038/nclimate3265

Laloë F. et Samba A., 1990.- La pêche artisanale au Sénégal : ressource et stratégies de pêche. Etudes et Thèses, Paris, ORSTOM, 395 p.

Lathuilière, C., Echevin, V., Lévy, M., & Madec, G., 2010. On the role of the mesoscale circulation on an idealized coastal upwelling ecosystem. Journal of Geophysical Research, 115(C9) . https://doi.org/10.1029/2009JC005827

Lavery, A.C., Wiebe, P.H., Stanton, T.K., Lawson, G.L., Benfield, M.C., and Copley, N. 2007. Determining dominant scatterers of sound in mixed zooplankton populations. J. Acoust. Soc. Am. 122(6): 3304–3326. doi:10.1121/1.2793613. PMID:18247742.

Lawson, G.L., Wiebe, P.H., Ashjian, C.J., Gallager, S.M., Davis, C.S., Warren, J.D., 2004. Acoustically inferred zooplankton distribution in relation to hydrography west of the Antarctic Peninsula. Deep-Sea Research II 51, 2041–2072.

Levenez, J.J. et Lopez, J., 1982. Résultats de la campagne Echosar 4 du N/O Capricorne: prospection des stocks de poissons pélagiques côtiers le long des côtes du Sénégal et de la Gambie. documentation.ird.frhttp://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:02577

Liao, E., Lu, W., Yan, X.-H., Jiang, Y., & Kidwell, A., 2015. The coastal ocean response to the global warming acceleration and hiatus. Scientific Reports, 5(1), . https://doi.org/10.1038/srep16630

Longhurst, A. R., & Pauly, D., 1987. Dynamics of Tropical Fish Populations. In Ecology of Tropical Oceans (pp. 257–306). San Diego: Academic Press.

Lourdelet E., 1966. La pêche maritime artisanale au Sénégal. Thèse de Doctorat en droit, Faculté de droit et des sciences économiques, Université de Dakar, 295 p

MacLennan, D., Fernetes, P., G., Dalen J., 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. ICES Journal of Marine Sscience, 59: 365-369.

Mamza, K., El Ayoubi, S., & Araabab, M., 2015. Campagne d'évaluation acoustique des ressources des petits pélagiques de l'Atlantique Nord, Cap Spartel – Cap Cantin. (Rapport de campagne N/R '"Al Amir Moulay Abdallah"'.). Institut National de Recherche Halieutique.

Marchal E. et Boëly T., 1977. Evaluation acoustique des ressources enpoissons du plateau continental ouest-africain des îles Bissagos(11"N) il la Pointe Stafford (BON). Cah. ORSTOM, sér. océanogr., 15

Marchal E.et Josse E., 1982. Résultats de la campagne ECHOSAR 1 (février1980) Echosar2(septembr198 Prospection des stocks pélagiques le long des côtes du Sénégal de la Gambie et de la Mauritanie –Archive CRODT

Marchal, E., 1989: Les campagnes acoustiques d'études des stocks de la région Maroc-Mauritanie-Sénégal. Rapport du groupe de réflexion: Analyse des résultats et perspectives de recherches. Collections Colloques et Séminaires .ORSTOM.

Marek Ostrowski, 2004. Survey mapper Version 0.97 (August 2004), Institute of Marine Research. P.O. Box 1870 Nordnes. 5817 Bergen, Norway. e-mail mareko@imr.no

Martínez-Marrero, A. et al. Distribution of water masses and diapycnal mixing in the Cape Verde Frontal Zone: diapycnal mixing in CVFZ. Geophys. Res. Lett. 35, L07609 (2008).

Martínez-Marrero, A., Rodríguez-Santana, A., Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., López-Laatzen, F., Vélez-Belchí, P., & Parrilla, G., 2008. Distribution of water masses and diapycnal mixing in the Cape Verde Frontal Zone: diapycnal mixing in CVFZ. Geophysical Research Letters, 35(7), L07609. https://doi.org/10.1029/2008GL033229

MEDD, 2015. Stratégie Nationale de Développement Durable 2016-2020. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 98 p.

Medina-Gaertner M. 1985. - Etude du zooplancton côtier de la baie de Dakar et de son utilisation par les poissons comme source de nourriture. Thèse 3eme cycle, Université de Bretagne Occidentale, Brest : 141 p.

Mittelstaedt, E., 1991. The ocean boundary along the northwest African coast. Circulation and oceanographic properties at the sea surface. Prog. Oceanogr. 26, 307–355.Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Dagorne, D., Sow, B. A., Gaye, A. T., & Brehmer, P. (2014). Sea Surface temperature 'SST' patterns and dynamics of the Southern Senegal-Gambia upwelling center. Journal of Geophysical Research, 8315–8335.

Navarro-Pérez, E. et Barton, E.D., 2001. Seasonal and interannual variability of the Canary Current. Scientia Marina 65, 205–213.

Ndoye S., Capet X., Estrade P., Dagorne D., Sow B.A., Gaye A. T., Brehmer P., 2014, Sea Surface temperature 'SST' patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center. J. Geophys. Res. 8315–8335. doi: 10.1002/2017GL072789

Niang-Diop, I., 1992. Conséquences de l'élévation du niveau marin sur les côtes sénégalaises. In : Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal. DIAW A.T., BOULAND P., DIOUF P.S. LAKE L-A., MBOW M-A., THIAM P. et THIAM M.D. (Edit.) : 133-138.

Niang-Diop, I. et al., 2002.. Etude de vulnérabilité des côtes sénégalaises aux changements climatiques. Rapport final, Programme d'Assistance des Pays Bas et Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, 151 p.

Niang-Diop, et al., 2005, le Plan d'Action National d'Adaptation (PANA) Sénégal: vulnérabilité des côtes sénégalaises aux changements climatiques, 133 p.

Nieland, H. 1980: In Ghéno, Y. et Fontana, A. 1981. Les stocks de petits pélagiques côtiers les sardinelles. In: Milieu marin et ressources halieutiques de la république populaire du Congo, A. Document. ORSTOM, Paris., 138: 213-25

Nieland, H. 1982. - The food of *Sardinella aurita* (Val. ) and Sardinella eba (Val. ) off the Coast Senegal. Rapp. T.-V. Rhn. Cons. lnt. Explor. Mer, 280 : 369 – 373

Nykjær, L., Van Camp, L., 1994. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991. J. Geophys. Res. 99 (C7), 14197–14207.

Oudot, C. et Roy, C., 1991. Les sels nutritifs au voisinage de Dakar : un cycle annuel moyen et variabilité interannuel. In Cury P. et Roy C. (éditeurs). Pêcheries ouest africaines : variabilité, instabilité et changement. Editions de l'ORSTOM, Paris, pp. 80-89.

Panfili, J., Durand, J.D., Mbow, A., Guinand, B., Diop, K., Kantoussan, J., Thior, D., Thiaw, T.O., Albaret, J.J., Lae R., 2004. Influence of salinity on life history traits of the bonga shad *Ethmalosa fimbriata* (Pisces, Clupeidae): Comparison between The Gambia and Saloum estuaries. Mar. Ecol. Prog. Ser. 270, 241–257.

Pascual-Alayón P., Santamaría M.T.G. and Hernández E. 2008. Spanish Report on the activity of European pelagic trawlers fishing in Mauritania and landing in the port of Las Palmas de Gran Canaria, Spain. Nine Meeting of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa Nouakchott, Mauritania, 20 – 30 April 2009. 23 p

Pauly, D. 1993. Foreword. In: R.H.J. Beverton and S.J. Holt 1957 On the dynamics of exploited. fish populations. Reprint Edition, Chapman & Hall, London.

Pelegrí, J.L., Arístegui, J., Cana, L., González-Dávila, M., Hernández-Guerra, A., Hernández-León, S., Marrero-Díaz, A., Montero, M.F., Sangrà, P. et Santana-Casiano, M., 2005. Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water circulation and offshore pumping of organic matter. Journal of Marine Systems 54, 3–37.

Perrot et al , 2017. Matecho a new tool for fFisheries acoustics data processing: toward open source and collaborative development. Technical Note. Aqu. Liv. Res. Submitted.

Petitgas, P. et Levenez, J.J. 1996. Spatial organization of pelagic fish: echogram structure, spatio-temporal condition, and biomass in Senegalese waters. Fisheries and Plankton Acoustics. Proceedings of an ICES International Symposium held in Aberdeen, Scotland, 12-16 June 1995. pp. 147-153. ICES J. Mar. Sci. Vol. 53, no. 2

Postel, E.,1960. Rapport sur la sardinelle (*Sardinella aurita* Valenci-ennes)(Atlantique Africain)-.InH.Rosa,Jr.,and G.Murphy (editors),Proceedingsof the World Science Meeting on Biology of Sardines'md Related Species, Vol.2,p.55-95.FAO,Rome

Rébert, J.-P. ,1983. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc. Scient. Cent. Rech. Oceanogr. Dakar-Thiaroye, 186p.

Remond, B., 2015. Les couches diffusantes du golfe de Gascogne: caractérisation acoustique, composition spécifique et distribution spatiale. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 282p.

Rossignol, M. et Aboussouan, M.T., 1965. Hydrologie marine côtière de la presqu'île du Cap-Vert. Contribution à l'étude de la productivité des eaux. Doc. Sci. CRODT, 2, 166 p.

Roy, C., 1992. Réponses des stocks de poissons pélagiques à la dynamique des upwellings en Afrique de l'ouest : Analyse et Modélisation, IRD ; 142p.

Roy, C., Cury, P., & Kifani, S., 1992. Pelagic fish recruitment success and reproductive strategy in upwelling areas: environmental compromises. South African Journal of Marine Science, 12(1), 135–146. https://doi.org/10.2989/02577619209504697

Roy, C., Cury, P., Fontana, A., & Belvèze, H., 1989. Stratégies spatio-temporelles de la reproduction des clupéidés des zones d'upwelling d'Afrique de l'Ouest. Aquatic Living Resources, 2(1), 21–29. https://doi.org/10.1051/alr:1989003

Sabatés, A., Martín, P., Lloret, J., & Raya, V., 2006. Sea warming and fish distribution: the case of the small pelagic fish, *Sardinella aurita*, in the western Mediterranean. Global Change Biology, 12(11), 2209–2219. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01246.x

Sadio, O. et Ecoutin, J.M., 2013. Comparaison du peuplement de Bamboung avec celui d'un site autorisé à l'exploitation halieutique le bolon de Sangako. In Ecoutin J.M., Béhagle N., Brochier T., Guillard J., Laë R., Lebourges Dhaussy A., Le Loc'h F., Raffray J., Sadio O., Simier M., Sow I., Tito de Morais L., 2013, L'aire marine protégée communautaire de Bamboung (Sine Saloum): synthèse 2003-2011. IRD, Dakar, 77-97.

Sadio, O., 2015. Evaluation de l'efficacité des Aires Marines Protégées comme outil de la restauration des ressources marines et de gestion des stocks halieutiques : l'expérience ouest africaine . Retrieved 30 May 2017, from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-02/010068993.pdf

Samba, O. 2011.-Nouvelle évaluation des caractéristiques biologiques de *Sardinella aurita* (Valenciennes, 1847) et *Sardinella maderensis* (Lowe, 1841). Mémoire de DEA , IUPA/UCAD, 45 p.

Sambou, M. Y., Sow, M., Sambou, S., Mané, F., Camara, N., Gallo, A. G., Faye, L. C., Mandiamy, G. I., et Cissé, A., 2012. Analyse de la vulnérabilité des communautés côtières et stratégies d'adaptation au changement climatique dans les CLPA de Rufisque/Bargny, Sindia et Joal/Fadiouth, Projet USAID /COMFISH, 143 p.

Sanches , J.G., 1991, Catálogo dos principais peixes marinhos da República de Guiné-Bissau. Publ. Avuls. Inst. Nac. Invest. Pescas 16: 429p.

Sarré, A., Charouki, N., Mahmoud, E.M., Taleb, M.A.O., Mbye, E., Jallow, J., ElAyoubi, S. Krakstad, J. O. and Alvheim, O. 2005. Towards coordinated acoustic surveys in Northwest Africa: Results of parallel surveys and intercalibrations. In/ Dans S. Garcia, M. Tandstad & A.M. Caramelo, eds. Science and Management of Small Pelagics. Symposium on Science and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa, 11–14 March 2008, Casablanca, Morocco.FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings, No. 18. Rome, FAO. pp. 259–284.

Sarre A., 2012. Evaluation des sardinelles de la zone nord ouest africaine. In : Dème M., Sarre A., Thiao D., Ngom F. et Diadhiou H., 2012. Dynamique des populations de sardinelles en Afrique du Nord-Ouest : contraintes environnementales, biologiques et socio-économiques. Projet USAID/COMFISH, 124 p (2012)

Savo, V., Morton, C. & Lepofsky, D., 2017. Impacts of climate change for coastal fishers and implications for fisheries. Fish Fish. (2017). doi:10.1111/faf.12212

Simier, M., Blanc L., Aliaume C., Diouf P.S. & Albaret J.J., 2004, Spatial and temporal structure of fish assemblages in an 'inverse estuary', the Sine Saloum system (Senegal). Estuar. Coast. Shelf Sci. 59(1), 69–86.

Simier, M., Laurent, C., Ecoutin, J. M., & Albaret, J. J., 2006. The Gambia River estuary: A reference point for estuarine fish assemblages studies in West Africa. Estuar. Coast. Shelf Sci., 69(3–4), 615–628.

Simmonds, J., & MacLennan, D. N., 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice, 2nd edition (Willey-Blackwell, Vol. 10). Retrieved from http://www.bokus.com/bok/9780632059942/fisheries-acoustics/

Simmonds, J., & MacLennan, D. N., 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice, 2nd edition (Willey-Blackwell,10, . .

Simpson, S. D., Jennings, S., Johnson, M. P., Blanchard, J. L., Schön, P.-J., Sims, D. W., & Genner, M. J., 2011. Continental Shelf-Wide Response of a Fish Assemblage to Rapid Warming of the Sea. Current Biology, 21(18), 1565–1570. https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.08.016

Sloterdijk H., Brehmer P., Sadio O., Müller H., Döring J., Ekau W., 2017, Composition and structure of the larval fish community related to environmental parameters in a tropical estuary impacted by climate change. Estuar. Coast. Shelf Sci. 197, 10-26.

Sow, I., & Guillard, J., 2010. Suivi par hydroacoustique du peuplement piscicole d'une Aire Marine Protégée du Sine-Saloum (Sénégal): bilan 2003-2007. J. Sci. Hal. Aquat, p. 1:21-32.

Stanton T. K et Chu D.,2000. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods ICES Journal of

Marine Science, Volume 57, Issue 4, 1 August 2000, Pages 793–807, https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0517

Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J., & Mohrholz, V., 2008. Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. Science, 320(5876), 655–658. https://doi.org/10.1126/science.1153847

Sumaila, U. R., Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Pauly, D., & Herrick, S., 2011. Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. Nature Climate Change, 1, 449–456. https://doi.org/10.1038/nclimate1301

Sund O., 1935. Echo Sounding in Fishery Research. Nature 135, 953 (08 June 1935). doi :10.1038/135953a0

Surfer® 8 from Golden Software, LLC (www.goldensoftware.com)" 809 14th Street Golden, Colorado 80401.

Thiao D., 2012. Environnement hydroclimatique et pêcheries de sardinelles en Afrique du Nord-Ouest. In : Dème M., Sarre A., Thiao D., Ngom F. et Diadhiou, H., 2012. Dynamique des populations de sardinelles en Afrique du Nord-Ouest : contraintes environnementales, biologiques et socio-économiques. Projet USAID/COMFISH, 124 p (2012)

Thiaw, M., Auger, P.-A., Ngom, F., Brochier, T., Faye, S., Diankha, O., & Brehmer, P., 2017. Effect of environmental conditions on the seasonal and inter-annual variability of small pelagic fish abundance off North-West Africa: The case of both Senegalese sardinella. Fisheries Oceanography. https://doi.org/10.1111/fog.12218

Tiedemann, M., & Brehmer, P., 2017. Larval fish assemblages across an upwelling front: Indication for active and passive retention. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 187, 118–133. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.12.015

Toresen R., Sarré A., Olsen M., 2002, Survey of the pelagic fish resources off north west Africa. Institute of Marine Research, Bergen. Part I: Senegal - The Gambia 29 October - 7 November 2002. Cruise report "Dr. Fridtjof Nansen".NORAD-FAO project GCP/INTn30/NOR, 36p.

Toresen R., Sarré A., Olsen M, 2015. Survey of the pelagic fish resources off north west Africa part 1-Senegal he gambia21 - 30 october 2015. Cruise report "Dr. Fridtjof Nansen".

Urick, 1975. Principals of under water sound for engineer. Mc Graw Hill Book Compagny, New York, 2nd Ed. 384p.

Van Camp, L., Nykjaer, L., Mittelstaedt, E. et Schlittenhardt, P., 1991. Upwelling and boundary circulation off Northwest Africa as depicted by infrared and visible satellite observations. Progress in Oceanography 26, 357–402.

Verstraete J.M., 1985. Variations saisonnières et interannuelles du niveau moyen dans l'atlantique équatorial et tropical en 1983-1984 in ORSTOM, Paris, Coll. trav. et doc, 197,481-482

Vidy G., Darboe F. S., Mbye E.M., 2004, Juvenile fish assemblages in the creeks of the Gambia Estuary. Aquat. Living Resour. 17(1), 56–64.

Weikert, H., 1982. The vertical distribution of zooplankton in relation to habitat zones in the area of the atlantis II deep, central red sea. Marine Ecologiqcal Progress Series, 8, 129–143.

Whitehead P.J.P., 1985, Clupeoid fishes of the world (suborder Clupeoidei). An annotated and illustrated catalogue of the herrings, sardines, pilchards, sprats, shads, anchovies and wolf-herrings. Rome, FAO Species Catalogue. Vol. 7. Fish. Synop. 125(7/1), 1-303.

Woillez, M., Rivoirard, J., & Petitgas, P., 2009. Notes on survey-based spatial indicators for monitoring fish populations. Aquatic Living Resources, 22(2), 155–164.

Wooster, W.S., A. Bakum, and D.R. McLain, 1976: The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. Journal of Marine Research, 34, 131-140.

Zeeberg, J. J., Corten, A., Tjoe-Awie, P., Coca, J., Hamady, B., & TNO Bouw en Ondergrond., 2008. Climate modulates the effects of *Sardinella aurita* fisheries off Northwest Africa, 89, 65–75.

Zenk, W., Klein, B., & Schroder, M., 1991. Cape Verde Frontal Zone. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 38, 505–530. https://doi.org/10.1016/S0198-0149(12)80022-7

# Annexes

# 6. Annexes

## 6.1. Réglage du sondeur Simrad EK500 durant les campagnes à bord du N/O Fridtjof Nansen

| | |
|---|---|
| Transceiver | -2 menu (38 kHz) |
| Transducer depth | 5,50 m |
| Absorbtion coeff. | 9.6 dB/km |
| Pulse duration | medium (1,024ms) |
| Bandwidth | 2.43 kHz |
| power | Max |
| 2-way beam angle | -20,6dB à -21.0 dB |
| gain | 25,11 dB à 27.39 dB |
| SA correction | -0.60 dB |
| Angle sensitivity | 21.9 |
| 3 dB beamwidth | 7.43º along ship |
| athwardship | 7.38º |
| Alongship offset | 0.06º à -0.03º |
| Athwardship offset | 0.04º à 0.06º |
| Bottom detection menu Minimum level | -40 dB |

## 6.2. Articles antérieurs de l'auteur

### 6.2.1. Towards coordinated acoustic surveys in North West Africa: Results of Parallel surveys and Intercalibrations

Conference Paper · March 2008
*See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/293768245*
Dans: S. Garcia, M. Tandstad & A.M. Caramelo, eds. Science and Management of Small Pelagics. Symposium on Science and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa, 11–14 March 2008, Casablanca, Morocco/ FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings/FAO Comptes rendus des pêches et de l'aquaculture, No. 18. Rome, FAO. 606 pp.

**Abdoulaye Sarré**[1,*], Najib Charouki[2], Ebaye Mahmoud[3], Jiyid Mohamed Ahmed[3], Ebou Mbaye[4], Juldeh Jallow[4], Salahedine Elayoubi[2], Jens Otto Krakstad[5], Oddgeir Alvheim[5]

1 Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye, BP 2241, Dakar, Senegal
2 Institut National de Recherche Halieutique, Morocco
3Institut Mauritanien de la Recherche l'Océanographie et la Pêche, BP:22 Nouadhibou, Mauritania
4Fisheries Department, Banjul, The Gambia
5 Institute of Marine Research, P.O. Box 1870 Nordnes, N-5817 Bergen, Norway

**Abstract**

The coastal pelagic fish off North-West Africa are stocks of high commercial and social importance that are shared between the countries of the Sub-region. Since 1995, these resources are subject to regular evaluation by the Norwegian research vessel Dr. Fridtjof Nansen through regional acoustic surveys covering the area from southern Senegal to Cape Cantin in Morocco. This activity is undertaken within the framework of a programme of co-operation between the countries, FAO and the "Nansen Programme ". With the acquisition of national research vessels with acoustic equipment, scientific activities were initiated to prepare for the national vessels to take over the responsibility for the acoustic surveys carried out by the R/V Dr. Fridtjof Nansen. To achieve this, several parallel surveys and intercalibration exercises were carried out to ensure comparable results between the national vessels and the R/V Dr. Fridtjof Nansen, using the latter as a reference. This study describes some of the results of these parallel surveys and intercalibrations, shows the recorded improvements made, underlines technical or methodological problems encountered and makes recommendations to improve the precision and the reliability of the abundance estimates of the main pelagic resources in the area.

**Keywords:** acoustics, intercalibrations, parallel surveys, North West Africa, shared marine resources, small pelagics, biomass estimates.

**Résumé**

Les poissons pélagiques côtiers en Afrique du Nord-Ouest représentent des stocks considérables partagés entre le Sénégal, la Gambie, la Mauritanie et le Maroc. Depuis 1995, ces ressources font l'objet d'évaluation par le navire de recherche norvégien le N/O Dr. Fridtjof Nansen à travers des campagnes acoustiques couvrant toute la région. Cette activité est entreprise dans le cadre d'un programme de coopération avec les pays de la sous région « Programme Nansen » sous l'auspice de la FAO. Avec l'acquisition de navires locaux équipés de matériels acoustiques, des activités scientifiques sont en cours pour suppléer le N/O Dr. Fridtjof Nansen. Il s'agit principalement de conduire des campagnes parallèles et d'effectuer des exercices d'intercalibration pour aboutir à des résultats comparables. Ainsi plusieurs exercices ont été conduits par les navires nationaux avec comme référence le N/O Dr. Fridtjof Nansen. Cette étude présente certains résultats de ces campagnes parallèles et intercalibrations, évoque les améliorations enregistrées, souligne des problèmes techniques ou méthodologiques rencontrés et formule des recommandations pour améliorer la précision et la fiabilité des estimations d'abondance dans la région.

**Mots-clés** : acoustique, intercalibrations, campagnes parallèles, Afrique du Nord-Ouest, stocks marines partagés, petits pélagiques, estimations de biomasses

## Introduction

During the third planning group of acoustic activities in North West Africa (Dakar, October 2004), one of the main recommendations was to conduct future regional surveys with the three local research vessels in Senegal, Mauritania and Morocco. One of the reasons was that the Dr. Fridtjof Nansen was expected to leave the region in the near future. Combined surveys with three different research vessels can be achieved only if the local vessels have the same references, the same procedures and produce comparable results. This was to be assessed by performing parallel surveys and intercalibrations between the vessels in the region and Dr. Fridtjof Nansen. A parallel survey was therefore conducted in October – December 2004 and the results analysed during a workshop in Casablanca the following January. The recommendations from that workshop were that the parallel survey and intercalibrations generally had been successful, providing valuable experience and much needed results. It highlighted several problem areas were the countries in the region had to focus their effort in order to be able to run a regional assessment survey with three different vessels. One of the recommendations from the workshop was that a second parallel survey and intercalibration exercise should be conducted in 2005 in order to compare the results from 2004, assess any improvements in performance and indicate areas where more effort is still needed to reliably assess the biomass in the region with the three local research vessels. The survey took place from 31 October to 1 December 2005 and was generally successfully conducted. The workshop of April 2006 gave the opportunity to compare results, correct procedures and standardise methods of processing the acoustic surveys across the region to prepare the research institutions in the region for future regional surveys with local vessels without the assistance of Dr. Fridtjof Nansen.

## 1. Methods

The methodology used during intercalibrations and parallel surveys is as follows. The Dr. Fridtjof Nansen conducted the regional survey in the usual way following the “guidelines for acoustic surveys in the North West African region”. A parallel survey was conducted by the local research vessels following the same methodology. All vessels were operating with newly calibrated acoustic equipments. In general the methodology is described in the respective cruise reports. All vessels produced:

- Survey maps with cruise tracks
- Distribution maps of target species.
- Biomass estimates of target species
- Catch results
- Length frequency distributions for target species
- Sa values from intercalibrations.

The intercalibration exercises were carried out according to standard procedure, with one vessel 0.5 NM ahead of the other, and 0.5 degrees offset at starboard side (Figure 1). The course tracks included whenever possible shallow and deep waters with areas of high fish concentrations.

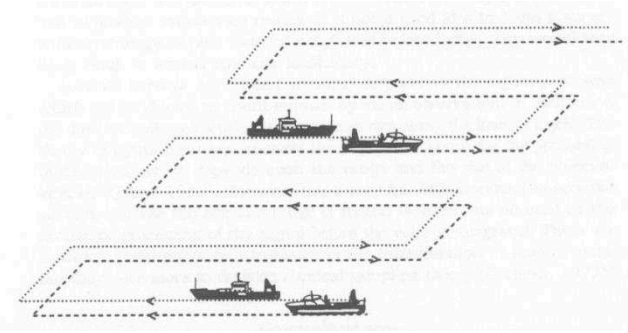


**Figure 1**: Diagram of the parallel survey design.

For each intercalibration, total $S_A$-values per nautical mile sailed by the two vessels and the correlation between the nautical mile values recorded by the vessels are recorded, plotted and compared. It has not been always possible to reach a total duration of six hours as recommended for a good intercalibration but the exercises always lasted between four and ten hours. All vessels used EK60 Simrad echosounders to collect acoustic raw data that was processed using BI500 or BI60 software.

## 2. Results from Senegal

### *2.1 The 2004 parallel survey:*

a) Specific arrangement of the 2004 parallel survey:

During this survey, 397 nautical miles were jointly surveyed. The target species were sardinellas, horse mackerels and chub mackerel. In total 33 trawls hauls and 19 hydrographic stations were performed.

b) Biomass estimates:

The total biomass estimates obtained by the Itaf Deme and F. Nansen (Table 1) are close, ~~r~~eflecting the fact that a similar acoustic energy was received by the two vessels. The ratio between estimated total biomasses was 1.2. The differences in estimated biomass by target species can be explained as follows:

There may be difficulties to interpret echograms in this area because of mixed plankton and high number of species in the Senegalese area.

Onboard the Itaf Deme, when direct interpretation of echogram can't be performed, the trawling does not always give enough information to allow good allocation of species.

c) 2004 intercalibrations:

Two intercalibration exercises had been performed in 2004. The software used for interpretation was BI500. A minimum Sv threshold of -79db was used by both vessels. The first intercalibration (Figure 2) has given close results between Itaf Deme and F. Nansen as shown in the table below presenting total $S_A$-values, average and standard deviation from the ships:

Table 2 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | F. Nansen | Ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 338323 | 450101 | 1.33 |
| Average | 3192 | 4129 | 1.29 |
| Standard dev. | 3610 | 4778 | |

A linear regression was made between the two data sets. According to the regression, the relation between the biomass estimated by the two vessels was:

F. Nansen= 1.1832 Itaf Deme +326.97 with R=0.88

The second intercalibration (Figure 3) had confirmed those results. According to the regression made between the two data sets, the relation between the biomass estimated by the two vessels was:

F. Nansen= 1.0017 Itaf Deme +202.8 with R=0.95

The software used onboard Itaf Deme for interpretation was BI500. The minimum Sv threshold of -79db was used by both vessels. The values obtained by the F. Nansen values were very similar to those of Itaf Deme. The difference was not significant and it was concluded that the two vessels had similar acoustic performance.

2.2 The 2005 parallel survey

a) Specific arrangement of the 2005 parallel survey:

In total, 1309 nautical miles were jointly surveyed, of which 277 nautical miles in Gambian waters. The target species were sardinellas, horse mackerels and chub mackerel. 28 trawl hauls were performed, of which 14 bottom trawls, 2 trawls with floats and 12 pelagic trawls. 53 hydrographic stations were also performed. The target strength (TS) of herring were used for biomass estimates.

b) Biomass estimates:

The total biomass estimates from Itaf Deme and F. Nansen (Table 3) are close with a ratio of 1.13, representing a noticeable amelioration from the 2004 result (1.2). Biomass in Gambia represented 31% of total biomass on Itaf Deme and 37% of total biomass on F. Nansen.

c) 2005 intercalibrations:

Several intercalibration exercises were conducted as part of the parallel survey with the F. Nansen. Generally, at least two exercises were made with each vessel. Several problems were encountered that complicated the initial data analysis. These have been listed below.

Different Sv thresholds. The vessels had been using different minimum Sv threshold when scrutinizing and exporting data. These ranged from –70 db to –79db. It has been suggested that a minimum threshold of –79 db be used for all vessels in the future.

Bottom fish detection. Settings in the bottom detection algorithm may affect what is detected as fish close to the bottom. A general recommendation was difficult to give but it was underlined that the operator should alert when scrutinizing fish close to the bottom.

Software issues: Morocco had used the same –Sv threshold as the F. Nansen (-79 db). However the export function in the BI60 software v 2.1.0 had a bug, and it was decided to upgrade the software to v2.1.1 for all analyses of acoustic data in the region.

Because of these problems, each country had to re-examine its intercalibration data with a minimum threshold of –79 db in order to have comparable results. As an example of the

difference introduced to the total estimate by using different minimum Sv threshold, the intercalibration data for Senegal has been analysed twice, and two different datasets and results are presented below.

d) Analyses with different Sv thresholds (F. Nansen versus Itaf Deme):

Three intercalibration exercises had been performed in 2005. The software used for interpretation was BI500. A minimum Sv threshold of -79db has been used onboard F. Nansen while a threshold of –70 db has been used onboard R/V Itaf Deme.

First intercalibration

The distance covered was 56 nm, from 600 m depth (offshore) to 20 m depth (inshore). The intercalibration survey was carried out according to standard procedure (cf. Figure 1). The conditions were good for inter-ship comparison. Relatively high recordings, mainly of plankton, were made offshore, while sardinella concentrations where recorded inshore at the end of the intercalibration tracks. The average recorded values were slightly higher for Dr. Fridtjof Nansen as shown in the table below.

Table 4 total SA-values, average and standard deviation from the ships:

| | Itaf Deme | F. Nansen | ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 358027 | 367339 | 1.03 |
| Average | 7783 | 8163 | 1.05 |
| Standard dev. | 10732 | 11185 | |

Figure 4a shows the recorded integrator values (total $S_A$-values per nautical mile) vs. time recorded for the two ships. Figure 4b shows the regression between the intercalibration data from the two vessels. The figures illustrate that the vessels made similar acoustic recordings during the intercalibration with generally slightly higher recordings with the F. Nansen. The higher variance may also indicate that this vessel had encountered slightly more fish schools. The relation between the biomass estimated by the two vessels was:

Itaf Deme = 0.9362 F. Nansen +294.15 with R=0.94

Second intercalibration

It was conducted off Cape Vert on the 5-6 November 2005 from 22:00 to 04:20 covering approximately 40nautical miles (Figure 5). Although northerly winds were not very strong, it made sea conditions difficult throughout the first part of the night. In addition, the two vessels did not adhere strictly to the procedures for intercalibration and moved further apart from each other than 0.5 miles. Evaluation of the data from the intercalibration suggested that they were not suitable to evaluate the difference in performance between the vessels. The Itaf Deme generally recorded higher values than the F. Nansen when going against the sea and wind, cruising seawards, and similar values after turning shoreward.

Third intercalibration

It was conducted from south of St. Louis to Cayar Canyon starting on the 8th November 2005 around midnight and lasted until 07:50 the following morning. The vessels covered a course track of approximately 72 nautical miles. The conditions were generally good for intercalibration and the vessels followed the recommended procedures. Several zig-zag transects

were conducted between bottom depths of 200 and 20 meters. During this intercalibration, the average recorded values were slightly lower for F. Nansen as shown in the table below.

Table 5 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | F. Nansen | Ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 475600 | 444400 | 0.93 |
| Average | 6606 | 6088 | 0.92 |
| Standard dev. | 5347 | 6079 | |

Figure 6a shows the recorded integrator values (total $S_A$-values per nautical mile) vs. time recorded for the two ships, and Figure 6b shows the regression between the intercalibration data from the two vessels. The figures illustrate that the vessels made similar acoustic recordings during the intercalibration with generally slightly lower recordings with F. Nansen. The higher variance recorded with F. Nansen may indicate that the vessel has encountered slightly more fish schools. Although the average $S_A$-values recorded during the third intercalibration was consistently higher for Itaf Deme than F. Nansen, the data are still comparable and the differences between the vessels are probably best explained by natural variation in the amount of encountered fish. A linear regression was made between the two data sets. The relation between the biomass estimated by the two vessels was:

F. Nansen= 0.9204 Itaf Deme +1270.4 with R=0.87

**Conclusion**

Generally the two vessels recorded the same acoustic densities and the 1st and 3rd intercalibration experiment seem to have been successful. However the first intercalibration showed that Itaf Deme recorded lower acoustic densities (average difference in $S_A$-values of -379.9) than F. Nansen while the third showed that Itaf Deme had somewhat higher acoustic recordings than F. Nansen (average difference in $S_A$-values of 517.9). The conditions were good for intercalibration during both exercises. Since the vessels used different Sv threshold settings, it is believed that both intercalibrations should have shown that Itaf Deme had somewhat higher recordings than F. Nansen during both surveys. The second intercalibration illustrates several issues. The most important is the role of the weather factor as the quality of the intercalibration is sharply reduced with bad weather. This factor affected the Itaf Deme most because of its smaller size and the absence of roll sensor onboard and drop-down keel. The second factor that may have affected the estimate was the fact that the vessels did not manage to keep equal distance at all times during this intercalibration.

e) Analyses with the same threshold (-79 db) ( F. Nansen versus Itaf Deme)

The stored raw data collected from October 2005 intercalibrations and interpreted previously by BI500 Simrad software, are now interpreted using BI 60. A minimum Sv threshold of -79db is used for both vessels.

First intercalibration

The analyse gives much higher $S_A$-values for F. Nansen as shown in the table below.

Table 6 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | F. Nansen | Ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 84044,2 | 201829,0 | 2.4 |
| Average | 2272 | 5455 | 2.4 |
| Standard dev. | 2570 | 8922 | |
| $R^2$ | | 0,42 | |
| R | | 0,65 | |

These big differences are introduced by the $S_A$ values of F. Nansen in areas with high concentrations where Itaf Deme gives relatively small Sa values (Figure 7). If we exclude these areas with high concentrations (Figure 8), the recordings for both vessels are in the same level (with a ratio of 1.07 between averages) even though the correlation factor is low (R=0.48).

Table 7 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | Dr Fridtjof Nansen | ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 34249 | 37242,2 | 1.09 |
| Average | 1317 | 1432 | 1.07 |
| Standard dev. | 1302 | 1388 | |
| $R^2$ | | 0,23 | |
| R | | 0,48 | |

Third intercalibration

The analyse gives similar Sa values for both F. Nansen and Itaf Deme (relative difference in $S_A$ of 8.32) as shown in the table below but it concerns only the beginning of the intercalibration where low concentrations were met (Figure 9). The data were unreadable for the last part of the exercise.

Table 8 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | F. Nansen | Ratio FN/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 64120 | 59196 | 0.92 |
| Average | 4275 | 3946 | 0.92 |
| Standard dev. | 1106 | 1222 | |
| R2 | | 0.54 | |
| R | | 0.73 | |

**Conclusion**

When interpreting with same threshold of -79db on both vessels and using BI60 as processing software, the average recorded values are much higher for F. Nansen (about 58.36% difference in average).

f) Intercalibrations between R/V Itaf Deme and R/V Al Awam

Two intercalibration exercises were performed between R/V Itaf Deme and R/V Al Awam, the first in March 2005 and the second in November 2007. During both exercises, a minimum Sv threshold of -79db had been used and the software for interpretation was BI 60 for both vessels.

First intercalibration

The intercalibration was done over a total distance of 48 nautical miles from shallow to deep waters, in the two directions (seaward and shoreward). The intercalibration was carried out according to standard procedure (cf. Figure 1). The intercalibration was performed during night time from 22:00 to 04:00 in the following morning. The depth ranged sampled was 20-500 m. Some results of the intercalibration are given in the table below and Figure 10 showing the level of integrator values (total $S_A$ per nautical mile) along the course line for the two ships.

Table 9 total SA-values, average and standard deviation from the ships:

| | Itaf Deme | Al Awam | ratio AW/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 76332 | 107783 | 1.42 |
| Average | 1527 | 2156 | 1.41 |
| Standard dev. | 1418 | 2288 | |

Figure 10 shows a bad correlation between the two vessels in deep waters (from time 00:23 to 00:42 corresponding to depth >220m). This is due to the fact that the R/V Itaf Deme's integrator was set to operate only from 0 to 220m deep. When we exclude the data from deep waters (depths <220m, see Figure 11, we have the results shown in the text table below.

Table 10 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | Al Awam | Ratio AW/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 67910 | 67449 | 0.99 |
| Average | 1698 | 1686 | 0.99 |
| Standard dev. | 1516 | 2123 | |

Even if the correlation coefficient is still bad (R=0,05; Figure12), we can see from this table that, on average, the two vessels had met the same concentrations, but not simultaneously. Accordingly, it may be concluded that the two vessels have equal performance. This must be confirmed by other intercalibrations. In addition, an intercalibration with more homogeneous population, in depths less than 220 meters has been recommended for the future.

Second intercalibration

The results of the intercalibration are shown in the table below:

Table 11 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Itaf Deme | Al Awam | ratio AW/ID |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 127389 | 221830 | 1.70 |
| Average | 2498 | 44376 | 1.63 |
| Standard dev. | 1995 | 3243 | |

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for R/V "Itaf Deme" and R/V "Al Awam" during this intercalibration, are shown in Figure 13. A linear regression was made between the two data sets (Figure 14). According to the regression, the relation between the biomass estimated by the two vessels were

Al Awam = 1,0822 Itaf Deme + 1716,3 with R=0.67.

Conclusions on the Itaf Deme intercalibrations

Since 2006, the $S_A$ values recorded by the Itaf Deme have been relatively low compared with those from R/V F. Nansen. The ratio between total biomass averages rises from 1.29 in 2005 to 2.4 in 2006. The $S_A$ values recorded by Itaf Deme are also lower than those from the Al Awam with a ratio around 1.63. The acoustic response of the echosounder has been updated by calibration of the equipment onboard the Itaf Deme but this cannot explain such a reduction in the $S_A$ values registered by Itaf Deme since the interpretation concerned the same raw data stored from ER60 sounder. As the only significant change operated in 2006 was the use of the BI60 software for scrutinizing raw data, it may be concluded that it is this change that has generated the reduction in $S_A$ values registered by the Itaf Deme.

## 3. Results from Mauritania

3.1 The 2004 parallel survey:

a) Specific arrangement of the 2004 parallel survey

A distance of 1200 nautical miles was jointly covered. Target species were: sardinella, anchovy, sardine, mackerel and horse mackerels. 27 trawls hauls were performed. The target Strength (TS) used for biomass estimates was that for herring.

b) Biomass estimates:

Biomass estimates of species and groups of species (Table 12) are relatively different for the two vessels: The ratio between the total biomass estimated by the two vessels is 0.39 and the highest difference is for flat sardinella (Sardinella maderensis) with a ratio of 0.16. The differences in biomass estimates may be partly explained by the differences in catch composition. It can be seen that Al Awam samples reflect apparently better the small individuals than Dr Fridtjof Nansen which seems to sample bigger fishes. This may be due to the limited speed of Al Awam, the engine of which was overheating and could not reach 4 knots. In

addition, big individuals of horse mackerel are underestimated by Al Awam because its maximum fishing depth is 100 m

c) 2004 intercalibrations:

Two intercalibration exercises were performed with the F. Nansen.. Only the first one gave acceptable results.

First intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed by F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration are shown in Figure 15 . A ratio of 1.41 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the text table below

Table 13 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Al Awam | F. Nansen | ratio FN/AW |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 97369 | 137610 | 1.41 |
| Average | 2562 | 3719 | 1.45 |
| Standard dev. | 1941 | 28489 | - |

A linear regression was made between the two data sets. The relation between the biomass estimated by the two vessels is:

F. Nansen = 0,956 Al Awam + 1207 with R=0.75

The $S_A$ values registered from Al Awam are lower than those from the F. Nansen with a difference of around 30 %.

3.2 The 2005 parallel survey

a) Specific arrangement of the 2004 parallel survey

A distance of 1200 nautical miles was jointly surveyed. Due to a technical problem, the last part of the Survey, from Cape Timiris was conducted two days after the Dr. Fridtjof Nansen. The target species: sardinella, anchovy, sardine, mackerel and horse mackerels. 16 trawl hauls were performed. No hydrographical stations were made. The target strength (TS) used for biomass estimates was that for herring.

b) Biomass estimates

Biomass estimates of species and groups of species (Table 14) made by the two vessels are still relatively different, as in October 2004. The ratio between the total biomass estimated by the two vessels is 0.41 and the highest difference is for sardine (Sardina Pilchardus) with a ratio of 0.23

c) 2005 intercalibrations:

Two intercalibration exercises have been performed with the F. Nansen in 2005. Only the first one gave acceptable results. The software used for interpretation was BI 60. A minimum Sv threshold of -79db was used by both vessels.

First intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed by F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration, are shown in Figure 16. ratio of 1.1 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below :

Table 15 total SA-values, average and standard deviation from the ships.

| | Al-awam | F. Nansen | ratio FN/AW |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 42659 | 46989 | 1.1 |
| Average | 2666 | 2936 | 1.1 |
| Standard dev. | 2133 | 2579 | |

A linear regression was made between the two data sets. The relation between the biomass estimated by the two vessels was:

Al awam = 0.6947 Dr. Fridtjof Nansen +625.96 with R=0.84

3.3 Comparison of intercalibrations of 2004 and 2005

The table below summarizes the results of 2004 and 2005 intercalibrations :

Table 16 Overview of results from 2004 and 2005 intercalibrations .

| | 2004 | 2005 |
|---|---|---|
| $S_A$ total Nansen / $S_A$ total Al-Awam | 1.7071 | 1.1015 |
| Mean Nansen / Mean Al-Awam | 1.4528 | 1.1012 |
| $R^2$ | 0.64 | 0.71 |
| R | 0.80 | 0.84 |

A noticeable improvement is registered between the 2004 and 2005 intercalibrations. The ratio between total $S_A$ is 1.1 in 2005, compared to 1.7 in 2004. In addition, the coefficient of correlation had improved from 0.63 to 0.70.

3.4 Intercalibration with Al Awam with Al Amir

The exercise was performed in November 2007. The course tracks followed by the two vessels (Figure 17a) cover shallow and deep waters. The total $S_A$ -values per nautical mile sailed for Al Amir and Al Awam during the first intercalibration are shown in Figure 17b. A linear regression (Figure 18) was made between the two data sets. The relation between the biomass estimated by the two vessels was:

Al Amir = 0.5 Al Awam + 873 with R= 0,74

3.5 Conclusion on N/O Al Awam intercalibrations

A noticeable improvement is registered between the 2004 and 2005 intercalibrations for Al Awam even through its recordings are still lower than those from the F. Nansen.

## 4. Results from Morocco

4.1 The 2004 parallel survey:

a) Specific arrangement of the 2004 parallel survey:

A distance of 1400 miles was jointly covered. The target species were: sardine, anchovy, mackerel and horse mackerel. 24 trawl hauls were performed. The target strength (TS) used for biomass estimates was that of herring.

b) Biomass estimates :

The total biomass estimates obtained from Al Amir and F. Nansen (Table 17) are quite close. The ratio between the total biomasses is 0.87. A high difference is found between the estimated biomass of horse mackerel

c) 2004 intercalibrations:

Four intercalibration exercises had been performed in 2004 with the F. Nansen. The software used for interpretation was BI500. A minimum Sv threshold of -79db was used by both vessels. The results are summarized below

First intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for the F. Nansen and Al Amir during the first intercalibration, are shown in Figure 19. A ratio of 1.02 is found between the average estimated biomasses from the two vessels as shown in the table below:

Table 18 total $S_A$-values and average from the ships.

| | Al-Amir | F.Nansen | ratio FN/AM |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 154734 | 158517 | 1.03 |
| Average | 2668 | 2733 | 1.02 |

According to the regression (Figure 20), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Amir = 0.8712 F. Nansen + 286,86 with R=0.9

Second intercalibration

The total sA-values per nautical mile sailed for Dr Fridtjof Nansen and R/V "Al Awam" during the first intercalibration, are shown in figure 21. A ratio of 1.37 is found between the averages of the esItmated biomass by the two vessels as shown in the table below:

Table 19 total $S_A$-values and average from the ships.

| | Al-Amir | F.Nansen | ratio FN/AM |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 159539 | 218792 | 1.37 |
| Average | 3468 | 4756 | 1.37 |

. According to the regression (Figure 22), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.7808 F. Nansen + 245.47 with R= 0.97

Third intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration are shown in Figure 23. A ratio of 1.06 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below:

Table 20 total $S_A$-values, average and standard deviation from the ships.

| | Al-Amir | Dr.F.Nansen | ratio FN/AM |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 165463 | 175102 | 1.05 |
| Average | 3848 | 4072 | 1.06 |

According to the regression (Figure 24) the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.7705 F.Nansen + 710,48 with R=0.73

Fourth intercalibration:

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration, are shown in Figure 25. A ratio of 1.19 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below :

Table 21 total $S_A$-values and average from the ships.

| | Al-Amir | Dr.F.Nansen | ratio FN/AM |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ sum | 82255 | 98514 | 1.19 |
| Average | 3290 | 3941 | 1.19 |

According to the regression (Figure 26), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.1657 F. Nansen + 2637.4 with R= 0.2

4.2 The 2005 parallel survey :

a) Specific arrangement of the 2004 parallel survey:

A distance of 2239 nautical miles was covered. The target species were sardine, anchovy, mackerel and horse mackerel. 33 trawl hauls were made. 54 biological samples were collected. No hydrographical stations were made. The herring target strength was used for biomass estimates.

b) Biomass estimates:

The biomass estimated by each vessel from Cape Blanc to Cape Bojador is presented in Table 22. The ratio between the total biomasses is 0.72, with a noticeable shift compared to 0.87 in 2004. The biomass ratio for horse mackerel 0.33 is now inversed compared to 2004 where it was 42.5. The values for anchovy are still higher with Al Amir than F. Nansen.

c) The 2005 intercalibrations:

First intercalibrations

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration, are shown in Figure 27. A ratio of 0.1 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below :

Table 23 total $S_A$-values and average from the ships:

| | Al-Amir | F.Nansen | ratio FN/AM |
|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 79441 | 8214,9 | 0.1 |
| Average | 1986 | 205 | 0.1 |

According to the regression (Figure 28), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.0595 F. Nansen + 87.145 with R= 0.5

Second intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration, are shown in Figure 29. A ratio of 2.86 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below :

Table 24 total $S_A$-values and average from the ships:

| | Al-Amir | Dr.F.Nansen | Ratio FN/AM | % |
|---|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 97412 | 278837 | 2.86 | 65,06 |
| Average | 1680 | 4807 | 2.86 | 65,06 |

According to the regression (Figure 30), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.1366 F. Nansen + 993.01 with R= 0,5

Third intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration are shown in Figure 31. A ratio of 3.9 is found between the averages of the estmated biomass by the two vessels as shown in the table below :

Table 25 total $S_A$-values and average from the ships:

| | Al-Amir | Dr.F.Nansen | ratio FN/AM | % |
|---|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 41007 | 158993 | 3.9 | 74,21 |
| Average | 954 | 3698 | 3.9 | 74,21 |

According to the regression (Figure 32), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.0043 F. Nansen + 937,84 with R= 0,06

Fourth intercalibration

The total $S_A$ values per nautical mile sailed for F. Nansen and Al Awam during the first intercalibration are shown in Figure 33. A ratio of 5.6 is found between the averages of the estimated biomass by the two vessels as shown in the table below:

Table 26 total $S_A$-values and average from the ships.

| | Al-Amir | F. Nansen | Ratio FN/AM | % |
|---|---|---|---|---|
| Total $S_A$ | 65626 | 368700 | 5.6 | 82,20 |
| Average | 2524 | 14181 | 5.6 | 82,20 |

According to the regression (Figure 34), the relation between the biomass estimated by the two vessels is:

Al Amir = 0.0765 F. Nansen + 1438,6 with R= 0,56

## Discussion

The results from intercalibrations in 2004 and 2005 are very similar between the research vessels Al Amir and Itaf Deme and give comparable acoustic response with the Dr F. Nansen. In the same period, Al Awam had improved its performance from a 29% difference in $S_A$ values with the F. Nansen to a 9% difference only. The last intercalibration between Al Awam and F. Nansen give similar acoustic responses for both vessels. From these first exercises, it appears that the $S_A$ values from the local vessels are comparable with those from the F. Nansen.

However, the last analyses in Senegal for the 2005 intercalibration and those in Morocco for 2006 give results that need to be confirmed by further exercises. In Senegal, the differences found with the F. Nansen during the second analysis using the BI60 software seem to be related to the use of this software with which $S_A$ values drop by more than 6 db compared to values obtained with the BI500 software. In Morocco the important decrease of $S_A$ values registered during 2006 intercalibrations seems to be related with weather conditions. A strong wind was registered during the exercise and this factor affects Al Amir most because of its smaller size and lack of stabilizing equipment.

Total biomass estimates made by Itaf Deme, Al Amir and F. Nansen are generally comparable. Differences in biomass estimates in Mauritania may be partly explained by the differences in catch composition: Al Awam seems able to better sample the small individuals (or is less able to catch the larger ones) than F. Nansen. This may be due to the limited speed of Al Awam that could not reach 4 knots. The other factor is that big individuals of horse mackerel are underestimated by Al Awam because its maximum fishing depth is 100 m.

The main conclusion from these intercalibration exercises is that local vessels have ability to jointly conduct regional surveys to complement and eventually replace the F. Nansen. The total comparability between the local vessels may be reached after more exercises, readjustments and improvements in trawling performance. Standardisation in methods use for scrutinizing echosounder records, installation of blister on the keels to reduce weather effect, regularly performing intercalibrations betweens vessels of the subregion are all factors that will improve comparability between local vessels. The efforts of acoustic scientists in the region are oriented to these issues to finally have reliable coordinated acoustic surveys.

## References:


Anon. 1998. Report of the Workshop on the Review of the Pelagic Surveys off Northwest Africa in the 1990s. Bergen, Norway, 28 September-2 October 1998. FAO Fish. Rep./FAO Rapp. Pêches, 592: 63 pp.

Anon. 2001. Report of the FAO Working Group on the Assessment of Small Pelagic Fish off Northwest Africa. Nouadhibou, Mauritania, 24-31/03/2001. FAO Fish. Rep., 657: 133 p

Charouki N., El Ayoubi S., Sarré A., Mahmoud E. M., Taleb- M. A. O., Jallow J., Krakstad J.-O., Alvheim O. 2005. Report on the parallel survey and Intercalibration - 30 October to 1 December 2005. Report of the Workshop on the North West African Small Pelagic Resources - Saly, Senegal, 263/3-1/4/2006

El Ayoubi S., Chbani M., Charouki N., Taleb- M. A. O. 2008. Analyses des intercalibrations 2005 – 2006 – 2007 et de la campagne parallèle 2006. Report of the Workshop on the North West African Small Pelagic Resources, Casablanca, Morocco, 02/2008

Sarré A., Chbani M., Mahmoud E. M., Mbye E. M, J., Krakstad J.-O., Alvheim O. 2005. Report on the parallel survey and Intercalibration - 25 October – 10 December 2004. Report on the Workshop on the North West African Small Pelagic Resources, Casablanca, Morocco, 25-29/1/2005.

Sarré A. et Samb B. 2004. Evaluation des stocks de poissons pélagiques le long des côtes sénégambiennes 25 octobre au 03 novembre 2004 : 36 p

Sarré A. et Samb B. 2005. Evaluation des stocks de poissons pélagiques le long des côtes sénégambiennes du 31 octobre au 11 novembre 2005 : 34 p

Taleb- M. A. O., El Ayoubi S., Sarré A. 2007. Mesures de l'index de réflexion 'Target Strength' de la sardinelle ronde. Nouadhibou, Mauritanie 1–5/10/2007


## Tables

Table 1. Senegal 2004 parallel survey. Biomass estimates by area calculated from Itaf Deme (ID) and F. Nansen (FN) respectively. Data in thousand tonnes.

| Species | R/V. Itaf Deme | | | | Ratio; ID/FN(1) | R/V. Dr. Fridtjof Nansen (2) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Casamance | Central | North | Total | | Casamance | Gambia | Gambia - C.Vert | Cap Vert St Louis | Total |
| S. maderensis | 185 | 80 | 6.2 | 271 | 0.61 | 249 | 107 | 154 | 39 | 548 |
| S. aurita | 140 | 92 | 23 | 255 | 1.02 | 117 | 21 | 108 | 25 | 270 |
| Horse mackerels | 52 | 128 | 7 | 187 | 3.97 | 0 | 29 | 33 | 15 | 76 |
| Mackerel | 3 | 22 | 4 | 28 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Other pelagics (3) | 151 | 140 | 46 | 337 | 2.15 | 58 | 56 | 79 | 20 | 212 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Total | 531 | 461 | 86 | 1078 | 1.21 | 424 | 213 | 374 | 99 | 1106 |

Note: (1) Senegal only. (2)The data for Gambia is excluded from the ratio FN/ID. The Gambia/C.Vert and Cap Vert-St Louis areas for the Nansen correspond respectively to the central and North areas for the Itaff Deme. (3) Scomber sp. is included in "Other pelagics"

Table 3. Senegal 2005 parallel survey Biomass estimates per area calculated from Itaf Deme (ID) and Dr. Fridtjof Nansen (FN) respectively. Data in thousand tonnes.

| Species | R/V. Itaf Deme | | | | | Ratio; ID/FN | R/V. Dr. Fridtjof Nansen | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Casamance | Gambia | Gambia-C.Vert | C.Vert - St Louis | Total | | Casamance | Gambia | Gambia - C.Vert | C.Vert-StLouis | Total |
| Sardinella maderensis | 396 | 127 | 99 | 0.13 | 622.2 | **1,14** | 201 | 188 | 148 | 8 | 545 |
| S. aurita | 2 | 8 | 87 | 0.7 | 97.8 | **0,35** | 19 | 73 | 191 | - | 283 |
| Horse mackerels | 2 | 125 | 35 | 42 | 204.8 | **1,77** | 3. | 4 | 12 | 97 | 116 |
| Chub Mackerel | - | - | 0.2 | - | 0.2 | **-** | - | - | - | - | - |
| Other pelagics | 76 | 107 | 69 | 17 | 269.8 | **2,35** | 59 | 19 | 26 | 11 | 115 |
| Total | 476.1 | 368.24 | 289.79 | 60.65 | 1194.8 | **1,13** | 279 | 284 | 377 | 116 | 1059 |

Table 12 Mauritania 2004 parallel survey Biomass estimates per area calculated from Al Awam(AW)and Dr. Fridtjof Nansen (NAN) respectively. Data in thousand tonnes.. S. MAD: Sardinella maderensis; S. AUR: Sardinella aurita; PILCH: Sardina pilchardus; H. MACK: Chinchards (Trachurus trecae, Trachurus trachurus, Decapterus rhonchus); ANCH. Engraulis encrasicolus, O / PEL: autres pélagiques

| | R/V. AL. AWAM | | | **Ratio AW/NAN** | R/V. Dr. Fridtjof NANSEN | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Species | St. Louis – C. Timiris | C. Timiris – C. Blanc | TOTAL | % | St. Louis- C. Timiris | C. Timiris – C. Blanc | TOTAL |
| S. MAD | 194.3 | 17.3 | 212 | **0.16** | 1244 | 91 | 1335 |
| S. AUR | 156.4 | 177.1 | 333 | **1.56** | 189 | 24 | 213 |
| PILCH | 48.8 | 67.4 | 93 | **0.23** | 20 | 384 | 404 |
| C. RHON | 87.1 | 3 | 90.1 | | | | |
| T. TRE | 21 | 2.7 | 23.7 | **0.29** | 29.8 | 53 | 83 |
| ANCH. | 0 | 16.2 | 16.2 | | 0 | 0 | 0 |
| O / PEL | | | 90 | **0.60** | 106 | 42 | 148 |
| TOTAL | | | 858 | **0.39** | 1588.8 | 594 | 2183 |

Table 14 Mauritania 2005 parallel survey Biomass estimates per area calculated from Al Awam(AW)and Dr. Fridtjof Nansen (NAN) respectively. Data in thousand tonnes

| | R/V. Al Awam | | | **Ratio AW/NAN** | R/V. Dr. Fridtjof Nansen | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Species | **St. Louis – C. Timiris** | **C. Timiris – C. Blanc** | TOTAL | % | **St. Louis- C. Timiris** | **C. Timiris – C. Blanc** | TOTAL |
| Sardinella maderensis | 52 | 202 | 253 | **0.48** | 302 | 225 | 527 |
| Sardinella aurita | 16 | 57 | 74 | **1.00** | 6 | 68 | 74 |
| Sardina pilchardus | 395 | 97 | 492 | **0.23** | 1075 | 1103 | 2178 |
| Engraulis encrasicolus | | 45 | 45 | **0.46** | 0 | 98 | 98 |
| Trachurus trecae | 76 | 103 | 179 | **0.90** | 106 | 92 | 198 |
| Autres Pelag | 48 | 202 | 250 | **3.85** | 62 | 3 | 65 |
| | 587 | 706 | 1293 | **0.41** | 1551 | 1589 | 3140 |

Table 17. Morocco 2004 parallel survey Biomass estimates per area calculated from Al Amir (left) and Dr. Fridtjof Nansen (right) respectively. Data in thousand tonnes.

| | Al Amir | | Total | ratio AM/FN | F. Naansen | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C.Juby-C.Ghir | C.Ghir-C.Cantin | | | C.Juby-C.Ghir | C.Ghir-C.Cantin | |
| Pilchard. | 408 | 218 | 626 | 0.75 | 627 | 210 | 837 |
| Anchovy. | 40 | 26 | 66 | 2 | 30 | 2 | 32 |
| Scomber. | 174 | 112 | 286 | 0.85 | 242 | 96 | 338 |
| H. Mackerel | 64 | 21 | 85 | 42.5 | 0 | 2 | 2 |
| Total | 686 | 377 | 1063 | 0.87 | 899 | 310 | 1209 |

Table 22. Morocco 2005 parallel survey Biomass estimates per area calculated from Al Amir (left) and Dr. Fridtjof Nansen (right) respectively. Data in thousand tonnes.

| | R/V. Al Amir | **Ratio AM/NAN** | R/V. Dr. Fridtjof Nansen |
|---|---|---|---|
| Species | **Cape Blanc to Cape Bojador** | % | **Cape Blanc to Cape Bojador** |
| Pilchard. | 4628 | **0,79** | 5830 |
| Anchovy. | 33 | **3,30** | 10 |
| Chub mackerel | 189 | **0,79** | 240 |
| horse mackerel | 370 | **0,33** | 1125 |
| Sardinella | 409 | **0.68** | 600 |
| Total | 5629 | **0,72** | 7805 |

## Figures

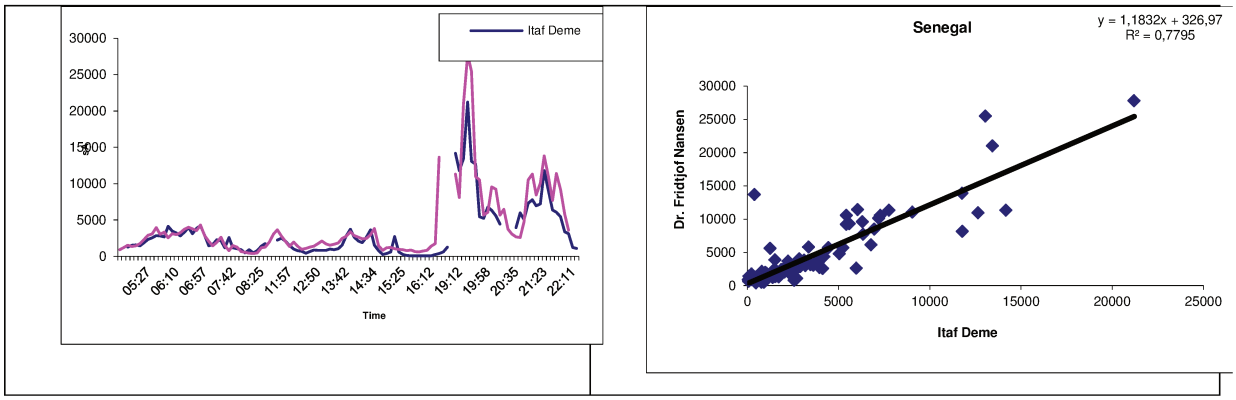



Figure 2 Senegal 2004 first intercalibration. a) Total $s_A$-values per nautical mile sailed for Itaf Deme and F. Nansen (left) and b) correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right).

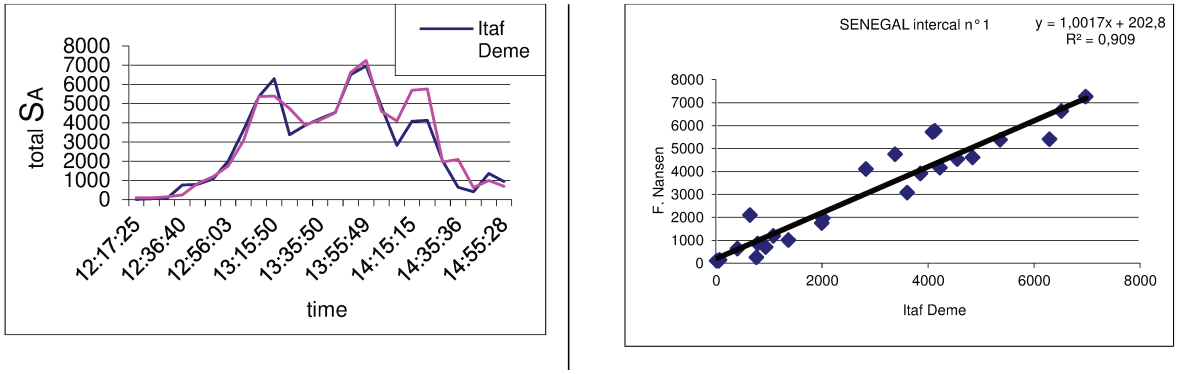



Figure 3. Senegal 2004 second intercalibration. a) Total $s_A$-values per nautical mile sailed for Itaf Deme and F. Nansen (left)and b) correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right).

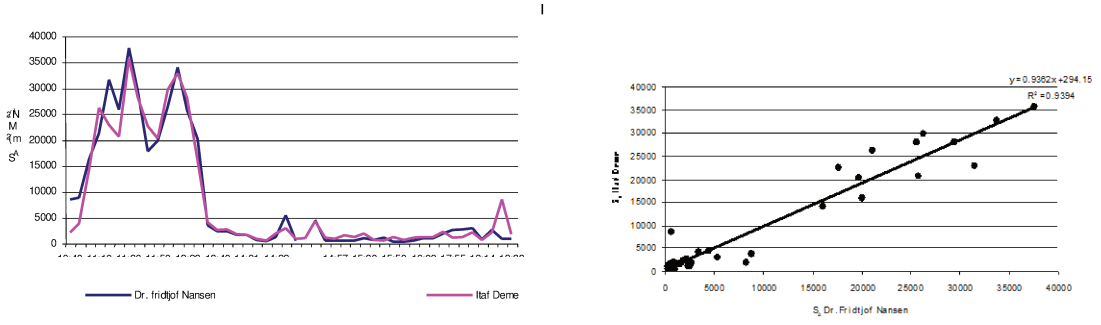



Figure 4. Senegal 2005 first intercalibration analysed with -70db threshold. a) Total $s_A$-values ($m^2/NM^2$) vs. time for R/V. Itaf Deme and R/V Dr. Fridtjof Nansen (left) and b) correlation between average $S_A$ recorded per nautical mile values recorded by the two vessels (right).

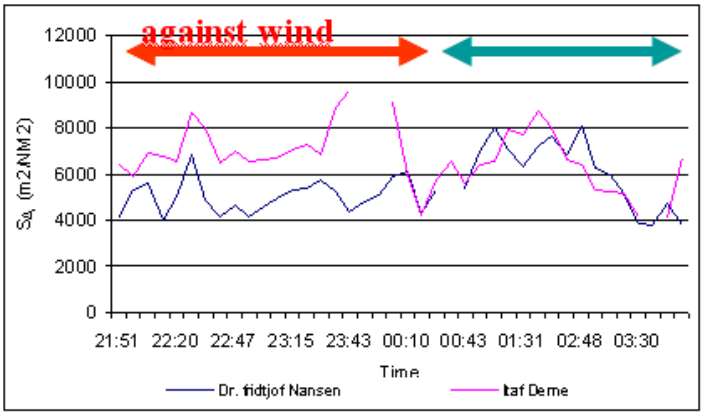



**Figure 5** Senegal 2005 second intercalibration analysed with -70db threshold.Total $s_A$-values ($m^2/NM^2$) vs. time for R/V. Itaf Deme and R/V Dr. Fridtjof Nansen

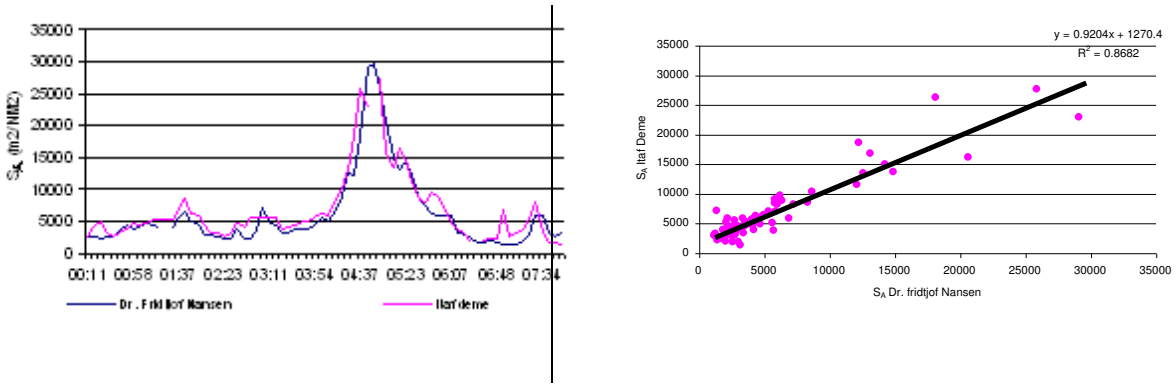



**Figure 6.** Senegal 2005 third intercalibration analysed with -70db threshold. **a)**Total $s_A$-values vs time recorded for R/V. Itaf Deme and R/V Dr. Fridtjof Nansen (left) and **b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels.(right)

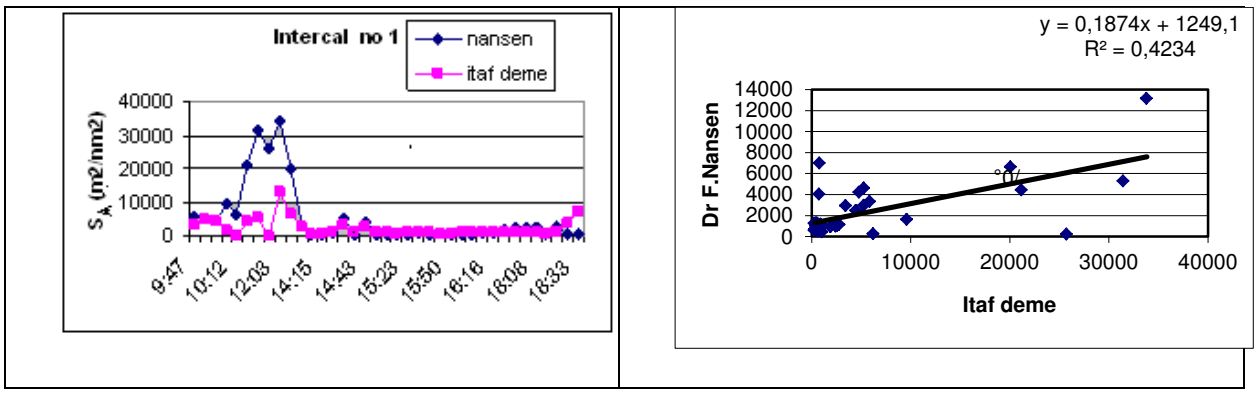



**Figure 7**. Senegal 2005 first intercalibration analysed with -79db threshold **a)** Total $s_A$-values vs time recorded for R/V. Itaf Deme and R/V Dr. Fridtjof Nansen (left)and **b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right)

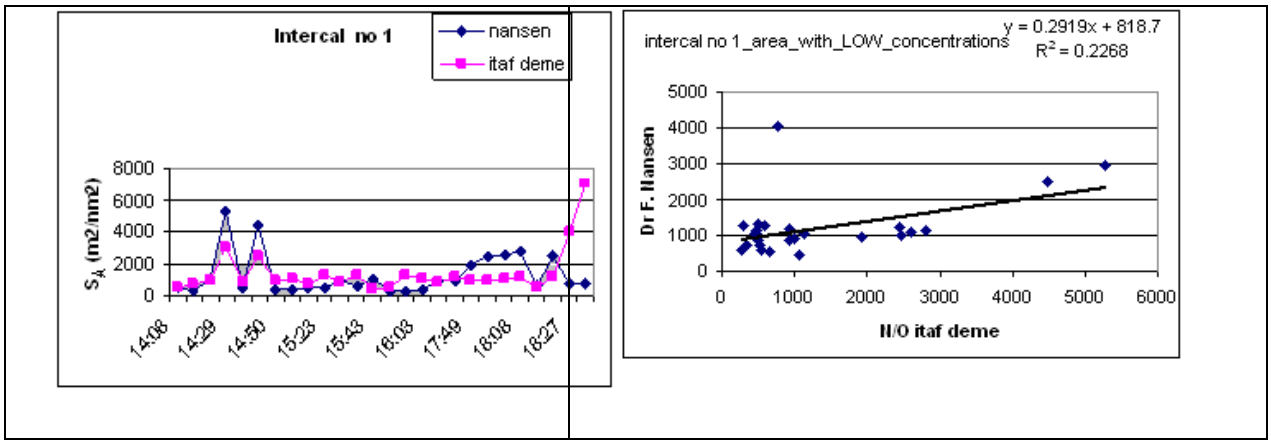



**Figure 8**. Senegal 2005 first intercalibration analysed with -79db threshold and without areas with high concentrations **a)** Total $s_A$-values vs time recorded for R/V. Itaf Deme and F. Nansen (left) and **b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right).

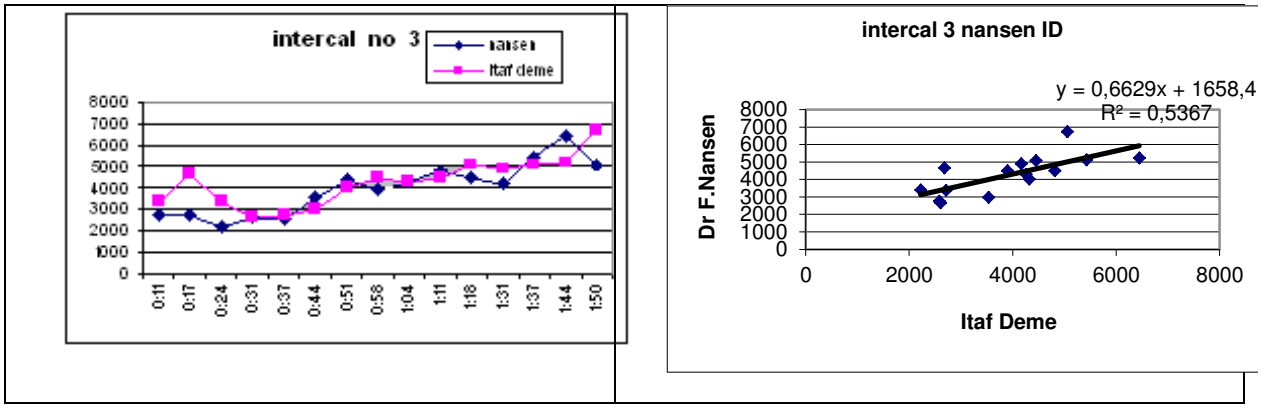



**Figure 9**. Senegal 2005 third intercalibration analysed with -79db threshold . **a)** Total $s_A$-values vs time recorded for Itaf Deme and F. Nansen (left) and **b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right).

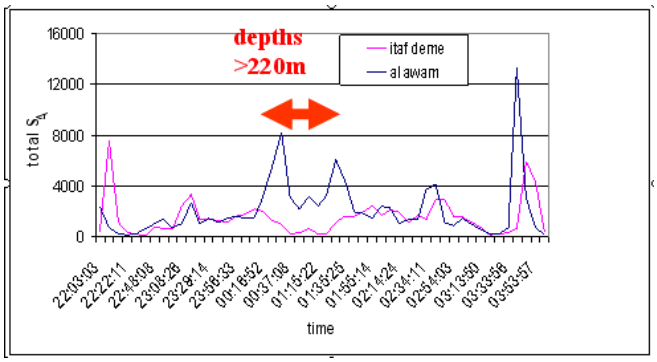



**Figure 10.** Senegal 2006 intercalibration with Mauritania: Total $s_A$-values per nautical mile sailed for Itaf Deme and Al Awam

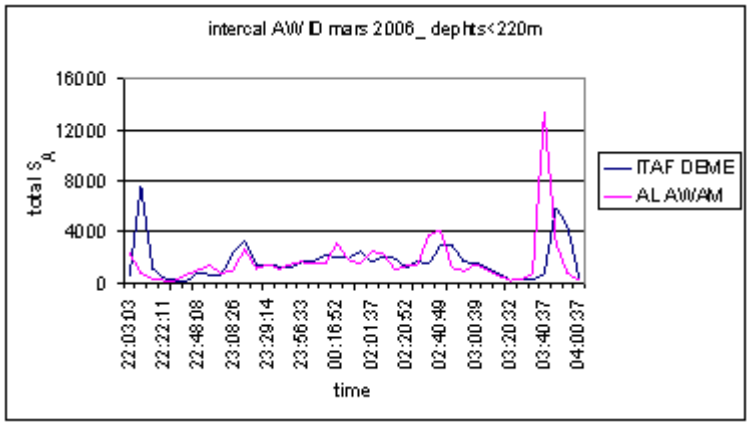



**Figure 11**. Senegal 2006 intercalibration with Mauritania and with depths > 220 meters excluded. Total $s_A$-values per nautical mile sailed for Itaf Deme and Al Awam .

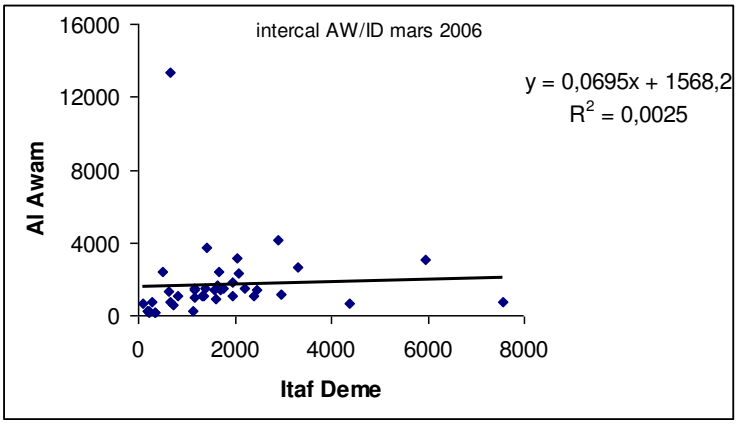



**Figure 12**. Senegal 2006 intercalibration with Mauritania and with depths > 220 meters excluded. Plot of the $s_A$-values of Itaf Deme and Al Awam.

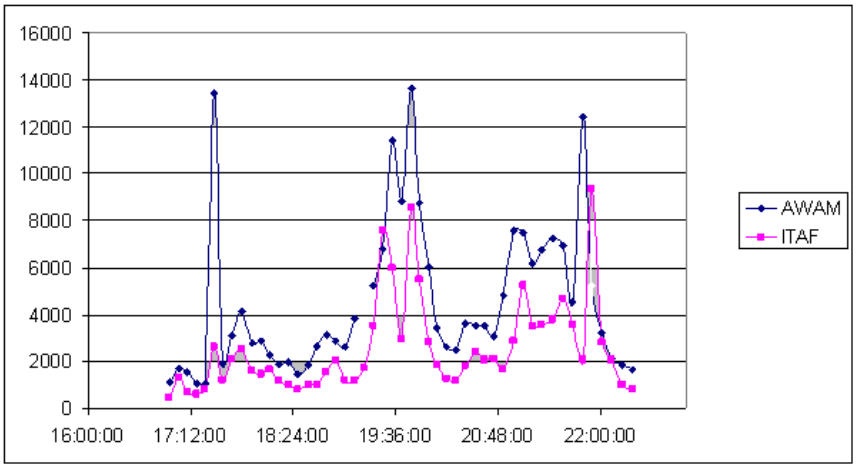



**Figure 13.** Senegal 2007 intercalibration with Mauritania. Total sA-values per nautical mile sailed for Itaf Deme and Al Awam .

.

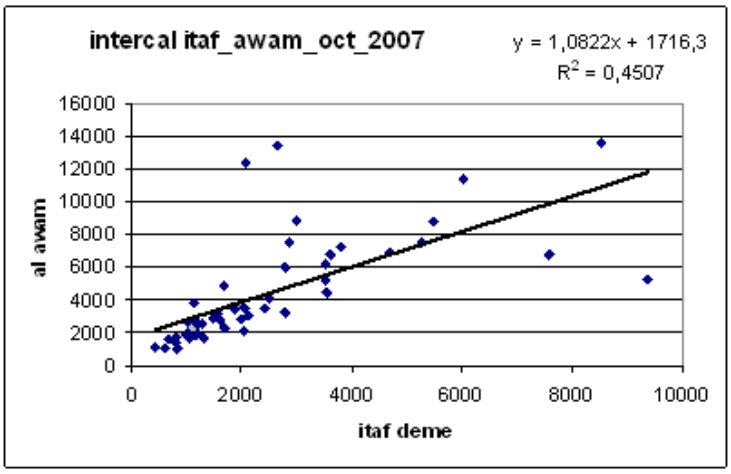



**Figure 14**. Senegal 2007 intercalibration with Mauritania. Correlation between the nautical mile values recorded by Itaf Deme and Al Awam

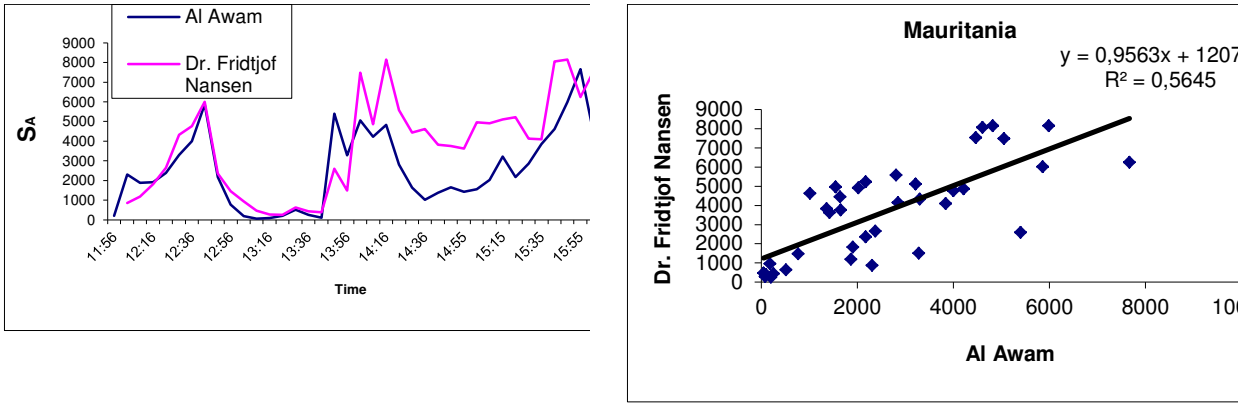



**Figure 15**. Mauritania 2004 first intercalibration **a)** Total sA-values per nautical mile sailed for R/V. "Al Awam" and R/V "Dr. Fridtjof Nansen". (left) and **b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right).

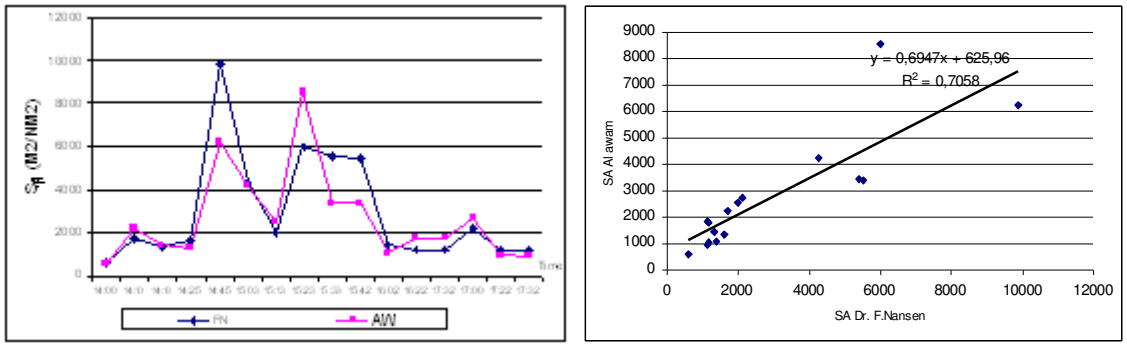



**Figure 16**. Mauritania 2004 second intercalibration -**a)** total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al awam and F. Nansen .(left). and -**b)** correlation between the nautical mile values recorded by the two vessels (right)..

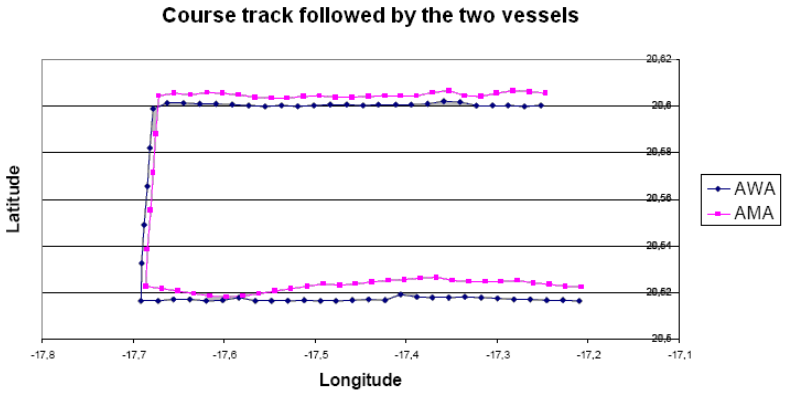



**Figure 17a**. Mauritania 2007 intercalibration with Morocco. Course tracks followed by Al Awam and Al Amir.

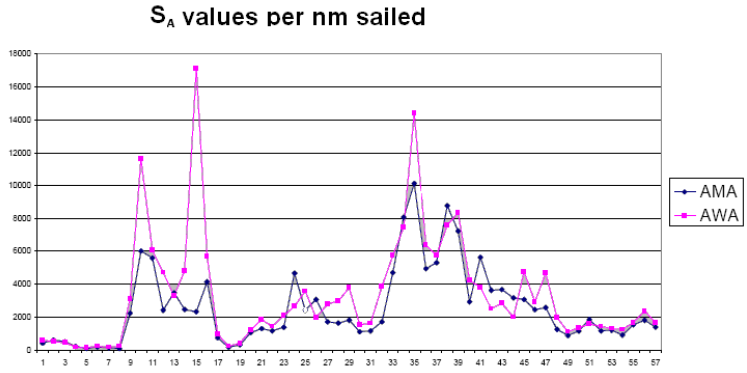



**Figure 17b** Mauritania 2007 intercalibration with Morocco - Total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al Awam and Al Amir;

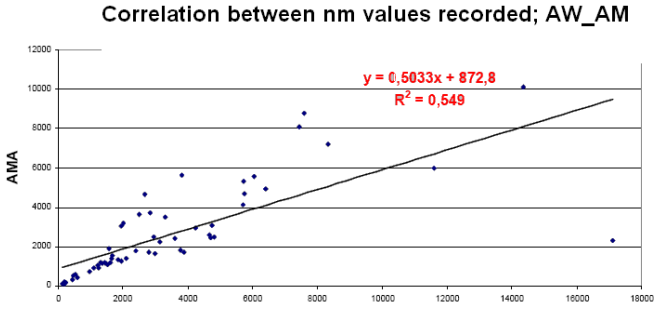



**Figure 18** Mauritania 2007 intercalibration with Morocco. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Awam and Al Amir;

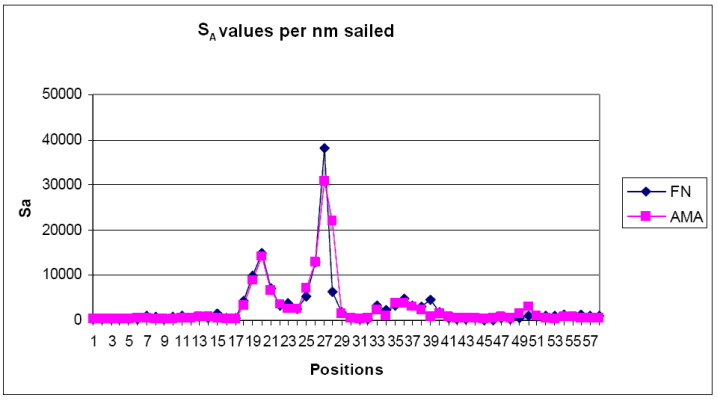



**Figure 19**-. Morocco 2004 first intercalibration Total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen ;

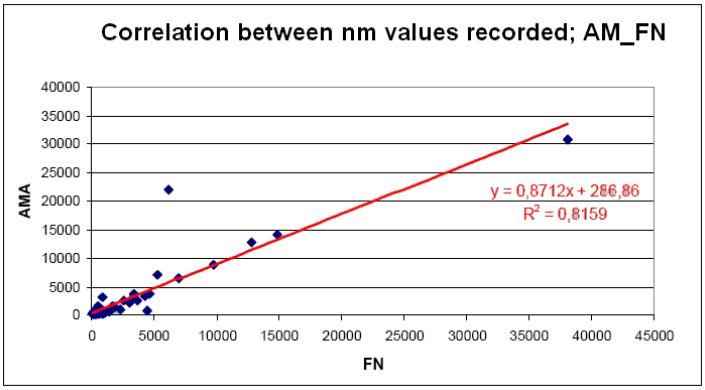



**Figure 20** Morocco 2004 first intercalibration Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen ;

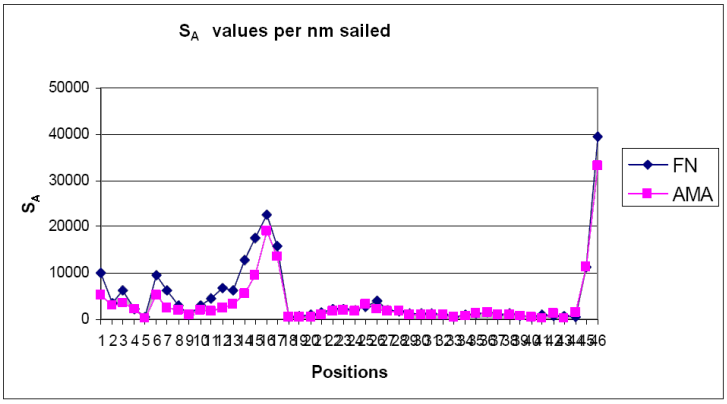



**Figure 21**- Morocco 2004 second intercalibration Total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen ;

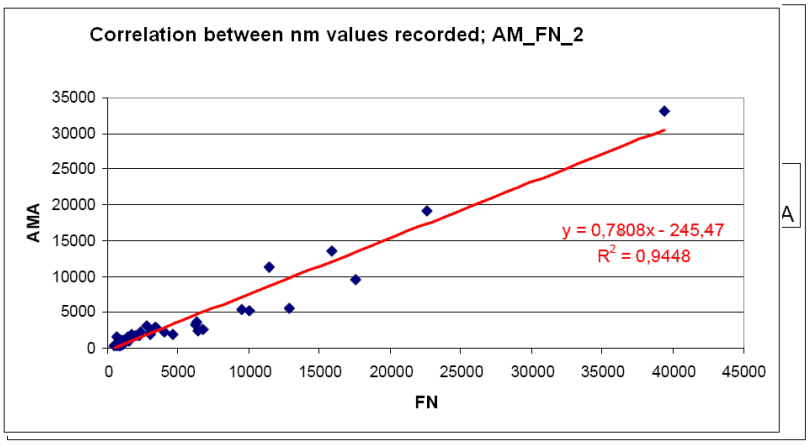



**Figure 22** Morocco 2004 second intercalibration Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen

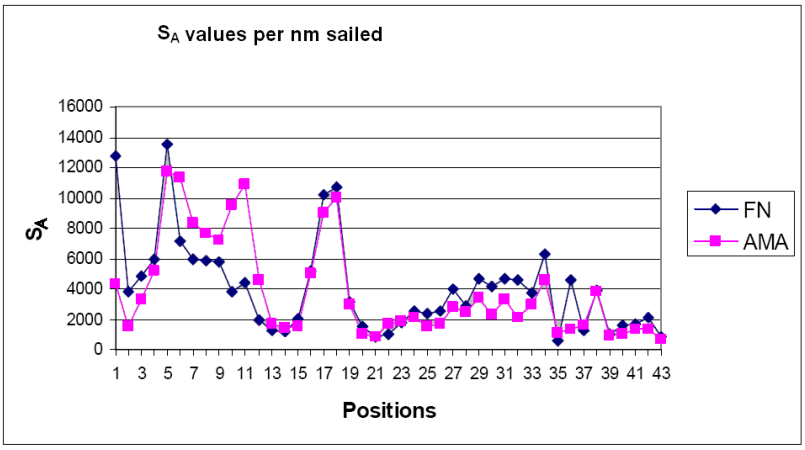



**Figure 23**- Morocco 2004 third intercalibration. Total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen

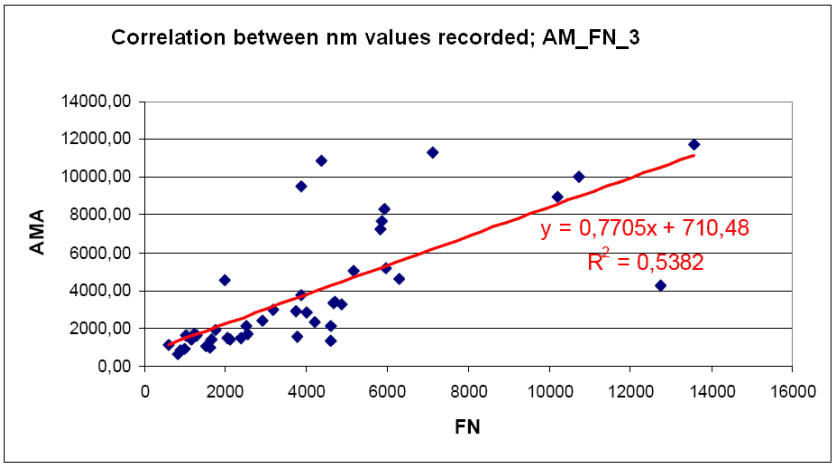



**Figure 24** Morocco 2004 third intercalibration. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen

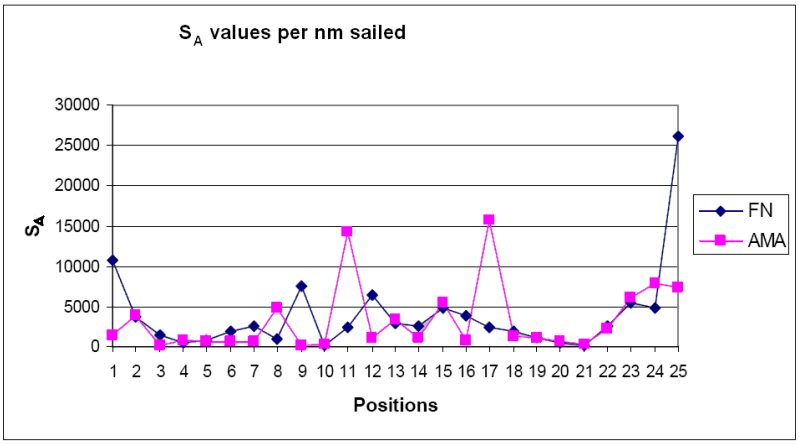



**Figure 25**- Morocco 2004 fouth intercalibration. Total $S_A$ values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen

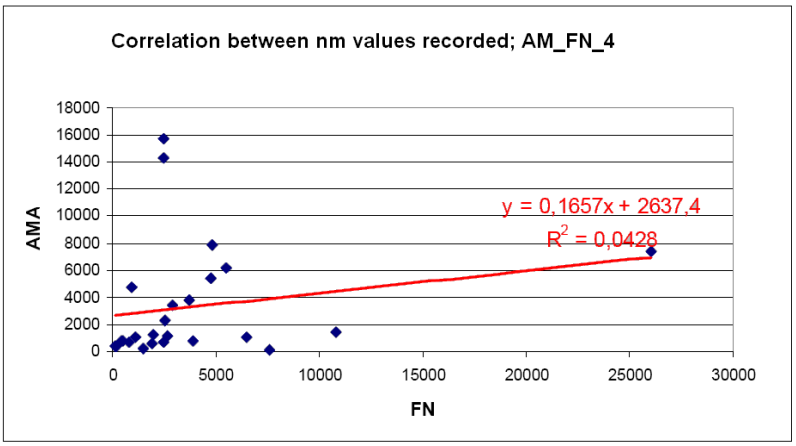



**Figure 26** Morocco 2004 fouth intercalibration. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen

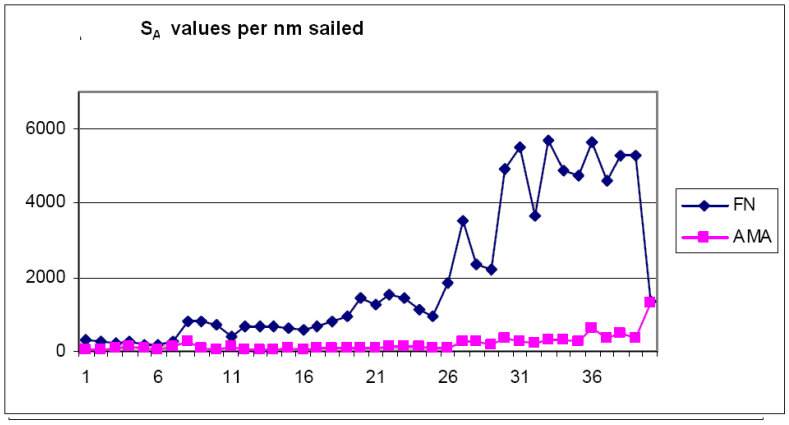



**Figure 27**- Morocco 2005 first intercalibration total SA values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen

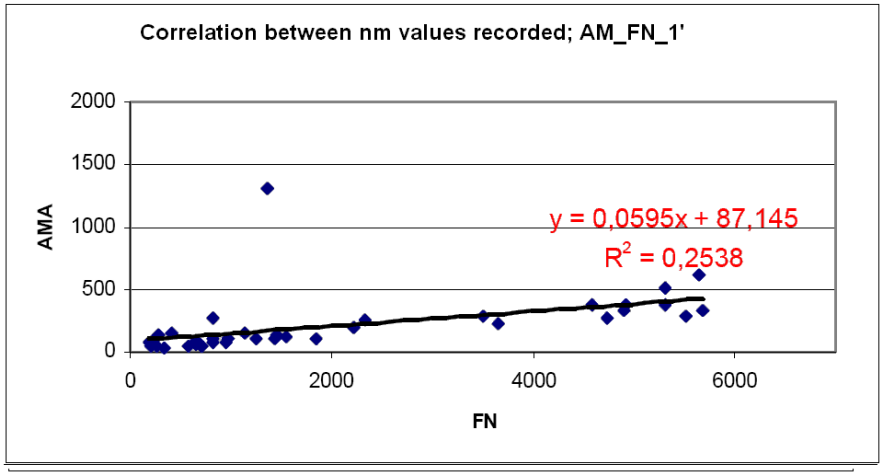



**Figure 28** Morocco 2005 first intercalibration Correlation between the nautical mile values recorded Al Amir and F. Nansen

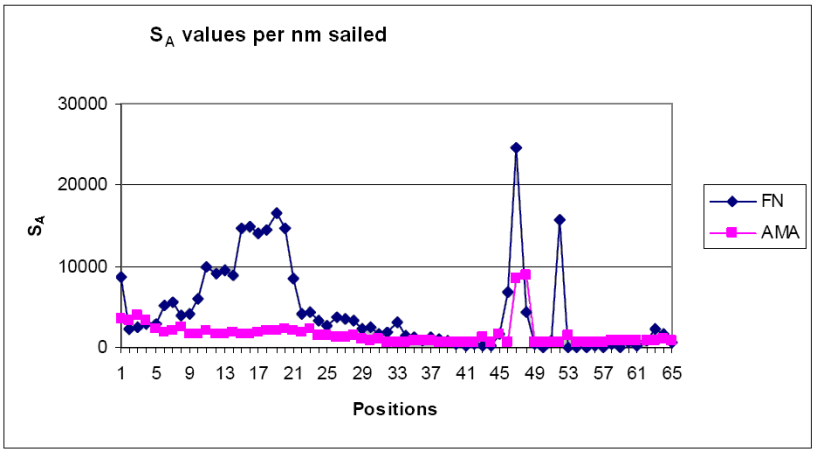



**Figure 29**- Morocco 2005 second intercalibration. Total SA values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen

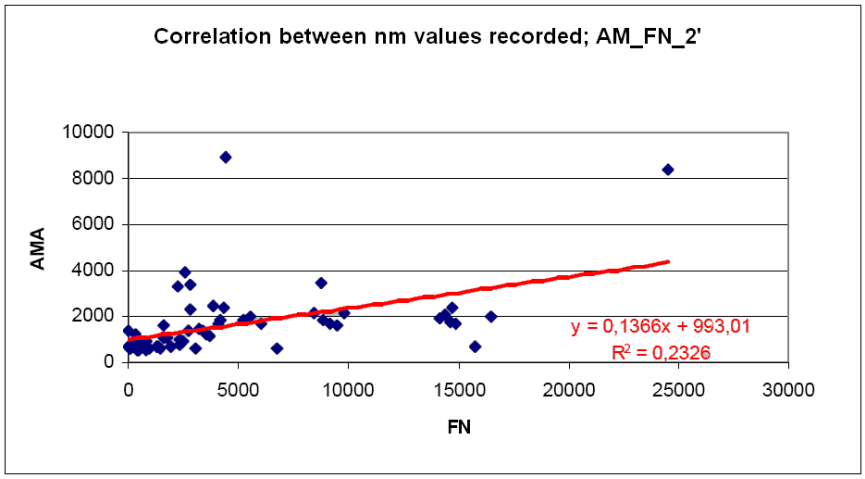



**Figure 30** Morocco 2005 second intercalibration. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen

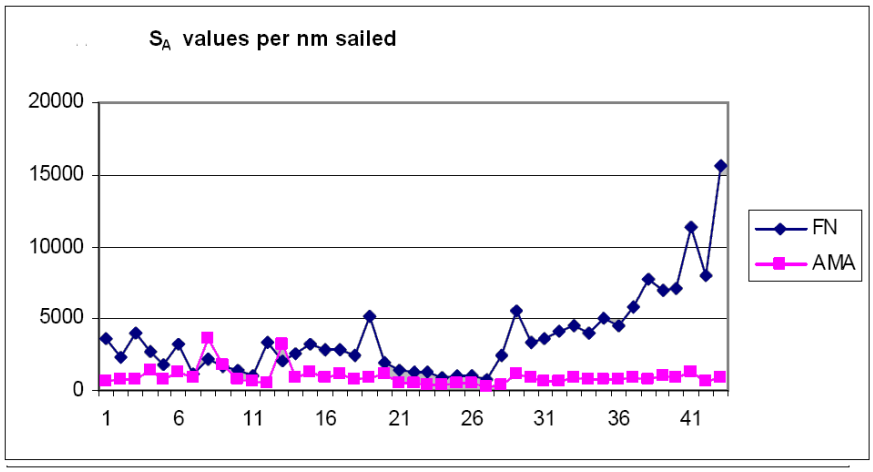



**Figure 31**- Morocco 2005 third intercalibration. Total SA values per nautical mile sailed for Al Amir and F. Nansen

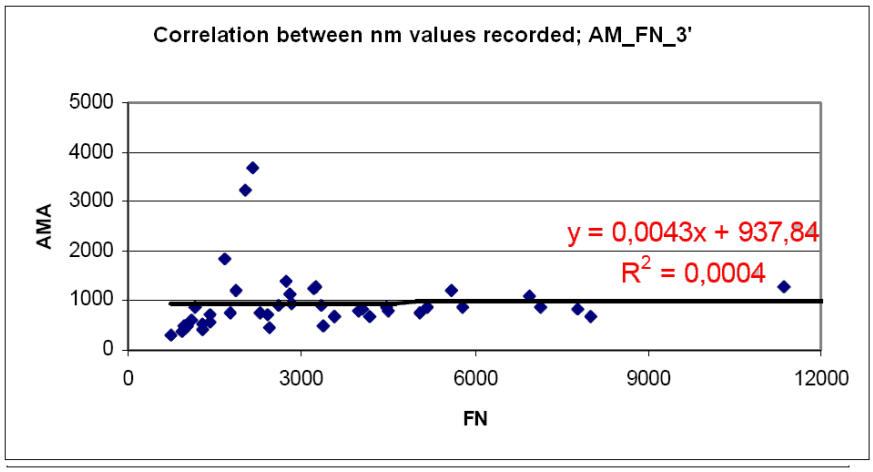



**Figure 32** Morocco 2005 third intercalibration. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen

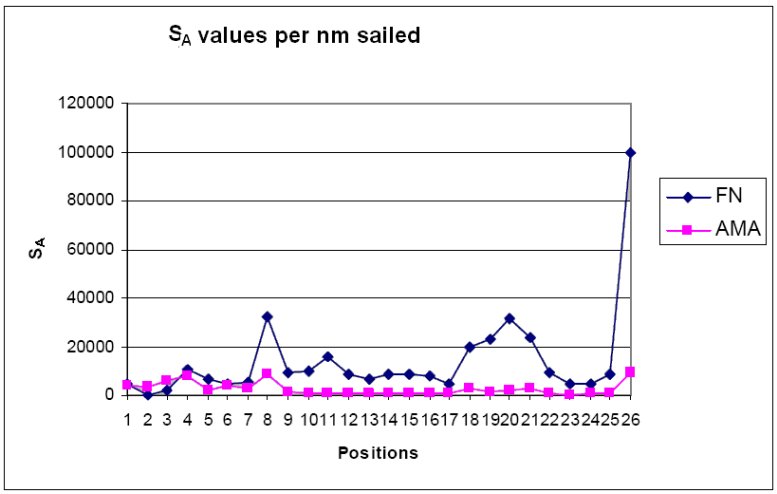



**Figure 33**-Morocco 2005 fourth intercalibration. Total $S_A$ values per nautical mile sailed Al Amir and F. Nansen

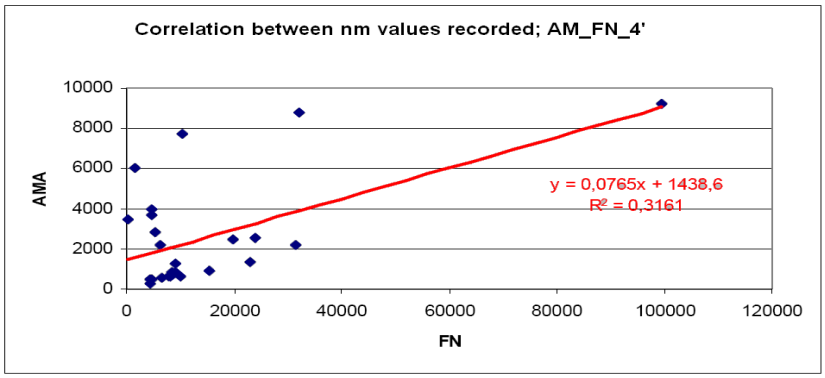



**Figure 34** Morocco 2005 fourth intercalibration. Correlation between the nautical mile values recorded by Al Amir and F. Nansen.

## 6.2.2. Contribution to acoustic targets identification in Northwest Africa by statistical schools properties

# Contribution to acoustic targets identification in Northwest Africa by statistical schools properties

**Conference Paper** · March 2008

N. Charouki[1]*, **A. Sarré[2]**, M. Serghini[1], O.S. Ebaye[3] and J.O. Krakstad

[1] Institut National de Recherche Halieutique, 2 rue de Tiznit Casablanca, Morocco <charouki@inrh.org.ma>, <serghini2002@yahoo.com>

[2] Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye, BP 2241, Dakar, Senegal <ablaysarrey@yahoo.fr>

[3] Institut Mauritanien de recherches océanographiques et des pêches, BP 22 Nouadhibou, Mauritania <ebaye_mhd@yahoo.fr>

[4] Institute of Marine Research, P.O. Box 1870 Nordnes, N-5817 Bergen, Norway <jens.otto.krakstad@imr.no>

**Charouki, N., Sarre, A. Serghini, M., Ebaye, O.S. and Krakstad, J.O.** 2011. Contribution to acoustic targets identification in Northwest Africa by statistical schools properties. In/Dans S. Garcia, M. Tandstad & A.M. Caramelo, eds. Science and Management of Small Pelagics. Symposium on Science and the Challenge of Managing Small Pelagic Fisheries on Shared Stocks in Northwest Africa, 11–14 March 2008, Casablanca, Morocco/Science et aménagement des petits pélagiques. *Symposium sur la science et le défi de l'aménagement des* pêcheries de petits pélagiques sur les stocks partagés en Afrique nord-occidentale, 11-14 mars 2008, Casablanca, Maroc, FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings/FAO Comptes rendus des pêches et de l'aquaculture, No. 18. Rome, FAO. 606 pp.

## ABSTRACT

Acoustic abundance estimation relies, among other things, on reliable specie identification. This process normally involves targeted trawling during surveys to identify the acoustic targets. The aim of this paper is to aid researchers to recognize acoustic fish targets off Northwest Africa using acoustic properties of the main small pelagic schools, Sardina pilchardus, Sardinella aurita, S. maderensis, Trachurus trecae, T. trachurus, Scomber japonicus, Engraulis encrasicolus and Decapterus rhonchus. During the R/V Dr. Fridtjof Nansen acoustic survey from Cap Cantin in Morocco to Southern border of Senegal in October–December 2003 and 2004, echograms illustrating typical monospecific school patterns were collected using the Echoview programme. Acoustic parameters and descriptors of each school were used to describe typical patterns. Statistical analysis was then carried out to define possible characterizations of the targeted species by those parameters.

**Keywords:** target identification, acoustics, Northwest Africa, echograms, target species

## Résumé

L'estimation de l »abondance par méthodes acoustiques des petits pélagiques est liée, entre autres, à l'identification fiable des espèces ciblées. Généralement, ce processus requiert l'opération des pêches de contrôle pour identifier les cibles acoustiques qui apparaissent durant la prospection. Le but de ce travail est d'aider les chercheurs à travers une collection d'échogrammes typiques, à mieux identifier les petits pélagiques ciblés dans la région nord-ouest africaine, notamment: Sardina pilchardus, Sardinella aurita, Sardinella maderensis,

Trachurus trecae, Trachurus trachurus, Scomber japonicus, Engraulis encrasicolus et Decapterus rhonchus. Durant les campagnes de prospection acoustique à bord du N/R Dr. Fridtjof Nansen en octobre-décembre 2003 et 2004 entre Cap Cantin au Maroc et la frontière sud du Sénégal, les échogrammes illustrant les bancs monospécifiques typiques sont collectés au moyen du programme Echoview. Des paramètres descriptifs sont aussi relevés pour chaque banc collecté. Des analyses statistiques sont ainsi effectuées pour mettre en évidence d'éventuelles caractérisations des espèces ciblées par ces paramètres

**Mots clés:** identification acoustique, acoustiques, Afrique du nord-ouest, échogrammes, espèces cibles.

## 1. INTRODUCTION

The Northwest African shelf is qualified to be among the world four major western upwelling ecosystems (Smith, 1984). It is one of the richest areas in pelagic resources in the world with more than 10 million tonnes of clupeids and carangids assessed in 2002 during the annual R/V Dr. Fridtjof Nansen pelagic survey in the region (Strømme, 2002; Toresen, 2002).

Acoustic surveys are the main method for assessing these stocks. Such surveyshave been undertaken since 1975 in the region by foreign and local research vessels.The main targeted species are: Sardina pilchardus, Sardinella aurita, S. maderensis, Trachurus trecae, T. trachurus, Decapterus rhonchus, Engraulis encrasicolus and Scomber japonicus.

Small pelagic stocks are usually shared between the countries of North westAfrica, Senegal, Gambia, Mauritania and Morocco. Standardization of research methods becomes therefore a need for all the researchers of the region. Following this objective, these countries have been collaborating since 2001 with FAO and the Nansen Programme to harmonize the survey methods and among other things, the identification of acoustic targets; a point of vital importance in acoustic surveys. In this context, typical echograms were collected and presented in the 'Technical paper of acoustic target identification on the Northwest African shelf'. Here we present at first a synthesis of those results in a description of typical echograms relating to each targeted species. In addition, we carry out a factorial analysis to study possible correlations between species and the properties of fish schools, defined as multiple fish aggregations (Kieser et al., 1993).

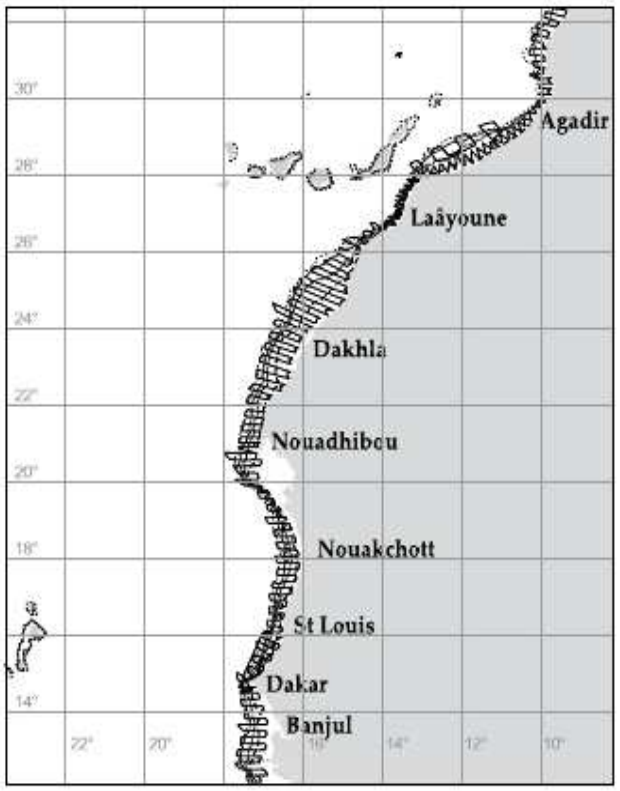
## 2.

## MATERIAL AND METHODS

During the R/V Dr. Fridtjof Nansen acoustic surveys off Northwest Africa in October–December 2003 and 2004 (Toresen, 2002; Krakstad, 2003; 2004; Strømme, 2003; 2004), about 90 echograms illustrating typical school patterns were collected with related mathematical factors, along 6 800 miles covered by the vessel (Figure 1).

FIGURE 1

Track of the R/V *Dr. Fridtjof Nansen* in NWA




The selected echograms are collected during day and night and represent schools targeted for trawling to have information on fish composition. Only echograms presenting single species catch by trawling were selected. An echogram is defined to be from a single species when the species represents more than 70 percent assuming that the total catch is sufficient (i.e. more than 300 kg). Applying these criteria we note that no typical echograms were obtained for *Decapterus rhonchus*.

Data were logged using the 38KHz Simrad echosounder EK60 calibrated by the standard sphere method (Foote *et al.*, 1987), and post-processed using the Bergen Echo Integrator (BEI) (Knudsen, 1990). Related mathematical school descriptors were extracted using the Echoview post-processing software.

The mathematical descriptors extracted from boxed schools in the echograms and used to perform the factorial analysis are listed in the Table 1 below. They are either of acoustic nature, such as mean Sv (Mean energy (in dB) of all the points in the school), NASC value (Area backscattering coefficient (in m2/nm2)) (Maclennan, 2002), skewness and kurtosis of acoustic energy, or of morphometric nature such as length area (mean length of cell region (in m)). Other bathymetric parameters such as the school depth or its distance to the surface are not used in the analysis. The complete definitions of the descriptors are detailed in (Diner, 1998) and (Zar, 1984).

In addition, different quantitative and qualitative dimensions (descriptors, echogram numbers, species and day night factor) should be integrated in data. To deal with this complexity, we proceed by a codification on the variables and observations, as follows1. Echogram code: figure number

2. Parameters code

TABLE 1: **List of acoustic and morphometric descriptors collected from the individual echograms.**

| | |
|---|---|
| The mean Sv (in dB) | Svmean |
| The area backscattering coefficient (in $m^2/nm^2$(1/1000)) | Nasc |
| The density number | dn |
| The area length (nm) | arlenth |
| The skewness of acoustic energy | skew |
| The kurtosis of acoustic energy | kur |
| The image compactness | imcompness |

3. Species groups'code

TABLE 2

| | |
|---|---|
| *Sardina pilchardus* | P |
| *Sardinellas* | S |
| *Trachurus* | Tr |
| *Scomber japonicus* | Sc |
| *Engraulis encrasicolis* | - |

4. Day-night factor

TABLE 3

| | |
|---|---|
| Day | d |
| Night | n |

As example, the observation, n27p will present the echogram number 27, collected in night time and presenting sardine school. Finally, we conduct a principal components analysis (PCA) (Anderson, 1958; Lebart, 1995) to reveal possible correlations on the new observations and variables.

## 3. RESULTS

### 3.1 Descriptive results of typical schools

Examples of typical schools of targeted species are presented in Figures 3, 4, 5 and 7 below. The presented echograms are collected during night and day from different areas of the subregion. A main remark is the spatial and temporal variability in theechograms.In fact, ,the schooling behaviour varies in space and time with concomitant variation in school morphology, acoustic structure and position (Fréon, 1999).

The spatial variability is mainly due to the difference in the presence of plankton from Morocco in the north to Senegal in the south. In fact, in Senegalese waters and south of Mauritania, plankton is very dense and is mixed with scattered fishes in the upper layers during night time. Plankton becomes less and less dense while moving northwards. In Morocco, the echograms are clear and fish schools are more distinctive, especially during daytime where fishes have tendency to regroup, giving high SA values with shifts on the colour scale.

This variability is more or less outstanding for the species groups according to their target strength and day and night behaviour.

***Sardine***

Sardine (*Sardina pilchardus*) is known by its acoustic backscattering qualities. The nautical area backscattering coefficient of sardine is extremely high compared to other target species in the region, as presented in Figure 2.

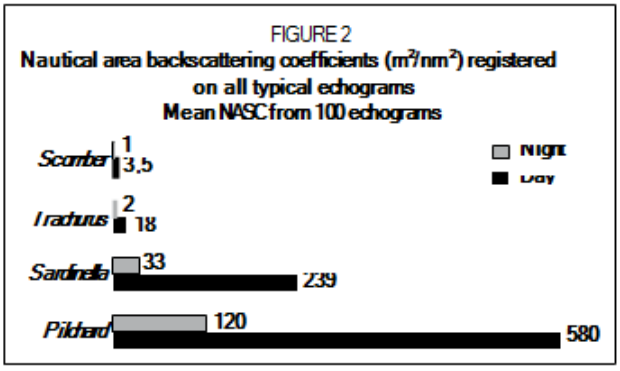


FIGURE 2

Sardine remains relatively more detectable in night time with a same vertically dtribution in night and day time (Figure 3). In fact, (Coetzee, 2000) noted that the spatial energetic characteristics of sardine schools are relatively stable giving

possibilities to identify acoustically the species.

In Morocco, sardine vertical structures may be very close to one another and spread on long distances, giving distinct macro structures (Petitgas, 1996).

### *Sardinellas*

Typical schools of *Sardinella aurita* and *Sardinella maderensis* give often a distinctive red colour in the echograms (Figure 4), due to its high $S_A$ and $S_V$ values.

By daytime, typical schools of sardinella form separate aggregations roundly shaped and located in shallow waters. In night time, this structure remains more or less stable in Moroccan waters and North Mauritania. In Senegal and South Mauritania, the schools are located in night time on upper layers and scattered horizontally over long distance in waviness patterns with higher and lower concentration areas.

### *Horse mackerel*

In the daytime, typical schools of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) are distributed in separate vertical aggregations close to the bottom with relatively dense inverted V-shaped pattern, in deep water (Figure 5). These aggregations are usually distinctive in the echograms because of less plankton in deep layers. Detections are generally denseand may turn to red with relatively high $S_A$ values. In night time, the schools move to the upper layers and appear as continuous waves mixed with plankton near the surface. They are very often following the thermocline with multiple superimposed layers.

FIGURE 3
**Typical echograms of sardine**

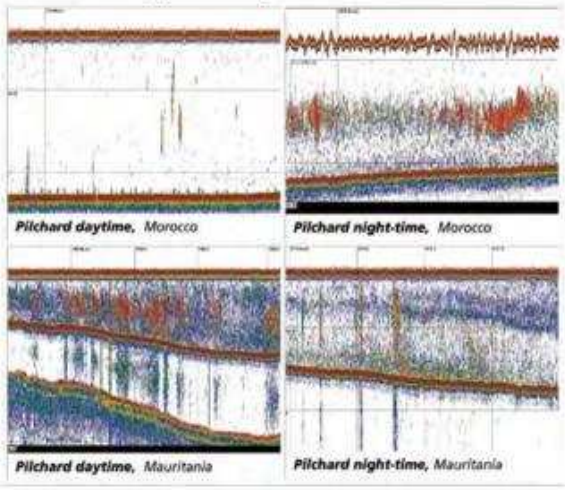



FIGURE 4
**Typical echograms of sardinellas**

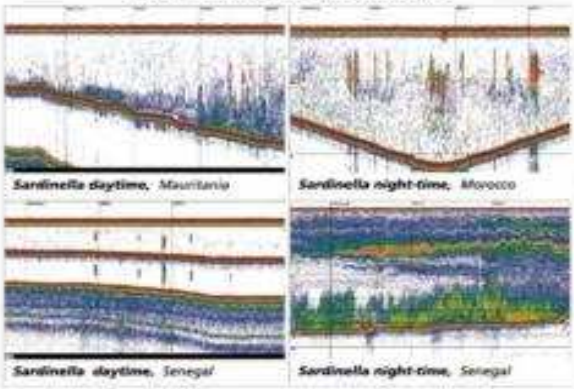
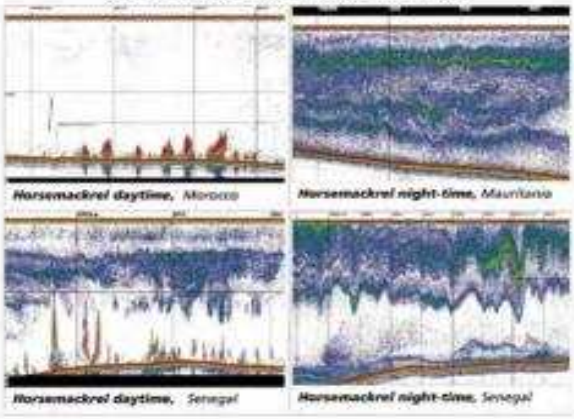



FIGURE 5
**Typical echograms of horse mackerels**



Horse mackerel schools are characterized by heterogeneity in density which is manifested by a high positive kurtosis in daytime (Figure 6).

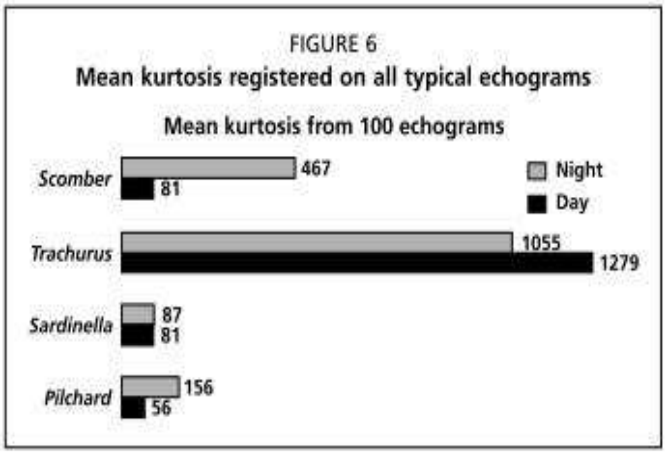



FIGURE 6
**Mean kurtosis registered on all typical echograms**

### *Chub mackerel*

An important characterization of chub mackerel (*Scomber japonicus*) is its very low value $S_A$ and $S_V$ (Figure 2).

In the daytime, chub mackerel schools form patterns in vertical filaments often slightly inclined, because of the synchronization of fast speed of the fish, acoustic pulse length and vessel speed. Those patterns are more visible in the northern part, in Moroccan waters (Figure 7).

In the night time, chub mackerel is scattered and mixed with plankton on the upper layers, which makes it more difficult to detect. High fluctuation of density inside the school gives a kaleidoscopic aspect to the echograms with a mosaic of colours.

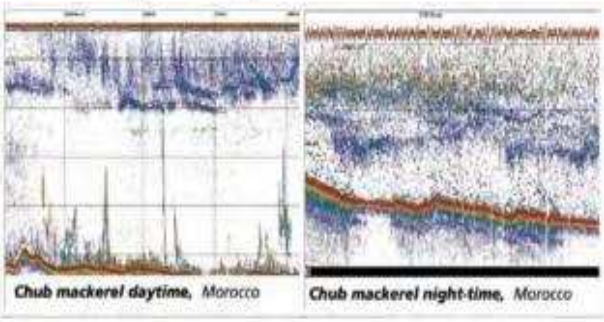



FIGURE 7
**Typical echograms of chub mackerel**

### *Anchovy*

The schools of anchovy (*Engraulis encrasicaulis*) appear in shallow waters as small spots or vertical straight marks superimposed between dense marks with red colour and less dense marks. The patterns are more scattered in the night time than in the daytime (Figure 8)

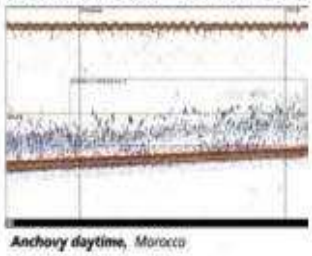



FIGURE 8
**Typical echograms of anchovy**

## 3.2 Mathematical descriptors

Statistical studies carried out on acoustic and morphometric descriptors related to small pelagic schools in other areas, such as Angola (Lawson, 2001) and SouthAfrica (Velho, 2006), demonstrated the possibility of identifying species by these descriptors.

In this work, we conduct a Principal Component Analysis (PCA) to examine possible significant correlation between the extracted parameters and species, based on the codified observations as explained before.

The Eigen values of the correlation matrix of parameters, or the variances on the factorial axis, give a reasonable quantity of 89.31 percent explained by the principal plan (Axis1 (71,63 percent), Axis2 (17,68 percent)), we limit then the interpretation on this plan. In addition, the squares cosines illustrate the quality of presentation of the variables and enable to retain the points best presented on the axis.

Projection of parameters in the factorial plan is presented in Figure 9. A first result is that all the parameters are well presented in the projection. The kurtosis, skewness, compactness and length of the schools are well correlated and form one group which is less correlated to the mean SV. This group is strongly opposed along the first factorial axis to the SA value and the density, which are obviously strongly correlated.

Projection of the codified echograms in the principal factorial plan is illustrated in Figure 10.

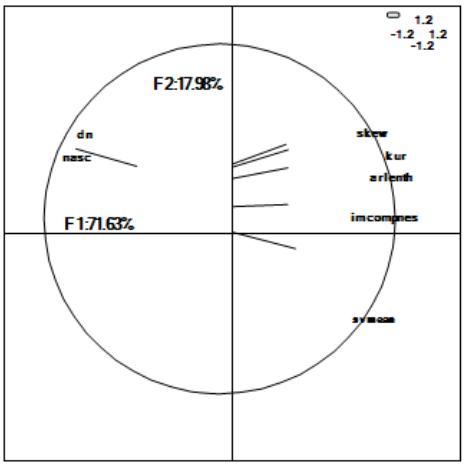
A first conclusion is that, in general the observations done during daytime in white) are better represented than those of night time (in black). This result can be explained by the fact that the schools have more homogeneous structures in the daytime than in the night time.

Four species groups are identified in the projection

A group of sardine (Pilch) detected particularly in the daytime, which is strongly correlated with the SA value and the density. This factis known considering the acoustic backscattering qualities of the species and particularly in the daytime.

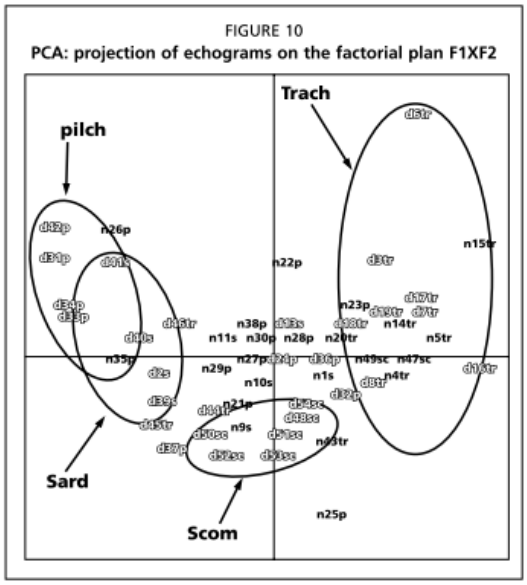
A group of sardinellas (Sard) observed mostly in daytime witch is correlated to the SA value but on a level less important than sardine. This group is also anti correlated to the other parameters

FIGURE 9
PCA: projection of statistical descriptors on the factorial plan F1XF2




IGURE 10

FIGURE 10
PCA: projection of echograms on the factorial plan F1XF2




- A group of chub mackerel (Scom) not well presented, especially along the first axis which is most important for the analysis.
- A separate group of horse mackerel (Trach) in the right hand. Horse mackerel detected in both nights and days is very well correlated with the parameters other than SA value and density. This conclusion is very important in the sense that horse mackerel schools could be characterized by these parameters, specially the kurtosis and skewness which, statistically saying, are a precise quantitative variables and easy to extract from the schools.

## 4. DISCUSSION

This work is giving a basis for researchers to recognize acoustic fish targets in the Northwest African region and a set of echograms related to the targeted species is presented and discussed.Typical echograms are defined from this collection for all target species groups, except for Decapterus rhonchus. A descriptive overview of typical echograms shows distinctive structures for each species group, depending on its acoustic properties, such as the target strength, on its swimming speed and its day and night behaviour. The typical echograms shown give a general basis from which a large number of echograms met in the region can be identified more or less in similar way. A spatial and temporal variability is nevertheless noted within each species; schools are better distinguished in daytimes than in night times when the fish is more scattered in upper layers (Barange, 1997). In addition, schools are more homogeneous in

Northern Moroccan waters than south in Senegalese waters, where fish is sometimes more difficult to distinguish from the plankton. Factorial analysis carried out on the mathematical descriptors extracted from the echograms demonstrates that the schools are mostly more structured in daytime with respect to the descriptors. Important correlations are also revealed between the descriptors and species. Sardine is well characterized by the SA value and density, as well as sardinellas with a less important level. In addition, horse mackerel reveals strong correlationswith the other parameters during day and night times, in particular with kurtosis and skewness. This result is of a great importance considering that these parameters could constitute another mean to identify this species group. Finally, chubmackerel did not revealed significant relationships with the parameters. Indeed, thespecies shows very variable schooling patterns and remain more difficult to detect.

These practical results mathematical as well as descriptive give certainly an outfit for studies on small pelagic schools in the region. To reach the main objective of allocating with a high margin of confidence the schools to the species, studies should be continued in the same way to supply enough echograms and create finally a comprehensive database for the subregion for all targeted species, including species missing in

the present collection. Recognizing fish targets requires also a long experience in echograms analysis and a good knowledge of fish behaviour. Moreover, seasonal and annual variability of the schools (Massé and Retière, 1995; Fréon and Misund, 1999) is also to test through a collection of data on several acoustic surveys.

An important limitation to the use of this set may be the high biodiversity in the region: Often targeted species are mixed with other secondary species, or with high amount of plankton and mesopelagic fish. As it is often the case in Senegalese waters, use of the set is limited and trawling may be the best reliable method for allocation of species. Multi-frequency methods recently developed (Korneliussen and Ona, 2002)remain also a promising tool for a better identification of small pelagic fish in the region.

## 5. REFERENCES


Anderson, T.W. 1958. An introduction to multivariate statistical analysis. Wiley and Son, New York. 373 pp.

Barange, M. & Hampton, I. 1997. Spatial structure of co-occurring anchovy and sardine populations from acoustic data: implications for survey design. Fisheries Oceanography, 6: 94–108.

Coetzee, J. 2000. Use of a shoal analysis and patch estimation system (SHAPES) to characterise sardine schools. Aquatic Living Resources, 13: 1–10.

Diner, N. 1998. Correction on school geometry and density: approach based on acoustic image simulation. ICES CM1998/B: 1, 51 pp.

Foote, K.G., Knudsen, H.P., Vestnes, G., MacLennan, D.N. & Simmonds, E.J. 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide.

ICES Cooperative Research Report, 144. 57 pp.

Fréon, P. & Misund, O.A. 1999. Dynamics of Pelagic Fish Distribution and Behaviour: Effects on Fisheries and Stock Assessment. Fishing News Books, London. 348 pp.

Kieser, R., Mulligan, T.J., Richards, L.J. & Leaman, B.M. 1993. Bias correction of rockfish school cross-section widths from digitized echo sounder data. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 50: 1801–1811.

Knudsen, H.P. 1990. The Bergen Echo Integrator: an introduction. Journal du Conseil international pour l'exploration de la mer, 47: 167–174.

Krakstad, J.O., Sarre, A., Charouki, N. & Olsen, M. 2003. Survey of the pelagic fish resources off North West Africa. Part II, Mauritania. 11–20 November 2003. Cruise Reports Dr. Fridtjof Nansen NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Krakstad J.O., Sylla, S., Mbye, E.M. & Olsen, M. 2004. Survey Of The Pelagic Fish Resources Off North West Africa. Part I, Senegal - The Gambia.

25 October–3 November 2004. Cruise reports, ´Dr. Fridtjof Nansen´. NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR. 20 pp.

Krakstad J.O., Sidina O., Olsen, M. & Wagué, A. 2004. Survey of the pelagic fish resources off North West Africa. Part II, Mauritania. 3–13 November 2004. Cruise Reports Dr Fridtjof Nansen NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Lawson, G.L., Barange, M. & Fréon, P. 2001. Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information. ICES Journal of Marine Science, 58: 275–287.

Lebart, L., Morineau, A. & Piron, M. 1995. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunot, Paris. 439 pp.

Maclennan, D.N., Fernandes, P.G. & Dalen, J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. ICES Journal of Marine Science 59: 365–369.

Massé, J. & Retière, N. 1995. Effect of number of transects and identification hauls on acoustic biomass estimates under mixed species conditions. Aquatic Living Resources, 8: 195–199.

Petitgas, P. & Levenez, J.J. 1996. Spatial organization of pelagic fish: echogram structure, spatio-temporal condition, and biomass in Senegalese waters. ICES Journal of Marine Science, 53:147-53.

Smith, S.L. 1984. Biological indications of active upwelling in the northwestern Indian

ocean in 1964 an 1979 and a comparison with Peru and Northwest Africa.In Marine science of the NW Indian Ocean and adjacent waters. Deep-Sea Research 31, 951-967.

Strømme, T., Moustahfid, H., Ostrowski, M. & Oddgeir, A. 2002. Survey of the Pelagic fish resources off North West Africa. Part III Morocco, 19 November–19 December 2002. Cruise reports, Dr. Fridtjof Nansen. NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Strømme, T., Chbani, M., Ostrowski, M. & Oddgeir, A. 2003. Survey of the Pelagic fish resources off North West Africa. Part III Morocco, 19 November–19 December 2003. Cruise reports, Dr. Fridtjof Nansen. NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Strømme, T., El Habouz, H., Ostrowski, M. & Oddgeir, A. 2004. Survey of the Pelagic fish resources off North West Africa. Part III Morocco, 14 November–13 December 2004. Cruise reports, Dr. Fridtjof Nansen. NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Toresen, R., Sarre, A. & Olsen, M. 2002. Survey of the pelagic fish resources off NorthWest Africa. Part I, Senegal-The Gambia. 29 October–7 November 2002. Cruise Reports Dr. Fridtjof Nansen NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.

Toresen, R., El Mustapha, A.O. & Olsen, M. 2002. Survey of the pelagic fish resources off North West Africa. Part II, Mauritania. 9–18 November 2002. Cruise Reports Dr Fridtjof Nansen NORAD/FAO Project GCP/INT/730/NOR.Marine Science, 28(3&4): 525–533.

Zar, J.H. 1984. Biostatistical Analysis. Prentice-Hall International, London. 718 pp.

## 7. Acknowledgements

This work was conducted on board R/V Dr Fridtjof Nansen during acoustic surveys coordinated by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). We wish to express warm thanks to the crew on board the vessel, Mr Magne Olsen for his great assistance and Mr Tore Mørk who readily provides us echograms from collecting system.

## . Supplementary tables

Table 7.1 .Details of trawl stations used to identify the acoustic scattering layers in Senegal and Gambia on october 2003.

| Echogram No. | Trawl station No. | Time (GMT) | Bottom depth (m) | Fishing depth (m) | Total catch (kg) | Target species | % of Target species |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2041 | 02:48 | 43 | 20 | 432 | Sardinellas | 79% |
| 2 | 2050 | 17:51 | 18 | 10 | 409 | S. maderensis | 84% |
| 3 | 2049 | 12:55 | 94 | 80 | 75 | T. trecae | 98% |
| 4 | 2057 | 00:12 | 204 | 0 | 364 | T. trecae | 89% |
| 5 | 2062 | 21:51 | 90 | 20 | 143 | T. trecae | 82% |
| 6 | 2052 | 8:48 | 101 | 101 | 1256 | T. trecae | 84% |
| 7 | 2054 | 8:56 | 81 | 81 | 1123 | T. trecae | 77% |
| 8 | 2063 | 8:56 | 62 | 40 | 1123 | T. trecae | 77% |

Table 7.2 Acoustic properties of the monospecific schools selected in Senegal and Gambia on october 2003

| Echogram No | Region class | Sv Mean | NASC (1/1000) | Height Mean (m) | Depth Mean (m) | Area Length (nm) | Stand. Deviation | Skewness | Kurtosis | Image Compactness | Density Number (1/1000) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Sardnlla | -48.19 | 5.759 | 8.7 | 30.14 | 1.63 | 0.00420 | 7.36 | 9 7.08 | 126.73 | 457 8 |
| 2 | sardnlla | -34.17 | 89.56 | 5.43 | 13.49 | 0.05 | 0.00819 | 3.81 | 2 0.07 | 9.61 | 712 70 |
| 3 | Trecae | -45.30 | 10.82 | 8.50 | 83.08 | 2.21 | 0.00221 | 2.20 | 6 98.03 | 172.18 | 861 4 |
| 4 | Tracae | -55.58 | 0.977 | 8.1 | 23.69 | 1.66 | 0.00040 | 1.86 | 1 59.47 | 163.97 | 775 |
| 5 | Tracae | -54.51 | 0.718 | 4.6 | 30.97 | 3.48 | 0.00085 | 1.14 | 3 67.06 | 465.46 | 569 |
| 6 | Trecae | -39.57 | 39.06 | 8.20 | 10 6.38 | 2.19 | 0.01042 | 1.07 | 1 0423 | 159.80 | 310 85 |
| 7 | Tracae | -51.39 | 1.452 | 4.6 | 69.57 | 1.76 | 0.00433.86 | 2 | 8 65.97 | 246.71 | 115 0 |
| 8 | Tracae | -53.86 | 1.167 | 6.5 | 47.24 | 2.47 | 0.00140 | 9.34 | 1 47.87 | 232.17 | 926 |

Table7.3. Details of trawl stations used to identify the acoustic scattering layers in Mauritanie on october 2003.

| Echogram No. | Trawl station No. | Time (GMT) | Bottom depth (m) | FishingDepth (m) | Total catch (kg) | Target species | % of Target species |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 2081 | 22:47 | 67 | 10 | 244 | Sardinella | 80% |
| 10 | 2082 | 01:56 | 18 | 18 | 357 | Sardinella | 72% |
| 11 | 2100 | 03:20 | 20 | 20 | 544 | Sardinella | 88% |
| 13 | 2085 | 31 | 39 | 15 | 165 | Sardinella | 84% |
| 14 | 2074 | 20:55 | 95 | 15 | 1457 | T. trecae | 99% |
| 15 | 2076 | 03:13 | 97 | 0 | 99 | T. trecae | 72% |
| 16 | 2073 | 16:26 | 84 | 84 | 326 | T. trecae | 92% |
| 17 | 2093 | 17:19 | 62 | 62 | 1303 | T. trecae | 88% |
| 18 | 2101 | 07:14 | 49 | 10 | 50 | T. trecae | 68% |
| 19 | 2104 | 16:07 | 74 | 74 | 62 | T. trecae | 98% |
| 20 | 2105 | 18:35 | 46 | 25 | 520 | T. trecae | 76% |
| 21 | 2089 | 00:18 | 40 | 0 | 1181 | S.pilchardus | 73% |
| 22 | 2090 | 02:02 | 25 | 25 | 1370 | S.pilchardus | 78% |

Table 7.4 Acoustic properties of the monospecific schools selected in Mauritania on october 2003.

| Echo- | Region | Sv | NASC | Height | Depth | Area | Standard | Skew- | Kur- | Image | Density |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| gram No. | class | Mean | (1/1000) | Mean (m) | Mean (m) | Length (nm) | Deviation | ness | tosis | Compact-ness | Number (1/1000) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | Sardnlla | -46.52 | 8 | 8.31 | 20.95 | 0.12 | 0.000065 | 5.59 | 3 8.91 | 11.11 | 6353 |
| 10 | Sardnlla | -44.74 | 8 | 9.14 | 6.360 | 14.9 | 0.000160 | 8.86 | 1 01.38 | 36.24 | 7306 |
| 11 | Sardnlla | -39.74 | 14 | 24.7 | 5.207 | 17.4 | 0.000389 | 9.01 | 1 10.05 | 34.72 | 1921 3 |
| 13 | Sardnlla | -43.82 | 0 | 9.25 | 5.159 | 22.9 | 0.000242 | 15 .30 | 3 20.75 | 52.53 | 7323 |
| 14 | T. trecae | -55.99 | 0 | 1.586 | 13.98 | 27.1 | 2.7 0.000005 | 20 .10 | 8 30.28 | 116.5 | 1196 4 |
| 15 | T.trc-juv | -59.33 | 1 | 0.719 | 14.38 | 26.7 | 3.1 0.000012 | 62 .68 | 4 601.6 | 134.8 | 568 7 |
| 16 | T. trecae | -61.84 | 6 | 0.02 | 2.027 | 74.7 | 3.0 0.000004 | 19 .16 | 4 59.91 | 930.9 | 45 5 |
| 17 | trchurus | -49.80 | 5 | 1.89 | 4.023 | 58.8 | 1.9 0.000131 | 24 .91 | 8 09.63 | 307.0 | 1470 7 |
| 18 | trchurus | -47.44 | 2 | 7.16 | 9.126 | 29.0 | 1.6 0.000099 | 12 .75 | 2 23.62 | 118.6 | 5665 3 |
| 19 | trchurus | -49.82 | 9 | 1.43 | 3.373 | 72.0 | 3.3 0.000076 | 15 .98 | 3 53.71 | 930.9 | 1190 5 |
| 20 | trchurus | -45.84 | 7 | 7.00 | 6.310 | 34.5 | 2.0 0.000095 | 8. 99 | 1 31.49 | 214.4 | 5624 8 |
| 21 | Pilch | -45.74 | 95 | 10.2 | 9.522 | 25.2 | 0.2 0.000088 | 6. 07 | 4 8.62 | 22.85 | 8716 |
| 22 | Pilch | -36.62 | 01 | 75.0 | 8.071 | 16.0 | 1.9 0.000746 | 8. 67 | 1 29.38 | 157.9 | 5969 6 0 |

Table 7.5. Details of trawl stations used to identify the acoustic scattering layers in Morocco on october 2003

| Echo-gram No. | Trawl station No. | Time (GMT) | Bottom depth (m) | Fishing Depth (m) | Total catch (kg) | Target species | % of Target species |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 2126 | 19:33 (N) | 56 | 10 | 1449 | Pilch | 80% |
| 24 | 2128 | 09:16 (N) | 43 | 20 | 1004 | Pilch | 92% |
| 25 | 2146 | 22 :25 (N) | 40 | 18 | 2500 | Pilch | 99% |
| 26 | 2161 | 18:17 (N) | 57 | 15 | 30 | Pilch | 92% |
| 27 | 2162 | 21:52 (N) | 88 | 40 | 195 | Pilch | 97% |
| 28 | 2164 | 03:48 (N) | 80 | 18 | 146 | Pilch | 89% |
| 29 | 2173 | 19:49 (N) | 78 | 12 | 202 | Pilch | 97% |
| 30 | 2194 | 03:11 (N) | 42 | 20 | 554 | Pilch | 98% |
| 31 | 2111 | 12 :51 (D) | 64 | 22 | 105 | Pilch | 100% |
| 32 | 2129 | 12 :59 (D) | 33 | 5 | 3366 | Pilch | 100% |
| 33 | 2133 | 10 :47 (D) | 27 | 27 | 4000 | Pilch | 90% |
| 34 | 2141 | 17 :35 (D) | 24 | 10 | 2500 | Pilch | 100% |
| 35 | 2159 | 23 :19 (D) | 104 | 15 | 5966 | Pilch | 100% |
| 36 | 2165 | 08:33 (D) | 71 | 40 | 434 | Pilch | 98% |
| 37 | 2175 | 12:12 (D) | 36 | 36 | 1268 | Pilch | 90% |
| 38 | 2195 | 06:56 (D) | 46 | 20 | 519 | Pilch | Pilch |
| 39 | 211 | 16 :4 | 42 | 10 | 57 | Sard | 90% |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 | 5 (D) | | | | | |
| 40 | 211 7 | 09 :50 (D) | 65 | 10 | 5086 | Sard | 96% |
| 41 | 211 9 | 16 :08 (D) | 69 | 10 | 3280 | Sard | 98% |
| 42 | 212 3 | 09 :04 (D) | 34 | 5 | 4000 | Sard | 68% |

Table7.6.(continued) Details of trawl stations used to identify the acoustic scattering layers in Morocco

| Echo-gram No. | Trawl station No. | Time (GMT) | Bottom depth (m) | Fishing Depth (m) | Total catch (kg) | Target species | % of Target species |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 43 | 2142 | 21:47 (N) | 69 | 69 | 79 | T | 92% |
| 44 | 2110 | 10:15 (D) | 105 | 30 | 160 | T | 84% |
| 45 | 2116 | 08:41 (D) | 65 | 65 | 2565 | T | 67% |
| 46 | 2125 | 15:05 (D) | 90 | 90 | 1096 | T | 56% |
| 47 | 2137 | 03:14 (N) | 49 | 23 | 383 | SC | 80% |
| 48 | 2189 | 05:52 (N) | 79 | 12 | 525 | SC | 99% |
| 49 | 2193 | 21:37 (N) | 77 | 15 | 354 | P | 84% |
| 50 | 2134 | 15:48 (D) | 68 | 68 | 16 | SC | 71% |
| 51 | 2181 | 09: 09 (D) | 57 | 0 | 430 | SC | 100% |
| 52 | 2182 | 15:53 (D) | 58 | 58 | 308 | SC | 88% |
| 53 | 2191 | 15:52 (D) | 48 | 18 | 886 | SC | 98% |
| 54 | 2206 | 14:48 (D) | 133 | 133 | 482 | SC | 91% |

Table 7.7 Acoustic properties of the monospecific schools selected in Morocco on october 2003.

| Echo-gram No. | Region class | Sv Mean | NASC (1/1000) | Range Mean (m) | Area Length (nm) | Standard Deviation | Skewness | Kur-tosis | Image Compact-ness | Density Number (1/1000) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23 | Pilchardus | -46.75 | 3.11 | 16.38 | 0.91 | 2.426 E-04 | 24.40 | 7 63.42 | 171.96 | 2477 |
| 24 | Pilchardus | -42.60 | 9.53 | 28.62 | 0.20 | 3.003 E-04 | 10.09 | 1 30.59 | 31.65 | 7582 |
| 25 | Pilchardus | -61.54 | 0.13 | 18.46 | 0.31 | 1.426 E-06 | 4.17 | 2 5.16 | 47.80 | 107 |
| 26 | Pilchardus | -26.54 | .84 1644 | 23.51 | 0.02 | 6.586 E-03 | 7.87 | 8 6.59 | 1.60 | 1308 925 |
| 27 | Pilchardus | -41.54 | 12.78 | 29.69 | 0.36 | 2.224 E-04 | 7.16 | 6 6.86 | 137.22 | 1016 7 |
| 28 | Pilchardus | -47.49 | 10.16 | 20.09 | 1.58 | 7.236 E-05 | 10.40 | 1 59.89 | 79.07 | 8083 |
| 29 | Pilchardus | -46.27 | 17.18 | 52.02 | 0.05 | 5.285 E-05 | 9.60 | 1 68.34 | 2.36 | 1367 3 |
| 30 | Pilchardus | -41.48 | 20.65 | 27.24 | 0.50 | 2.167 E-04 | 7.60 | 8 8.85 | 121.41 | 1643 2 |
| 31 | Pilchardus | -24.76 | 1871 .79 | 25.78 | 0.04 | 5.832 E-03 | 4.13 | 2 6.06 | 3.90 | 1489 524 |
| 32 | Pilchardus | -44.20 | 2.12 | 10.69 | 0.69 | 2.104 E-04 | 8.46 | 8 4.48 | 426.78 | 1691 |
| 33 | Pilchardus | -25.09 | 878.82 | 21.70 | 0.01 | 5.377 E-03 | 2.47 | 6.20 | 3.27 | 6993 45 |
| 34 | Pilchardus | -23.98 | 890.27 | 13.42 | 0.01 | 7.106 E-03 | 2.77 | 7.94 | 3.70 | 7084 57 |
| 35 | Pilchardus | -35.78 | 135.94 | 34.92 | 0.03 | 6.609 E-04 | 4.29 | 2 0.56 | 2.37 | 1081 74 |
| 36 | Pilchardus | -44.66 | 3.86 | 64.34 | 0.47 | 1.372 E-04 | 10.15 | 1 57.76 | 274.82 | 3075 |
| 37 | Pilchardus | -40.23 | 18.32 | 25.97 | 0.02 | 2.126 E-04 | 3.04 | 1 0.82 | 2.64 | 1458 0 |
| 38 | Pilchardus | -40.11 | 32.46 | 26.45 | 1.29 | 2.637 E-04 | 5.83 | 4 8.54 | 340.72 | 2582 9 |
| 39 | Sardinellas | -33.13 | 50.74 | 13.51 | 0.01 | 9.445 E-04 | 3.18 | 1 1.80 | 6.76 | 4037 7 |
| 40 | Sardinellas | -30.37 | 200.24 | 14.09 | 0.03 | 1.708 E-03 | 3.77 | 1 7.82 | 4.94 | 1593 48 |
| 41 | Sardinellas | -24.98 | 843.82 | 14.96 | 0.03 | 8.368 E-03 | 5.37 | 3 5.52 | 6.83 | 6714 91 |
| 42 | Pilchardus | -24.64 | 1711 .13 | 16.37 | 0.02 | 5.968 E-03 | 4.11 | 2 7.48 | 1.78 | 1361 671 |
| 43 | trachurus | -53.93 | 1.14 | 65.18 | 1.04 | 7.339 E-06 | 4.75 | 3 8.31 | 232.55 | 906 |
| 44 | T. trecae | -45.64 | 7.96 | 88.29 | 0.13 | 6.430 E-05 | 5.62 | 4 5.27 | 13.04 | 6330 |
| 45 | T. trecae | -38.32 | 26.36 | 63.38 | 0.05 | 2.651 E-04 | 2.59 | 7.11 | 10.25 | 2097 3 |
| 46 | trachurus | -34.66 | 127.31 | 82.02 | 0.18 | 8.548 E-04 | 5.16 | 3 6.83 | 13.07 | 1013 12 |
| 47 | Sc.japonicus | -57.27 | 0.51 | 29.85 | 0.69 | 1.194 E-05 | 25.11 | 8 91.50 | 72.89 | 403 |
| 48 | Sc.japonicus | -50.36 | 1.10 | 17.73 | 0.30 | 3.691 E-05 | 9.42 | 1 32.30 | 78.05 | 874 |
| 49 | Sc.japonicus | -53.79 | 1.33 | 19.01 | 0.96 | 2.622 E-05 | 15.08 | 3 77.79 | 102.00 | 1058 |
| 50 | Sc.japonicus | -49.44 | 7.19 | 53.24 | 0.03 | 3.001 E-05 | 5.36 | 3 6.18 | 1.59 | 5718 |
| 51 | Sc.japonicus | -52.27 | 1.58 | 19.93 | 0.13 | 2.259 E-05 | 7.75 | 7 5.05 | 16.26 | 1261 |
| 52 | Sc.japonicus | -46.91 | 4.48 | 55.33 | 0.09 | 4.288 E-05 | 3.85 | 1 8.29 | 11.90 | 3569 |
| 53 | Sc.japonicus | -53.27 | 1.85 | 30.20 | 0.05 | 2.241 E-05 | 8.08 | 7 4.01 | 4.09 | 1474 |
| 54 | Sc.japonicus | -57.09 | 2.07 | 11 2.65 | 0.35 | 6.640 E-06 | 11.98 | 2 02.35 | 11.38 | 1651 |
| 55 | Anchovy | -45.18 | 2.76 | 49.61 | 0.12 | 8.837 E-05 | 5.32 | 3 5.04 | 53.20 | 2200 |

Table 7.8 Acoustic properties of the monospecific schools selected from Senegal to Morocco on october 2004.

| Echo-gram No | Region_class | Sv_mean | NASC | Height_mean | Depth_mean | Standard_deviation | Density number (1/1000) | Time |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 56 | "TRC" | -59.7 | 0.2 | 3.5 | 71.3 | 8.78E-06 | 129 | 11:17:09.00 |
| 57 | "AUR" | -53.8 | 2.1 | 11.9 | 35.3 | 3.64E-05 | 1705 | 00:45:10.00 |
| 58 | "TRC" | -58.4 | 0.4 | 7.1 | 89.9 | 1.30E-05 | 347 | 12:54:42.00 |
| 59 | "TRC" | -46.7 | 4.9 | 5.3 | 90.1 | 0.00019632 | 3918 | 16:33:03.00 |
| 60 | "AUR" | -50.4 | 4.8 | 12.2 | 39.3 | 2.31E-05 | 3810 | 22:33:52.00 |
| 61 | "HORSE" | -45.7 | 1.3 | 1.2 | 93.5 | 5.41E-05 | 1057 | 14:30:19.00 |
| 62 | "AURITA" | -40.1 | 55.3 | 13.1 | 27.3 | 0.00016153 | 43982 | 21:04:52.00 |
| 63 | "HORSE" | -55.0 | 1.4 | 10.1 | 26.7 | 2.51E-05 | 1095 | 01:07:30.00 |
| 64 | "SARDIN" | -45.4 | 6.2 | 5.0 | 17.8 | 0.00024791 | 4914 | 21:55:19.00 |
| 65 | "PILCHARD" | -44.2 | 22.8 | 13.9 | 18.6 | 0.00010795 | 18119 | 00:13:43.00 |
| 66 | "PILCHARD" | -37.0 | 120.5 | 14.0 | 26.1 | 0.00044762 | 95898 | 02:22:07.00 |
| 67 | "PILCHARD" | -30.5 | 774.2 | 20.0 | 30.7 | 0.00235 62 | 616108 | 11:15:29.00 |
| 68 | "HORSE" | -49.4 | 8.0 | 16.4 | 65.6 | 6.50E-05 | 6382 | 14:47:46.00 |
| 69 | "AURITA" | -34.0 | 150.9 | 8.8 | 17.3 | 0.00102109 | 120051 | 00:45:29.00 |
| 70 | "HORSE" | -35.2 | 68.6 | 5.3 | 66.7 | 0.00039977 | 54604 | 11:37:38.00 |
| 71 | "PILCHARD" | -29.4 | 684.3 | 13.9 | 20.5 | 0.00190216 | 544530 | 16:18:19.00 |
| 72 | "PILCHARD" | -44.5 | 4.8 | 3.2 | 23.6 | 0.00010713 | 3833 | 01:14:03.00 |
| 73 | "PILCHARD" | -22.8 | 428.7 | 1.9 | 11.2 | 0.01103557 | 341145 | 18:35:43.00 |
| 74 | "PILCHARD" | -33.9 | 158.7 | 9.1 | 19.4 | 0.00078771 | 126280 | 02:45:57.00 |
| 75 | "PILCHARD" | -51.4 | 1.0 | 3.3 | 15.0 | 3.72E-05 | 808 | 19:53:01.00 |
| 76 | "PILCHARD" | -34.1 | 83.6 | 4.9 | 17.4 | 0.00125 42 | 66546 | 06:44:57.00 |
| 77 | "PILCHARD" | -35.9 | 50.4 | 4.5 | 13.9 | 0.00062991 | 40145 | 19:25:51.00 |
| 78 | "PILCHARD" | -53.9 | 0.9 | 5.3 | 15.3 | 2.55E-05 | 744 | 22:29:29.00 |
| 79 | "PILCHARD" | -53.1 | 1.0 | 4.7 | 16.2 | 2.55E-05 | 783 | 21:05:35.00 |
| 80 | "PILCHARD" | -48.1 | 2.5 | 3.8 | 17.9 | 9.83E-05 | 1995 | 23:43:33.00 |
| 81 | "PILCHARD" | -52.8 | 1.3 | 5.6 | 16.2 | 4.66E-05 | 1019 | 19:27:04.00 |
| 82 | "PILCHARD" | -44.1 | 11.5 | 6.8 | 27.5 | 0.00019768 | 9175 | 21:32:27.00 |
| 83 | "PILCHARD" | -34.6 | 140.8 | 9.4 | 38.6 | 0.00085266 | 112019 | 03:28:58.00 |
| 84 | "SCOMBER" | -57.9 | 1.2 | 16.7 | 85.2 | 4.73E-06 | 927 | 08:59:29.00 |
| 85 | "PILCHARD" | -49.6 | 0.4 | 0.8 | 44.6 | 8.58E-05 | 315 | 15:27:57.00 |
| 86 | "SCOMBER" | -52.5 | 1.6 | 6.8 | 37.3 | 2.09E-05 | 1299 | 18:38:36.00 |
| 87 | "CHLOR" | -48.6 | 3.5 | 5.9 | 12.9 | 0.00012215 | 2763 | 00:49:39.00 |
| 88 | "CHLOR" | -46.6 | 11.9 | 12.5 | 25.8 | 0.00324925 | 9458 | 04:00:36.00 |
| 89 | "JELLYFISH" | -49.9 | 1.0 | 2.2 | 63.2 | 2.84E-05 | 757 | 11:07:39.00 |
| 90 | ELLYFISH" | -51.5 | 1.2 | 3.9 | 64.9 | 9.54E-06 | 936 | 04:22:34.00 |

**Titre : Approche acoustique de la dynamique et distribution spatiale des ressources halieutiques de petits pélagiques dans l'upwelling sénégalo-mauritanien**

**Résumé**

Le long des côtes nord-ouest africaines, parmi les plus poissonneuses au monde, les ressources halieutiques sont importantes tant du point de vue socio-économique que culturel. Les petits poissons pélagiques sont suivis au niveau sous régional depuis plus de trois décennies en s'appuyant sur les méthodes hydroacoustiques d'évaluation de stocks. Ces campagnes ont ainsi permis de fournir aux gouvernants une base scientifique en matière de prise de décision à des fins d'aménagement des pêcheries pélagiques. Un défi spécifique est de connaitre leur représentativité par rapport aux stocks ciblés. Nous rassurons sur cette représentativité sur la couverture de Sardinella aurita par ces campagnes. Par contre, pour S. maderensis une partie du stock ne serait pas échantillonnée et la méthode n'est pas adaptée pour Illisha africana et Ethmalosa fimbriata. Nous reportons des déplacements vers le nord dans la répartition de S. aurita et d'autres espèces de pélagique, attribués à la redistribution de l'intensité et de la productivité des upwellings [découpé en 5 sous zones du sud Maroc au sud Sénégal], diminuant ainsi l'abondance de la sardinelle dans la région côtière intertropicale. Pour la première fois en utilisant des séries chronologiques d'observation indépendantes à la méso-échelle, nous montrons un changement vers le nord dans la distribution de S. aurita depuis 1995 et l'attribuons au fort réchauffement de l'océan dans la région. De plus les changements spatiaux observés dans la biomasse de S. aurita au cours des 20 dernières années sont du même ordre de grandeur que ceux enregistrés pour les isothermes de surface. De tels changements auront une incidence sur les considérations politiques dans la gestion de la sécurité alimentaire dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest.

**Mots-clés** : Petits poissons pélagiques, Nord-Ouest-Afrique, campagnes acoustiques, distributions, pressions climatiques.

**Title: Acoustic approach of the dynamic and spatial distribution of small pelagic marine resources inside Sénégalo-mauritanian upwelling.**

**Abstract**

Along the coast of North-West Africa, among the richest waters over the word, fish supply is important at both socio-economic and cultural levels. In this region, the small pelagic fish are the most abundant marine resources and are monitored using hydroacoustic stock assessment methods since more than three decades. These surveys have allowed providing to local authorities a sound scientific basis for deciding about the management of pelagic fisheries. A specific challenge is to know the representativity of these surveys with respect to the stocks targeted. In this work, we confirm this representativity for Sardinella aurita stock while for S. maderensis, a part of the stock could have not been sampled and for pour Ilisha africana and Ethmalosa fimbriata these surveys are not the best tool. Furthermore, Northward shifts in the distribution of sardinella in the Canary Current Large Marine Ecosystem are recorded in this work and have been attributed to the redistribution of upwelling intensity and productivity, resulting in the abundance of sardinella decreasing in the inter-tropical coastal region. Here for the first time using independent observational time series, we report a robust northward shift in S. aurita since 1995 and attribute it to the strong ocean warming in the region. The observed spatial shifts in biomass in the last 20 years are of the same order of magnitude as those recorded for surface isotherms. Such changes will impact policy considerations in the management of food security in several West African countries and should be considered with respect to "Intended Nationally Determined Contributions".

**Keywords** : Small pelagic fish, NorthWest Africa, acoustic surveys, distributions, climatic pressures.