

Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Science et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Sujet: Distribution et contrôle environnemental des communautés de zooplancton à petite échelle sur le plateau sénégalais pendant la période d'upwelling.

Présenté par Youssouph COLY

Sous la direction de Dr Eric MACHU et Dr Bamol Ali SOW

Soutenu publiquement le 27 juillet 2017 devant le jury composé de :

Noms et Prénoms	Grade	Qualité	Etablissement
CAMARA Moctar	Maître de Conférences	Président de jury	UFRST/UASZ
FAYE Saliou	Chargé de Recherches	Rapporteur	CRODT/ISRA
NDOYE Siny	Chercheur	Examineur	ESP/UCAD
DIATTA Samo	Maître-Assistant	Examineur	UFRST/UASZ
MACHU Eric	Chargé de Recherches	Encadrant	LOPS/IRD
SOW Bamol Ali	Maître de Conférences	Encadrant	UFRST/UASZ

Dédicaces

A la mémoire de mon père **Tidiane COLY** et de ma mère **Sénébou MANGA**. Paix et salut sur vos âmes et que la terre de Diacounda vous soit légère.

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu de m'avoir donné la santé et la force d'accomplir ce travail. Ce mémoire a été réalisé au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO-SF) de l'École Supérieure Polytechnique (ESP) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). A ce titre, je remercie le directeur Saïdou Moustapha SALL et tous les chercheurs du LPAO-SF de m'avoir accueilli dans leurs locaux durant mon stage, il s'agit de Aissatou FAYE, Abdou Lahat DIENG, Ibrahima CAMARA, Cheikh Noreyni FALL, Demba NIANG, Habib SENGHOR, Khalil KANTÉ, BAILO, Nicolas, DIACK, Siny NDOYE... Je remercie infiniment Adama BADIANE et Khassoum CORRÉA pour leur esprit d'ouverture et de solidarité.

Je joins à ces remerciements le directeur du LOSEC, Bamol Ali SOW et tous les enseignants-chercheurs du département de physique de Université Assane SECK de Ziguinchor, je veux citer Messieurs L. G. NDIAYE, D. KOBOR, M. TINE, M. CAMARA, I. SAKHO, M. L. MBAYE, J. DIATTA, A. NDIAYE, M. THIAM ...

Mention spéciale au Dr Samo DIATTA qui m'a enseigné durant tout mon cursus universitaire de la première année à la cinquième année (master 2). Je profite de cette occasion pour remercier les enseignants de Dakar qui ont participé à ma formation, il s'agit de Messieurs C. M. F KÉBÉ (ESP), S. SAMBOU (UCAD), S. M. SALL (ESP), E. MACHU (ESP).

Je suis très reconnaissant à l'égard de mes encadrants en l'occurrence Messieurs Eric MACHU et Bamol Ali SOW d'avoir suivi et dirigé mon mémoire. Ils ont su me donner le goût et la rigueur dans le travail. Leurs compétences, leurs conseils, leurs assiduités et tant d'autres qualités me donnent le courage de me lancer à fond dans la recherche et d'aller de l'avant. Je les remercierai jamais assez de m'avoir fait découvrir le monde de l'acoustique et celui de la biogéochimie marine.

Je remercie également Messieurs Moctar CAMARA (Président du jury), Saliou FAYE (Rapporteur), Siny NDOYE (Examineur) et Samo DIATTA (Examineur) d'avoir bien voulu accepter de juger mon travail.

Mes remerciements s'adressent également aux doctorants du LOSEC pour leurs soutiens pour la réussite de ce mémoire. A ces remerciements, je joins l'ensemble des étudiants de Master 2 du LPAO-SF qui m'ont accueilli à bras ouverts et m'ont accompagné tout au long du stage. A mes amis de classe, je veux citer Alioune MBAYE, Ndeye Sira DIOUF, Mamadou Saliou SOW et Mamadou Lamine BADJI, Léger BADJI. Je salue la confiance et le moral qu'ils m'ont apporté.

Je ne pourrai terminer sans remercier l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour l'effort consenti pour la réalisation de ce stage.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la compréhension de la variabilité de l'environnement sur les communautés de zooplancton sur le plateau du Sénégal. Cette étude est faite à partir des données récoltées par le sondeur acoustique et le poisson remorqué (Scanfish) pendant les campagnes AWA et UPSEN2. Les résultats obtenus ont montré que le zooplancton au niveau du plateau n'est probablement pas uniquement composé de copépodes comme le révèlent les études précédentes menées sur le plateau par échantillonnage avec des filets à plancton. Ainsi durant ce travail, nous avons pu montrer que le zooplancton du plateau est composé de copépodes mais aussi des micro-organismes capables de pénétrer les mailles du filet et des macro-organismes ayant le pouvoir d'évitement du filet. L'étude sur la distribution côte-large de la densité acoustique semble montrer que l'extérieur du plateau représente la zone où les biomasses de zooplancton sont maximales. L'étude de la distribution Nord-Sud de la densité acoustique nous a permis de distinguer trois zones de fort développement du zooplancton. Ces endroits sont localisés devant l'embouchure du fleuve Sénégal, au voisinage nord de Dakar et entre les embouchures des fleuve Gambie et Casamance. L'étude tentant de relier le zooplancton et les variables environnementales (température, turbidité et fluorescence) a montré que la présence du zooplancton dans une eau augmente sa turbidité et que la biomasse de phytoplancton semble être un facteur déterminant de la migration verticale du zooplancton. Cependant l'étude ne révèle pas une relation directe entre le zooplancton et la température pendant la période d'upwelling.

Abstract

This master thesis aims to understand the variability of the pelagic environment on zooplankton on the Senegalese continental shelf. This study is based on data collected by multifrequency echosounder and the Scanfish during AWA and UPSEN2 field experiments. The results showed that the zooplankton on the shelf is probably not only composed solely of copepods as revealed in previous studies carried out using sampling nets to sample zooplankton. Thus, during this work, we were able to show that the zooplankton of the shelf is composed of copepods but also microzooplankton capable of penetrating the meshes and macroorganisms having the power to avoidance of the net. The study on the coastal-wide distribution of acoustic density seems to show that the outside of the shelf represents the zone where the biomasses of zooplankton are maximal. The study of the North-South distribution of the acoustic density allowed us to distinguish three zones of strong biomass of zooplankton. These areas are located in front of the mouth of the Senegal River, in the northern vicinity of Dakar and between the mouths of the Gambia River and the Casamance River. The zooplankton and environmental variables (temperature, turbidity and fluorescence) relationship showed that the presence of zooplankton in water increases turbidity. Indeed a direct link is observed between phytoplankton and zooplankton: zooplankton eat phytoplankton. Regarding the temperature, this study does not reveal a direct relationship between zooplankton and the temperature .

Liste des abréviations

ADN	- Acide DésoxyriboNucleique
AWA	- Ecosystem Approach to the management of fisheries and marine environment in West Africa
CTD	- Conductivity Temperature Depth
ECLAIRS	- Etude du climat en Afrique de l'Ouest et ses interactions avec l'environnement régional
GPS	- Géo-Positionnement par Satellite
IRD	- Institut de Recherche pour le Développement
NR	- Navire de Recherche
SST	- Sea Surface Temperature
Sv	- Densité acoustique
UPSEN2	- Upwelling du Sénégal 2013
ZCIT	- Zone de Convergence InterTropicale

Table des matières

Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des abréviations.....	vi
Liste des figures.....	ix
Introduction.....	1
Chapitre 1 : État des connaissances.....	3
1.1 - Généralités sur les systèmes d'upwelling de bord Est.....	3
1.1.1 Dynamique couplée océan-atmosphère.....	6
1.1.2 Description de l'écosystème marin.....	7
1.1.2.1 Le phytoplancton.....	8
1.1.2.2 Le zooplancton.....	10
1.1.2.3 Les petits poissons pélagiques.....	11
1.2 L'upwelling sénégalais.....	11
1.2.1 Phytoplancton.....	13
1.2.2 Zooplancton.....	13
Chapitre 2 : Matériels et méthodes.....	16
2.1 Matériels.....	16
2.1.1 Présentation des campagnes AWA et UPSEN2.....	16
2.2 Méthodes.....	19
2.2.1 Principe de la mesure Acoustique.....	19
2.2.2 Principe de la mesure Scanfish.....	22
2.2.3 Traitement des données.....	23
Chapitre 3 : Résultats et discussions.....	26
3.1 Structuration de la densité acoustique sur le plateau.....	26
3.1.1 Évaluation du zooplancton sur le plateau sénégalais par méthode acoustique.....	26
3.1.2 Distribution côte-large.....	32
3.1.3 Distribution Nord-Sud.....	36
3.2 Lien entre les variables environnementales et la densité acoustique.....	37

3.2.1 Effet de la lumière et comportement nyctéméral.....	37
3.2.2 Effet de la biomasse phytoplanctonique.....	40
3.2.3 Effet de la turbidité.....	42
3.2.4 Effet de la température.....	43
Conclusion et perspectives.....	44
Bibliographie.....	46
Webographie.....	52

Liste des figures

- Figure 1** : Concentration moyenne de Chlorophylle-a en surface sur la période 09/1997-08/2000 à partir des données satellites SeaWiFs (NASA/Goddard Space Flight Center). Pour d'upwelling de Californie, du Humboldt, des Canaries et Benguela sont également indiqués (extrait de Madani et al., 2009)
.....4
- Figure 2** : Schéma du mécanisme de remontée d'eau côtière. Les vents parallèles à la côte et dirigés vers l'Équateur (flèches noires) déplacent les masses d'eau superficielles vers le large. Par effet de compensation, les masses d'eaux profondes remontent au niveau de la côte (flèche rouge). Le gradient côte large de vent parallèle à la côte crée un rotationnel de vent qui permet localement des remontées via le mécanisme de pompage d'Ekman (flèches côte en jaunes) (D'après Rykaczewski et Checkley, 2008)
.....6
- Figure 3** : Schéma illustrant les interactions au sein de écosystème marin.....8
- Figure 4** : Bathymétrie le long de la côte sénégalaise, l'isobathe 100 m en violet et l'isobathe 200 m en noir (Ndoye, 2014).....12
- Figure 5** : Schéma montrant la relation entre le vent (m/s), la température de surface (°C), l'abondance (ind/m³) et la biomasse (mg/m³) sur la petite côte sénégalaise entre 1982 et 1983 (D'après Séret, 1985)
.....15
- Figure 6** : Trajectoire des navires pendant les campagnes a) UPSEN2 (22/02-03/03/2013) et b) AWA (24/02-14/03/2014). La trajectoire AWA (violet sur b) est superposée à la SST MODIS du 25 février 2014 (14h20).....18
- Figure 7**: Navires de recherche océanographique, à gauche le navire THALASSA utilisé pendant la campagne AWA et à droite le navire ANTÉA utilisé pendant la campagne UPSEN2. (HabasqueJ., 2015)
.....18
- Figure 8** : Sondeur acoustique sur la partie latérale d'un navire.....19

Figure 9: Schéma de la propagation d’ondes acoustiques illustrant le changement de pression entre les périodes de compression et d’expansion. D’après (Simmonds et MacLennan, 2005)	22
Figure 10 : Exemple d’un échogramme obtenu après écho-intégration. La ligne épaisse de couleur foncée, en bas de la figure, représente le fond de la mer. La ligne épaisse en haut de la figure, représente la zone aveugle du sondeur. Les écho-traces les plus rouges sont les plus intenses (bancs de poisson) et les plus bleues sont les plus faibles.....	22
Figure 11 : Schéma du Scanfish (poisson remorqué) tracté par un bateau. La courbe orange illustre le mouvement ondulatoire du Scanfish.....	23
Figure 12 : Courbes de l’intensité de la réponse acoustique en fonction de la fréquence pour les grands types de réflecteurs. Issu de Lavery et al. (2007).....	25
Figure13 : Le multinet : filet de pêche à plancton contenant cinq filets.....	27
Figure 14 : Section acoustique à 70 kHz suivant la radiale à 16°29’ N pendant AWA, faite du 03-Mar-2014 06:06:27 au 03-Mar-2014 10:47:04. Les traits noirs en pointillés indiquent la position des stations multinet 1, 2 et 3 effectuées le long de cette section.....	27
Figure 15 : Contribution des principaux groupes de zooplancton à l’abondance totale pour l’ensemble des stations multinet (D’après Rodrigues et al., 2016).....	28
Figure 16 : Variation de l’abondance des copépodes (ind/m ³) en fonction de la profondeur aux stations 1, 2 et 3 localisées sur la Figure 11 (D’après Rodriguez et al., 2016). En blanc, abondance des stations de jour et en noir, abondance de nuit.....	28
Figure 17 : Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 1 de la figure 14. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de Sv par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d’eau par l’analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m ⁻³], d’après Rodrigues et al. (2016) c).....	29
Figure 18 : Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 2 de la figure 14. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de Sv par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d’eau par l’analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m ⁻³], d’après Rodrigues et al. (2016) c).....	30

Figure 19 : Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 3 de la figure 14. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de Sv par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d'eau par l'analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m ⁻³], d'après Rodrigues et al. (2016) c).....	31
Figure 20 : Section acoustique à 16°15'N au Nord du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.....	33
Figure 21 : Section acoustique à 14°N au milieu du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.....	33
Figure 22 : Section acoustique à 12°30'N au Sud du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.....	34
Figure 23 : Densité acoustique (Sv) à 120 kHz en fonction de la bathymétrie pour les campagnes AWA (gauche) et UPSEN2 (droite)	35
Figure 24 : Distribution moyenne de la densité acoustique sur le plateau (0-200 m) en fonction de la latitude pour la campagne AWA 2014 (saison d'upwelling).....	37
Figure 25 : Section acoustique entre 70 et 105 m de profondeur entre les latitudes 14°N (16h11) et 14,72°N (21h43) illustrant la migration verticale du zooplancton.....	38
Figure 26 : Densité acoustique en fonction de la bathymétrie pour la campagne AWA et UPSEN2. En bleu les profiles de jour et en noir les profils de nuit.....	39
Figure 27 : Couplage des données de fluorescence et celles acoustiques a), la densité acoustique en fonction de la longitude. Cette figure montre le lien entre le zooplancton et le phytoplancton trouvé sur le plateau sénégalais pendant la période d'upwelling.....	41
Figure 28 : Section acoustique et Scanfish menée pendant la campagne AWA : a) Densité acoustique [dB] ; b) fluorescence [mgChl-a m ⁻³] et c) turbidité [NTU].....	43
Figure 29 : Section zonale des variables a) densité acoustique [dB], b) température [° C] et c) fluorescence [mgchl-a m-3].....	44

Introduction

Le mot plancton est utilisé pour désigner l'ensemble des organismes, vivant en milieu aquatique et incapables ou peu capables de se mouvoir par eux-mêmes : leurs déplacements dans l'eau sont fortement régis par les courants. Le zooplancton est comme son nom l'indique la partie animale du plancton. De par sa sensibilité aux conditions environnementales, le zooplancton représente un indicateur significatif de l'impact des changements globaux induits par les forçages environnementaux sur les écosystèmes marins.. Le zooplancton assure un rôle de pivot au sein de l'écosystème qui implique une liaison étroite avec les niveaux trophiques inférieurs et supérieurs (Banse, 1995). Le zooplancton constitue en effet un maillon important du réseau trophique en connectant les producteurs primaires avec les échelons trophiques supérieurs. Les larves de poissons (méroplancton) et les petits pélagiques, comme les sardinelles, les sardines et les anchois, se nourrissent préférentiellement de zooplancton (Plounevez et Champalbert, 2000 ; Sabaté et al., 2007 ; Bergeron, 2009 ; Costalago et al., 2011), avant de devenir à leur tour des proies, pour les prédateurs supérieurs tels que les gros poissons et les cétacés. Les perturbations ressenties par le zooplancton se répercuteront donc inévitablement le long du réseau trophique, transitant alors jusqu'aux poissons et aux mammifères marins. Plusieurs exemples démontrent l'importance d'intégrer et de détailler le compartiment zooplanctonique dans les études portant sur les niveaux trophiques supérieurs. Le métazooplancton interagit aussi avec les niveaux inférieurs : d'une part en se nourrissant sur le phytoplancton et le protozooplancton il exerce une pression trophique qui influencera sur la structure en taille de ces communautés (Sommer et Stibor, 2002) et d'autre part, via la production régénérée, il remet à disposition dans le milieu des éléments nutritifs tels que les matières azotées qui seront réutilisées pour la photosynthèse par les autotrophes (Conway et Whitley, 1979). Le zooplancton occupe une large gamme de taille et comprend des organismes aussi variés que des ciliés, des copépodes ou bien des méduses présentant chacun des caractéristiques physiologiques et des cycles de vie bien différents. Des sous-classes ont été définies en considérant la taille des espèces (Sieburth et al., 1978). Le mésozooplancton représente le zooplancton mesurant entre 200 μm et 2 cm, plusieurs groupes fonctionnels sont inclus à l'intérieur mais les organismes généralement majoritaires sont les copépodes (Siokou-Frangou et al., 2010). Toutefois, le mésozooplancton comprend aussi des organismes gélatineux qui peuvent localement dominer la biomasse tels que les salpes (Ménard et

al., 1994). L'hétérogénéité de la distribution spatiale et temporelle du zooplancton vient s'ajouter à sa diversité biologique pour complexifier un peu plus la dynamique du système planctonique. Cette hétérogénéité peut être due à des processus physiques et biologiques qui interviennent à différentes échelles :

- A petite échelle où sont impliqués la turbulence, la stratification de la colonne d'eau ou encore les effets du vent, mais aussi des phénomènes biologiques comme la migration nycthémerale d'une partie du zooplancton (Andersen et al., 2001a, Raybaud et al., 2008).

- A moyenne échelle, où interviennent des phénomènes physiques tels que les gyres, les courants, les fronts ou encore les apports fluviaux et des processus biologiques comme la migration de grosses espèces ou un effort de prédation intense lié à la présence ponctuelle de prédateur (Andersen et al., 2001a ; Andersen et al., 2001b ; Bonnet et al., 2005, Riandey et al., 2005, Sourisseau et Carlotti, 2006 ; Alcaraz et al. 2007, Raybaud et al. 2008, Licandro et Icardi., 2009 ; Zhu et al., 2009). Ainsi pour mieux comprendre le contrôle des phénomènes environnementaux sur l'écosystème marin à petites échelles, deux campagnes écosystémiques ont été réalisées sur les côtes ouest africaines. Ce présent mémoire a pour objectif d'exploiter les données recueillies pendant ces campagnes pour étudier la distribution du zooplancton et son contrôle environnemental sur plateau du Sénégal.

Chapitre 1 : État des connaissances.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les aspects essentiels de la physique et des écosystèmes marins. Dans un premier temps, nous présenterons les principaux systèmes d'upwelling de bord Est et la description de l'écosystème marin. En deuxième lieu, on présentera la zone d'étude et de la dynamique de l'upwelling qui lui est associée. Enfin, nous décrirons la distribution du plancton sur notre domaine d'intérêt.

1.1 - Généralités sur les systèmes d'upwelling de bord Est.

L'upwelling côtier est un processus océan-atmosphère à moyenne échelle qui apparaît le long des côtes ouest de la plupart des continents à basse et moyenne latitude. Par le processus d'upwelling, les eaux profondes, froides et riches en sels nutritifs, viennent remplacer les eaux de surface chassées vers le large via la dynamique d'Ekman qui est induite par le vent. Les sels nutritifs amenés dans les couches superficielles permettent le développement du phytoplancton, premier maillon du réseau trophique marin. Le phénomène d'upwelling côtier est observé lorsqu'un vent souffle parallèlement à la côte en laissant celle-ci à sa gauche dans l'hémisphère Nord et à sa droite dans l'hémisphère Sud. Les principaux systèmes d'upwelling se situent à l'ouest des continents aux latitudes subtropicales (Fig.1). Ces zones sont associées à un régime particulier de vents et de courants et sont sous l'influence des branches Est des centres de hautes pressions (les anticyclones) atmosphériques aux latitudes moyennes. Les vents générés par ces anticyclones sont parallèles à la côte et orientés vers l'équateur. Dans l'océan Atlantique, nous avons l'anticyclone des Açores au Nord et l'anticyclone de Saint Héléne au Sud. Les branches Est de ces anticyclones sont parallèles respectivement aux côtes du Maroc, de la Mauritanie et du Sénégal (côtes situées à gauche de la direction du vent) dans l'hémisphère Nord et aux côtes d'Afrique du sud, d'Angola et de la Namibie (côtes situées à droite de la direction du vent) dans l'hémisphère Sud. Cette configuration favorable à l'upwelling côtier est à l'origine du système d'upwelling des Canaries dans l'Atlantique Nord et du système d'upwelling du Benguela dans l'Atlantique Sud. Dans le Pacifique, nous avons des anticyclones de Hawaï dans l'hémisphère Nord et l'anticyclone des îles de Pâque dans l'hémisphère Sud dont les branches Est donnent des

vents parallèles respectivement aux côtes de la Californie dans l'hémisphère Nord et aux côtes péruviennes et chiliennes dans l'hémisphère Sud. Dans l'océan Pacifique, il y a le système d'upwelling de la Californie dans l'hémisphère Nord et le système du Humboldt dans l'hémisphère Sud. Les systèmes d'upwelling présentent des caractéristiques particulières car source d'une forte activité biogéochimique. On note une forte production en poisson et une très forte production primaire entre 1 et 2,5 gc.m⁻³. j⁻¹ (Carr, 2002).

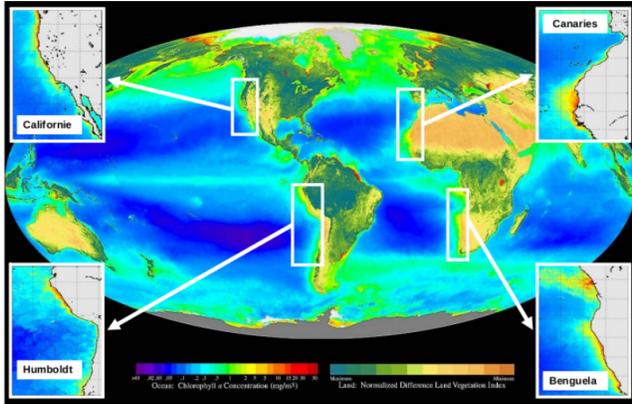


Figure 1: Concentration moyenne de Chlorophylle -a en surface sur la période 09/1997-08/2000 à partir des données satellites SeaWiFs (NASA/Goddard Space Flight Center). Pour le système d'upwelling

de Californie, du Humboldt, des Canaries et Benguela sont également indiqués (extrait de Madani et al., 2009).

L'upwelling côtier sénégalais est déclenché par les alizés qui soufflent dans une direction sensiblement parallèle à la côte (Wooster et al., 1976). Comme expliqué précédemment, le vent met en mouvement les couches superficielles de l'océan qui sont déviées par la force de Coriolis. La résultante s'exprime par un transport orienté vers la droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord et vers la gauche de la direction du vent dans l'hémisphère Sud. La couche océanique sensible aux forçages atmosphériques est appelée la couche d'Ekman. Ekman est le premier à avoir développé les théories de base décrivant l'effet du vent sur les courants (Ekman, 1902). Il considère les équations de la quantité de mouvement et l'état stationnaire d'un océan forcé par le vent avec des frottements.

$$\begin{cases} -fv = \frac{-\partial P}{\rho_0 \partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\rho_0 \partial z} \\ fu = \frac{-\partial P}{\rho_0 \partial y} + \frac{\partial \tau_y}{\rho_0 \partial z} \end{cases} \quad (1)$$

τ_x la composante zonale de la tension du vent.

τ_y la composante méridienne de la tension du vent.

P pression.

ρ_0 densité de référence.

f : force de Coriolis.

u : composante zonale de la vitesse du courant.

v : composante méridienne de la vitesse du courant.

Lorsque qu'on considère que la friction résulte principalement du cisaillement vertical de la tension du vent et qu'on décompose la vitesse en une composante non visqueuse u_G et une composante turbulente u_E , les équations (1) donnent:

$$f \vec{k} \wedge \vec{u}_E = \frac{\partial \vec{\tau}}{\rho_0 \partial z} \quad (2)$$

L'intégration de l'équation (2) de la surface (où la tension turbulente est égale à la tension du vent) jusqu'à la profondeur $-D$ (où la tension turbulente est nulle), on obtient le transport d'Ekman. Le transport d'Ekman des eaux superficielles induit par le vent est orienté à $+90^\circ$ à droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord ($f > 0$) et à -90° dans l'hémisphère Sud. En surface, le courant d'Ekman est orienté à $-/+ 45^\circ$ de la direction du vent.

$$\vec{U}_{ek} = \int_{-D}^0 \vec{u}_e dz = -\vec{k} \wedge \frac{\vec{\tau}_s}{\rho_0} ; U_{ek} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3)$$

Dans le cas d'un vent de direction favorable au transport des eaux de surface vers le large, nous notons une accumulation des eaux au large et un déficit à la côte. Puisque la nature évolue toujours vers un équilibre, le déficit d'eau noté sur la côte sera comblé par une remontée des eaux de fond (upwelling).

La décomposition du transport d'Ekman donne une composante zonale u_{ek} et une composante méridienne v_{ek} (équation). La combinaison des équations de transport d'Ekman et de celle de la continuité (conservation de la matière) donne le pompage d'Ekman (équation).

$$\begin{cases} u_{ek} = \frac{\tau_y^s}{\rho_0 \cdot f} \\ v_{ek} = \frac{-\tau_x^s}{\rho_0 \cdot f} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{ek}^{pomp} = \frac{\text{rot} \left(\frac{\vec{\tau}^s}{f} \right)}{\rho} \cdot \vec{k} \quad (5)$$

τ_x^s et τ_y^s sont les composantes zonale et méridienne de la tension du vent exercée sur la surface de l'océan. Lorsque le rotationnel de la tension du vent est positif, on a alors un pompage positif qui induit des remontées des eaux profondes vers la surface océanique (upwelling) (Fig.2) par contre lorsque on a un rotationnel de la tension du vent négatif, on obtient un pompage d'Ekman dirigé vers le bas qui induit des plongées des eaux de surface vers les profondeurs (downwelling).

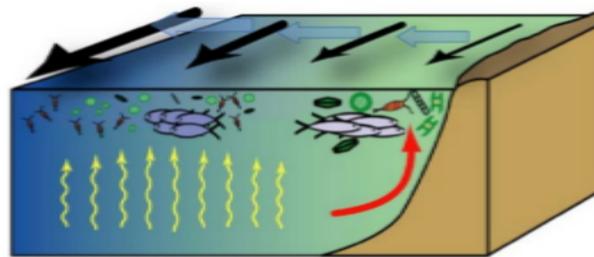


Figure 2 : Schéma du mécanisme de remontée d'eau côtière. Les vents parallèles à la côte et dirigés vers l'Équateur (flèches noires) déplacent les masses d'eau superficielles vers le large (flèches bleues). Par effet de compensation, les masses d'eaux profondes remontent au niveau de la côte (flèche rouge). Le gradient côte large de vent parallèle à la côte crée un rotationnel de vent qui permet localement des remontées via le mécanisme de pompage d'Ekman (flèches jaunes) (D'après Rykaczewski et Checkley, 2008).

1.1.1 Dynamique couplée océan-atmosphère.

Dans l'Atlantique, la circulation atmosphérique dans les basses couches s'organise autour de deux centres d'action permanente que sont les centres de haute pression des Açores dans l'Atlantique Nord et de Saint Hélène dans l'Atlantique Sud. Ces deux centres d'action sont des

systèmes anticycloniques dont les flux dominent le domaine maritime. Ces deux centres conditionnent le flux d'air entre les hautes pressions tropicales et les basses pressions intertropicales. Ces vents permanents sont appelés des Alizés et la limite entre les vents de chaque hémisphère est appelée la zone de convergence intertropicale (ZCIT) ou équateur météorologique. La variation d'intensité et de positionnement des centres d'anticyclone va déterminer l'évolution saisonnière du régime des alizés. Lorsque les vents provenant de l'anticyclone des Açores sont plus forts que ceux de l'anticyclone de Saint Hélène, la ZCIT est repoussée vers Sud. Lorsque les vents venant de l'anticyclone de Saint Hélène sont forts par rapport à ceux des Açores, la ZCIT se positionne vers le Nord : c'est la saison pluvieuse pour ces régions, les eaux du Golf de Guinée chaudes envahissent les régions du Nord Atlantique.

1.1.2 Description de l'écosystème marin.

Dans l'écosystème marin, le phytoplancton assure la transformation de la matière minérale en matière organique en présence de la lumière solaire . C'est ce qu'on appelle la photosynthèse. L'abondance des nutriments dans la couche euphotique accélère le développement du phytoplancton qui à son tour constitue la nourriture du zooplancton qui est aussi la nourriture principale des petits pélagiques. Ce processus d'interaction se passe comme suit : les consommateurs primaires (zooplancton, moules...) se nourrissent de producteurs primaires. Les consommateurs secondaires (petits poissons) se nourrissent de phytoplancton et de zooplancton : ce sont des prédateurs planctivores. Les prédateurs supérieurs comme les phoques et les requins sont au sommet de la chaîne alimentaire, ils constituent les derniers maillons de la chaîne. Les cadavres et les autres débris organiques sont consommés par des organismes décomposeurs, les bactéries. Ces bactéries transforment la matière organique en matière minérale. Ces sels minéraux remis en suspension dans l'eau sont des éléments nutritifs utilisés à nouveau par les végétaux. Lorsque le plancton meurt, il quitte la colonne d'eau et sédimente dans le fond pour devenir une importante source de nourriture pour de nombreux autres organismes vivant en profondeur (Fig.3). Ainsi, le plancton a un rôle essentiel dans la relation entre organismes pélagiques (qui vivent en plein eau), mésopélagiques et benthiques (vivant dans le sédiment).

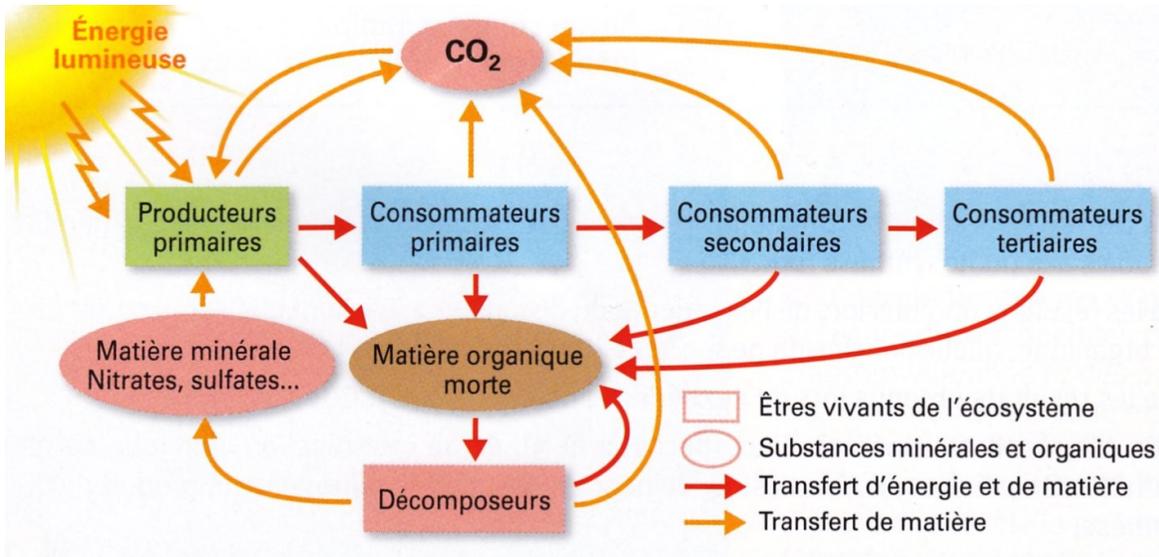


Figure 3: Schéma illustrant les interactions au sein de l'écosystème marin.

Source: <http://raymond.rodriguez1.free.fr/Documents/Biodiversite-popul/ecosysteme.jpg>

(interactions au sein de l'écosystème marin).

1.1.2.1 Le phytoplancton.

Les communautés phytoplanctoniques comprennent des organismes eucaryotes (diatomées, dinoflagellés, coccolithophores ...), c'est à dire dont l'ADN est contenu dans un véritable noyau et les organismes procaryotes dont l'ADN est libre dans le plasma (bactéries). Le phytoplancton eucaryote représente la quasi-totalité du nanoplancton et du micro-plancton tandis que les procaryotes représentent l'essentiel des organismes du picoplancton. Les classes d'algues qui dominent les systèmes d'upwelling appartiennent au microphytoplancton dont les principaux groupes sont décrits ci-dessous.

Les diatomées

La classe des diatomées a longtemps été reconnue comme le groupe principal du phytoplancton marin. Dans le milieu pélagique, les diatomées sont l'un des composants essentiels de la production nouvelle, c'est-à-dire de la production initiale de matière organique des écosystèmes. L'une des principales caractéristiques des diatomées est la présence d'une paroi siliceuse autour de la cellule. Cette paroi montre une différenciation morphologique importante, elle est formée de

silice biogénique. Ces algues sont donc tributaires du silicium pour leur développement et la duplication de l'ADN ; la division cellulaire est impossible en l'absence de cet élément.

Les dinoflagellés

Le terme "dinoflagellé" signifie littéralement "flagelle tournoyant". Les cellules possèdent deux flagelles, de nature protéique. L'action combinée des deux flagelles provoque une lente rotation de la cellule sur son axe lors du déplacement dans l'eau, la faisant ainsi "tournoyer". Dans certaines conditions, notamment lorsque la masse d'eau est stratifiée, les dinoflagellés peuvent se développer de façon si intense qu'ils colorent l'eau. C'est le phénomène de marées rouges. Il est aussi à signaler qu'un grand nombre d'espèces de ce groupe de phytoplancton est doté d'un pouvoir de bioluminescence (fluorescence naturelle). Certains dinoflagellés ont des effets désastreux sur l'économie halieutique à cause de leur aptitude à produire des toxines. Ces toxines peuvent provoquer des empoisonnements graves et parfois mortels chez l'homme par l'intermédiaire de la consommation de mollusques.

Les coccolithophores

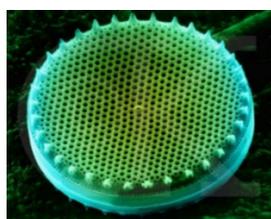
Les coccolithophores possèdent des écailles externes calcifiées, les coccolithes, formés de carbonate de calcium (CaCO_3) et présentent une ornementation complexe sur laquelle est basée la taxonomie de ce groupe. Les coccolithes assemblés forment une paroi externe appelée la coccosphère. Les coccolithophores portent un ou deux types de coccolithes, selon les espèces. Ces pièces calcaires sont susceptibles de s'accumuler en profondeur et de former des dépôts sédimentaires carbonatés importants, ils sont à l'origine des dépôts de craie.

[1]



Coccolithophores

[2]



Diatomée

[3]



Dinoflagellés

[1] Source: <https://www.google.com/search?q=coccolithophores> (image des coccolithophores)

[2] Source: <https://fr.depositphotos.com/124935056/stock-photo-diatoms-unicellular-algae.html>

(image du Diatomée)

[3] Source: <https://fr.depositphotos.com/124935030/stock-photo-dinoflagellates-plankton-flagellate.html>
(image des Dinoflagellés)

1.1.2.2 Le zooplancton.

Tout comme chez le phytoplancton, les classes de taille sont souvent utilisées pour décrire le zooplancton, on reconnaît habituellement deux classes de taille : le micro-zooplancton, le macro-zooplancton. Le zooplancton dominant les systèmes d'upwelling peut être divisé en plusieurs groupes taxonomiques.

Les rotifères

Les rotifères (Embranchement : *Rotifera*) font partie du micro-zooplancton, mais la taille de ces organismes peut varier grandement. Leur cycle de vie est habituellement court et lié aux conditions de température et de nourriture. La plupart des espèces de rotifères sont omnivores et se nourrissent de pico-plancton ainsi que de petits ciliés et flagellés. La taille de l'organisme détermine la taille de ses proies (Wetzel, 2001 ; Kalff, 2002).

Les cladocères

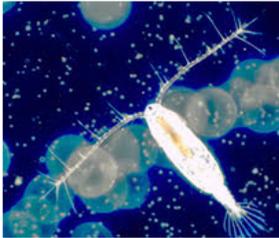
Les cladocères (Sous-ordre : *Cladocera*) sont des crustacés (Embranchement : *Arthropoda*) filtreurs se nourrissant de particules vivantes et détritiques en suspension. Certains sont carnivores et mangent de plus petits zooplanctons (Wetzel, 2001 ; Kalff, 2002).

Les copépodes

Les copépodes (Sous-classe : *Copepoda*) sont le groupe de zooplancton crustacés se reproduisant le moins rapidement, contrairement aux rotifères et cladocères, ces organismes effectuent pour la plupart de la reproduction sexuée. Les organismes passent par de multiples stades de vie et un long temps de développement. Le groupe se subdivise en plusieurs ordres, les trois plus importants sont : les *Cyclopoïdes*, les *Calanoïdes* et les *Harpacticoïdes*. Les *Cyclopoïdes* sont

généralement carnivores, les *Calanoides* sont plutôt omnivores et se nourrissent parfois de rotifères, de ciliés, de bactéries et de détritux.

Copépodes



[1]

Cladocères



[2]

Rotifères



[3]

[1] source: <https://www.google.com/search?q=copépodes> (image du copépode)

[2] source: <https://www.google.com/search?q=cladocères> (image des cladocères)

[3] source: <https://www.google.com/search?q=rotifère> (image des rotifères)

Une autre méthode de classification permet de diviser le zooplancton en deux groupes : le zooplancton permanent qui passe toute la vie sous forme planctonique (holoplancton) et le zooplancton temporaire qui vive sous forme planctonique pendant la phase larvaire (Méroplancton).

1.1.2.3 Les petits poissons pélagiques.

Les poissons pélagiques sont des espèces qui vivent dans les eaux proches de la surface ou entre la surface et le fond. Ils s'alimentent principalement dans la couche de surface et se déplacent souvent en banc et peuplent les écosystèmes. Ces petits poissons consomment préférentiellement des herbivores, ils sont dits alors des consommateurs secondaires. Les familles des Clupeidés, des Carangidés, des Scrombidés et des Engraulidés sont dominantes dans les écosystèmes d'upwelling.

1.2 L'upwelling sénégalais.

Le plateau sénégalais est limité au large par l'isobathe 200 m, au Sud par la latitude 12°N et au Nord par la latitude 17°N (Domain, 1980) (Fig.4). Il couvre une superficie de l'ordre de 26000 km² (Ndoye et al., 2014). En se basant sur les caractéristiques topographiques et dynamiques, le

plateau sénégalais peut être divisé en deux sous-régions dont la presqu'île du Cap-Vert constitue la frontière : un plateau étroit qui engendre des remontées près de la côte au Nord et un plateau large et peu profond au Sud. Au Nord de la presqu'île, le plateau continental est orienté N-NE. Au Sud le plateau continental s'élargit, le talus continental est situé entre 10 et 30 km des côtes. Au niveau de la péninsule du Cap-Vert, le continent s'avance vers l'Ouest diminuant la largeur du plateau. Cette irrégularité de la topographie et celle de la bathymétrie sont d'une importance particulière pour la circulation à la côte. Les travaux réalisés au Sénégal en océanographie depuis les années soixante sur ce plateau ont montré que deux saisons marines aux caractéristiques très différentes se succèdent : une saison chaude et humide entre juillet et octobre et une saison froide et sèche de novembre-décembre à mai-juin. Ces deux saisons sont séparées par des périodes de transition. Pendant la saison froide, les alizés (vent de secteur Nord-Ouest à Nord-Est) s'établissent et engendrent à la côte une résurgence d'eau de subsurface vers la surface. La saison froide et sèche communément appelée saison d'upwelling peut être divisée en deux sous-saisons : une période pendant laquelle l'upwelling est faible, caractérisée par des vents faibles et irréguliers (phase d'installation de alizés) et une période froide à upwelling fort, caractérisée par des vents forts (alizés établis). Le vent est le principal moteur des circulations horizontales et verticales des eaux du plateau. 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, l'orientation Nord-Ouest des alizés favorise la côte sud, mieux exposée du fait de son orientation, où l'upwelling devient plus intense. La saison d'upwelling s'étend jusqu'en juin sur la côte Nord et mai sur la côte Sud et son intensité est maximale entre février et avril (Ndoye et al., 2014).

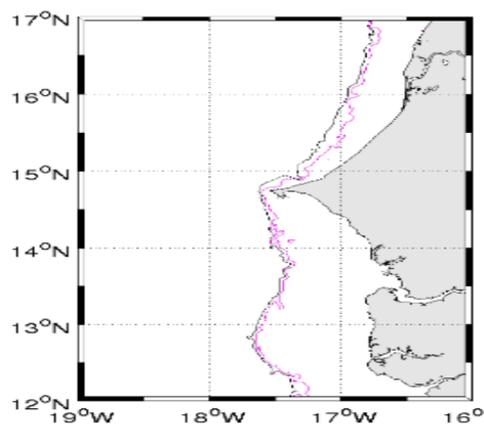


Figure 4 : Bathymétrie le long de la côte sénégalaise, l'isobathe 100 m en violet et l'isobathe 200 m en noir (Ndoye, 2014).

1.2.1 Phytoplancton.

La distribution de la biomasse phytoplanctonique dans la zone sénégalaise présente une forte variabilité saisonnière. En saison chaude, l'apparition tardive des alizés favorise la persistance des eaux guinéennes chaudes et dessalées. Les eaux de surface sont partout chaudes, pauvres en sels nutritifs. La biomasse phytoplanctonique est faible en surface en saison chaude et plus importante en profondeur (Touré, 1991). L'épuisement des sels nutritifs dans la couche superficielle bien éclairée place le phytoplancton dans des conditions déficientes qui l'amènent à s'enfoncer dans la couche profonde où les conditions de disponibilité en sels nutritifs et en lumière sont réunies pour qu'il y ait une photosynthèse. Ce qui montre les fortes concentrations de phytoplancton localisées en profondeur pendant la saison chaude. En période froide, l'intensification des alizés du Nord soufflant parallèlement à la côte est à l'origine du reflux des eaux guinéennes, qui sont alors repoussées vers le large. Il se produit un mouvement vertical des eaux de profondeur vers la surface au niveau de la côte. La thermocline, et la nutricline remontent. L'arrivée en surface de la nutricline enrichit considérablement en sels nutritifs les eaux superficielles soumises à un ensoleillement intense. Les conditions de luminosité et de nutriments sont alors favorables au développement du phytoplancton. La biomasse phytoplanctonique devient alors importante en surface. En terme de distribution sur le plateau sénégalais, les études faites par Touré (1991) ont montré que pendant la saison chaude, on remarque trois zones de développement phytoplanctonique qui se situent le long de la côte sénégalaise : toute la côte Nord de Saint-louis à Cayar, le long de la petite côte et devant l'embouchure de la Casamance (Diouf, 1991). Le développement de cet écosystème phytoplanctonique le long de la côte ne peut s'expliquer que par la régénération de la matière organique dégradée d'origine continentale. Pendant la saison froide, les eaux froides riches en sels nutritifs montent au niveau des centres d'upwelling. Ces eaux envahissent la petite côte de Thiaroye au Sud de Mbour. La croissance du phytoplancton s'accroît sur la côte par contre de faibles valeurs sont observées au large (Diouf, 1991).

1.2.2 Zooplancton.

Le zooplancton trouvé sur les côtes sénégalaises est assez diversifié et beaucoup d'auteurs se sont interrogés sur sa variabilité. Ainsi les travaux de Gaudy (1963) ont permis de classer le zooplancton sur la côte du Sénégal en deux groupes : les espèces pérennes qui se regroupent toute

l'année quelles que soient les conditions hydrologiques (copépodes ...) et les espèces liées à certaines masses d'eau. A l'échelle saisonnière, l'abondance du zooplancton est liée aux fluctuations de l'upwelling auxquelles sont associées une diminution de la diversité et l'augmentation de la biomasse, plus précisément des copépodes herbivores tels que l'espèce *Calanoide carinatus*. Séret (1985) a montré sur la côte sénégalaise que de fortes abondances de zooplancton sont observées de février à mi-mars et de mi-juillet à août (Fig.5). Plusieurs hypothèses ont été mises en avant pour expliquer le deuxième pic observé entre mi-juillet et août, associé aux eaux tropicales réputées pauvres :

1. la reprise des alizés durant quelques jours début juillet et août et la remontée des sources d'upwelling ;
2. la reminéralisation et la mise en suspension des sédiments et les apports de sels nutritifs des effluents urbains ou des fleuves Sénégal et Gambie ;
3. l'alimentation du zooplancton au sommet de la nitracline où la lumière et les sels nutritifs permettent le développement du phytoplancton;

L'étude de synthèse de Diouf (1991) basée sur les travaux de Séret et Médina-Gaertner (1985) sur le zooplancton a montré que bien que ces auteurs aient utilisé les mêmes méthodes d'échantillonnage et les mêmes matériels, leurs résultats sur la variabilité du zooplancton diffèrent. Ceci souligne l'importance de la variabilité du zooplancton dans notre région d'étude, qui est liée à la complexité des mécanismes hydrologiques. En ce qui concerne la variabilité spatiale, la plus forte abondance de zooplancton est observée de la Gambie à la presqu'île de Cap-Vert en période froide (période d'upwelling). En période chaude, c'est au voisinage de la Casamance qu'on trouve les biovolumes les plus importants. En terme de variation côte-large, l'auteur montre que les zones les plus côtières sont les plus riches en zooplancton en période d'upwelling. Par contre, durant la saison chaude, les zones frontales, les stations du milieu ou de la partie externe du plateau sont les plus riches (Bainbridge, 1972).

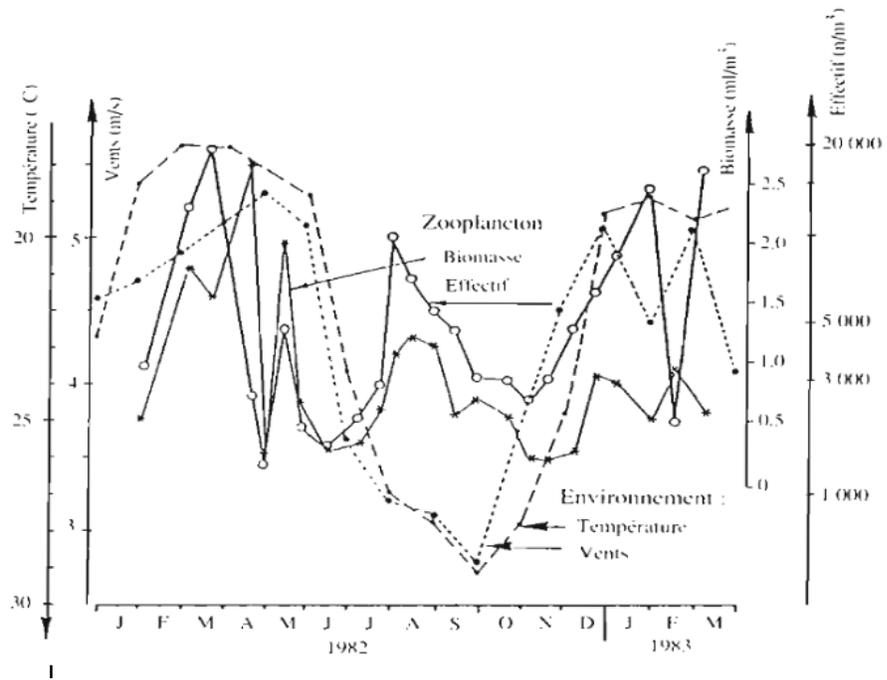


Figure 5 : Schéma montrant la relation entre le vent (m/s), la température de surface (°C), l'abondance (ind/m³) et la biomasse (mg/m³) sur la petite côte sénégalaise entre 1982 et 1983 (D'après Séret, 1985).

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

Dans ce chapitre intitulé matériels et méthodes, nous allons faire une présentation des campagnes AWA et UPSEN2 en premier lieu. En suite, nous expliquerons le principe de fonctionnement du sondeur acoustique et du Scanfish. Enfin, la méthode adoptée pour le traitement des données sera exposée.

2.1 Matériels

Les données utilisées durant ce travail sont issues des campagnes UPSEN2 et AWA effectuées pendant la saison d'upwelling. Ces deux campagnes seront décrites dans les paragraphes qui suivent. Les données AWA utilisées concernent seulement celles collectées dans les eaux sénégalaises car AWA s'intéressait à la côte ouest africaine du Banc d'Arguin jusqu'au Sud du Sénégal. Durant ces deux campagnes, des mesures physiques, chimiques et biologiques ont été faites à bord du bateau de recherche scientifique. Pour ce stage nous nous sommes limités principalement aux données collectées par le Scanfish et celles du sondeur acoustique multifréquence.

Les principes de fonctionnement de ces instruments de mesure seront détaillés dans les sections à venir. Les données Scanfish utilisées sont des données issues des capteurs de température, de turbidité, de fluorescence, de pression et de conductivité.

Ces capteurs sont incorporés au Scanfish et suivent le mouvement ondulatoire du Scanfish entre la surface et une profondeur donnée, c'est ce qui permet de donner le profil vertical des paramètres mesurés.

2.1.1 Présentation des campagnes AWA et UPSEN2.

Le système d'upwelling des Canaries n'a bénéficié depuis plusieurs décennies que d'un nombre limité d'études physiques et biogéochimiques, malgré l'importance de sa ressource halieutique pour les pays limitrophes (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau, Cap-Vert et Guinée). Afin de combler ces lacunes et d'accompagner la mise en place progressive d'une approche écosystémique des pêcheries ouest-africaines, un effort important a été déployé avec la réalisation

des campagnes dont UPSEN2 en 2013 et AWA en 2014 dans le cadre du projet IRD-BMBF AWA et du Laboratoire Mixte International ECLAIRS.

La campagne UPSEN2 s'intéresse au processus d'upwelling côtier, et notamment aux mécanismes impliqués dans le positionnement de la cellule de remontée d'eau profonde et aux conséquences biogéochimiques et écosystémiques. Elle est dédiée aussi à l'estimation de la composition et de la distribution spatiale du zooplancton et des petits pélagiques par acoustique multifréquence et sonar multi-faisceau. La campagne UPSEN2 s'est déroulée du 20 février au 3 mars 2013 à bord d'un navire de recherche N.R Antéa dans les eaux sénégalaises (Fig.6a), (Fig.7). Elle a regroupé entre autre des physiciens, biogéochimistes et halieutes qui ont travaillé dans un cadre interdisciplinaire. Ces travaux sont conduits dans le but d'améliorer la compréhension du fonctionnement dynamique et biogéochimique du système d'upwelling de la petite côte du Sénégal (Sud de Dakar) qui était limité à une vision superficielle (image satellite). Cette campagne couvre une zone relativement réduite (environ 150 km en latitude et 100 km en longitude) de manière répétée (4 à 8 passages sur 3 radiales de références). Ceci fournit une vue détaillée du fonctionnement du système d'upwelling et de l'activité biogéochimique et de leurs évolutions en réponse aux fluctuations du vent.

Du 24 février au 14 mars 2014, les eaux sous régionales situées dans la partie méridionale du grand écosystème du courant des Canaries, ont été le théâtre d'une campagne scientifique AWA menée à bord du (NR) Thalassa (Fig.6b), (Fig.7). La campagne AWA, comme UPSEN2, est menée dans un cadre interdisciplinaire avec une forte collaboration entre physiciens, biogéochimistes, écologues et halieutes. Le but de la campagne AWA est de couvrir l'ensemble de la partie du Sud du système des Canaries qui constitue une zone cohérente en terme de masses d'eau, courantologie et peuplement de petits pélagiques (dominée par les *Sardinella Aurita*), l'objectif étant de comprendre le fonctionnement de l'écosystème afin de mieux appréhender les problématiques liées aux changements climatiques. La zone couverte par la campagne AWA est plus vaste comparée à la campagne UPSEN 2013. Elle couvre la zone côtière de l'Afrique de l'Ouest allant de $\sim 20^{\circ}\text{N}$ jusqu'à $\sim 12^{\circ}\text{N}$. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la partie Sud de la campagne associée aux eaux sénégalaises (12° - 16°N).

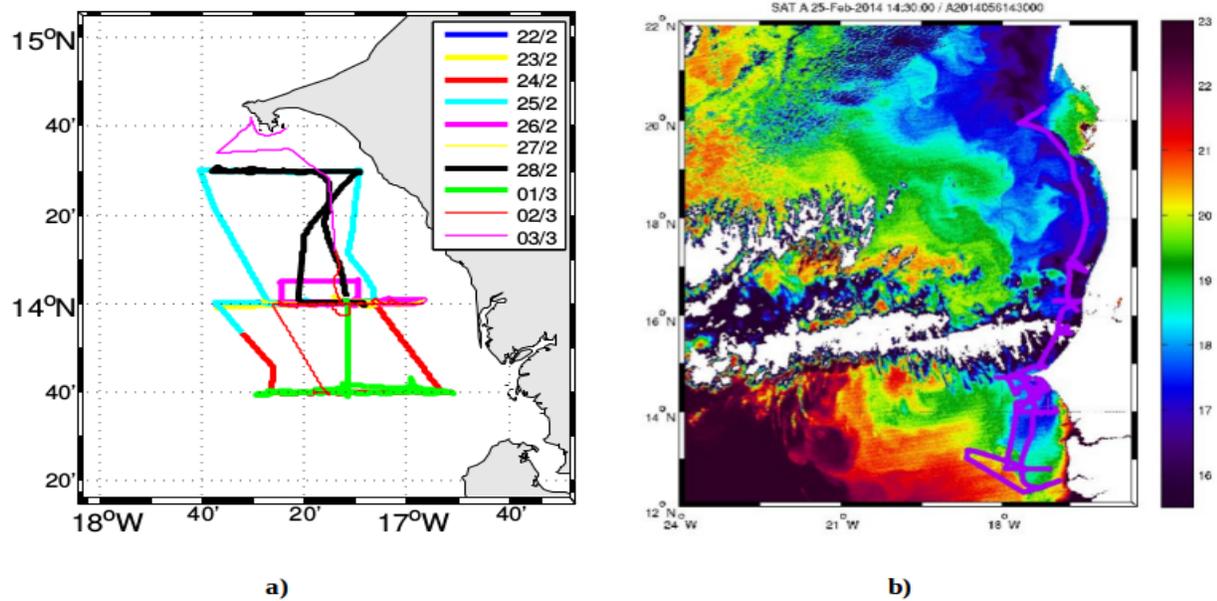


Figure 6 : Trajectoire des navires pendant les campagnes a) UPSEN2 (22/02-03/03/2013) et b) AWA (24/02-14/03/2014). La trajectoire AWA (violet sur b) est superposée à la SST MODIS du 25 février 2014 (14h20), figure extraite de la fiche de valorisation de la campagne AWA.



Figure 7: Navires de recherche océanographique, à gauche le navire THALASSA utilisé pendant la campagne AWA et à droite le navire ANTÉA utilisé pendant la campagne UPSEN2. (Habasque J., 2015).

2.2 Méthodes

2.2.1 Principe de la mesure Acoustique.

Un sondeur est un système acoustique sous-marin composé de transducteurs (émetteurs) et d'antennes qui transforment l'énergie électrique en énergie acoustique et vice versa (Fig.8). On distingue plusieurs types de sondeurs acoustiques utilisés en halieutique, il s'agit entre autres des sondeurs verticaux et des sondeurs multi-faisceaux. Ces sondeurs acoustiques fonctionnent par transformation de l'énergie électrique du générateur d'impulsion en énergie acoustique. Comme le transducteur n'émet pas dans toutes les directions, l'énergie acoustique est transmise dans l'eau par un faisceau et traverse la colonne d'eau. Cette onde acoustique émise par le sondeur se propage à travers une tranche d'eau, se réfléchit sur un obstacle (matière contenues dans l'eau, plancton et le fond) et revient dans la direction inverse vers l'antenne. La mesure respectivement du temps nécessaire au signal pour parcourir le trajet navire/obstacle/navire et de la différence de fréquence permet d'accéder à la profondeur et à la densité acoustique des particules en présence dans l'eau. Ces particules sont de nature différente en termes de réflexion acoustique. En effet, dans l'eau les types de cible réflecteur de l'onde acoustique sont entre autres le poisson, la matière en suspension, les roches, les gaz, le plancton...

Ces particules ont une propriété différente de celle de l'eau du point de vue acoustique (la vitesse de l'onde dans l'objet, la densité...). Les études précédentes ont montré que dans la diffusion des ondes acoustiques par le poisson, la contribution principale est due à la vessie natatoire, (poche d'air). De 80 à 90% de l'écho d'un poisson vient de cette vessie gazeuse. Les autres organes contribuant à l'écho sont la colonne vertébrale et la masse musculaire. Toutefois, l'impédance de ces constituants étant proche de celle de l'eau, leur contribution est faible.



Figure 8: Sondeur acoustique sur la partie latérale d'un navire (Habasque J., 2015)

Technique d'écho.intégration

Les ondes acoustiques sont similaires aux ondes lumineuses par leur caractère ondulatoire. Elles sont absorbées beaucoup moins rapidement que la lumière dans l'eau, ce qui explique leur large utilisation dans le domaine maritime. De manière schématique, une onde acoustique est une succession de phases de compression et d'expansion des particules du milieu (ici l'eau) ce sont les oscillations qui se déplacent dans des directions privilégiées, décrites par la fonction de directivité (Fig.9). La fréquence f représente le nombre d'oscillations par seconde et s'exprime en Hertz (Hz). La période T (Hz^{-1}) est l'inverse de la fréquence :

$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

La distance entre deux fronts d'onde successifs, la longueur d'onde λ (en mm), définit la résolution spatiale maximale de détections des objets.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (7)$$

k est le nombre d'ondes.

Lorsque l'on connaît la fréquence à laquelle l'onde est émise et sa longueur, on peut alors calculer la vitesse de cette onde dans l'eau c (en m/s).

$$c = \lambda f \quad (8)$$

Dans les études acoustiques, c'est l'intensité I du flux acoustique, c'est-à-dire son énergie par unité de surface, qui est mesurée. Elle s'exprime comme le ratio entre l'intensité incidente I_1 et l'intensité réfléctée par une cible I_2 , et s'exprime en décibels (dB). Le décibel est une unité logarithmique avec laquelle il est possible d'exprimer, sur une gamme de valeurs réduite, des changements d'intensité qui couvrent plusieurs ordres de grandeur dans l'échelle arithmétique.

$$I(\text{dB}) = 10 \times \log_{10} \frac{I_2}{I_1} \quad (9)$$

Lorsque l'onde acoustique rencontre une cible, une partie de l'énergie incidente est rétrodiffusée en direction du transducteur. Les échos des cibles sont enregistrés par le transducteur qui fonctionne comme un hydrophone entre chaque émission. Le temps écoulé entre l'émission et la réception d'un écho est proportionnel à la distance à laquelle se trouve la cible. Lorsqu'une seule cible est détectée par le faisceau acoustique, sa réponse est exprimée en terme de surface réfléchissante ou "backscattering" (σ_{bs} , exprimée en m^2). La surface réfléchissante représente l'aire d'un réflecteur standard qui produirait un signal équivalent au signal reçu.

$$\sigma_{bs} = \frac{R^2 I_2}{I_1} \quad (10)$$

où I_1 et I_2 sont les intensités incidente et rétrodiffusée et R la distance à laquelle se trouve la cible. Les σ_{bs} sont exprimés en échelle arithmétique et il est souvent plus pratique d'utiliser son équivalent en échelle logarithmique : l'indice de cible ou "Target Strength" (TS, exprimé en décibels).

$$TS = 10 \times \log_{10}(\sigma_{bs}) \quad (11)$$

Lorsque plusieurs cibles individuelles sont contenues dans le volume échantillonné, le signal reçu est une combinaison de leurs échos et il n'est alors plus possible de discriminer les cibles individuellement. La réponse acoustique des cibles situées dans un volume donné est exprimée en terme d'intensité acoustique par unité de volume (*volume backscattering coefficient*, sv).

$$sv = \frac{\sum \sigma_{bs}}{V_0} \quad (12)$$

La sv est la somme des indices de toutes les cibles contenues dans le volume V_0 . Comme pour la détection des cibles individuelles, il est plus pratique d'utiliser l'équivalent en échelle logarithmique :

$$Sv = 10 \times \log_{10}(sv) \quad (13)$$

Cette équation exprime le fait que l'intensité acoustique est proportionnelle au nombre de cibles échantillonnées dans le faisceau acoustique, et permet donc de quantifier la densité des organismes. Les Sv rétrodiffusées au cours du temps (abscisses) et en fonction de la distance au

transducteur (ordonnées) sont classiquement représentés en deux dimensions dans des échogrammes (Fig.10). L'intensité de chaque écho est représentée par une palette de couleurs allant par exemple, du rouge pour les réflecteurs les plus forts (surface, fond de la mer, bancs de poissons) au bleu pour les réflecteurs les plus faibles (couches diffusantes).

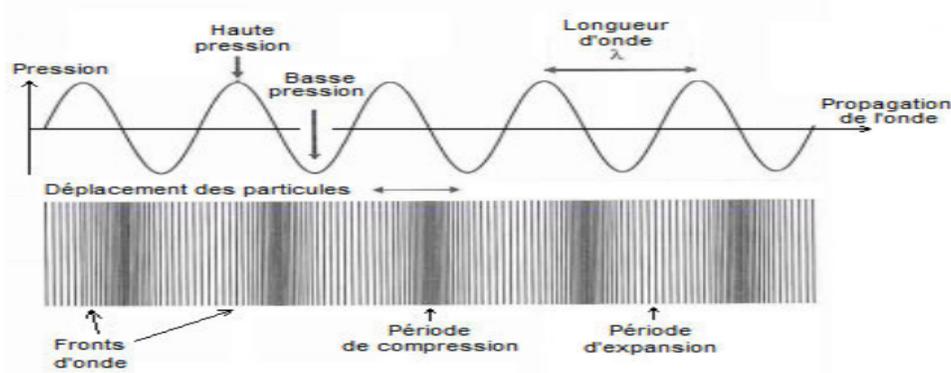


Figure 9 : Schéma de la propagation d'ondes acoustiques illustrant le changement de pression entre les périodes de compression et d'expansion. D'après (Simmonds et MacLennan, 2005).

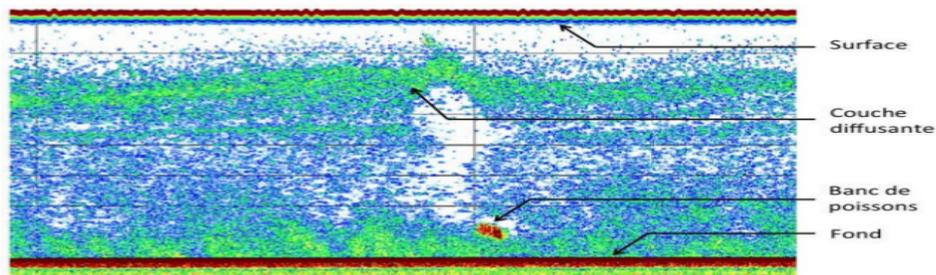


Figure 10 : Exemple d'un échogramme obtenu après écho-intégration. La ligne épaisse de couleur foncée, en bas de la figure, représente le fond de la mer. La ligne épaisse en haut de la figure, représente la zone aveugle du sondeur. Les écho-traces les plus rouges sont les plus intenses (bancs de poissons) et les plus bleues sont les plus faibles.

2.2.2 Principe de la mesure Scanfish.

Le Scanfish est un « poisson » remorqué qui, tracté par le navire porteur, permet la réalisation de sections hydrologiques à haute résolution temporelle. Pratiquement, le Scanfish permet de réaliser des profils de mesures de la surface à environ 100 m de profondeur avec une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre. Le système est composé du vecteur (poisson), de son treuil et de capteurs intégrés à la demande. Dans notre cas, le Scanfish est équipé d'une sonde CTD Seabird

(SBE49) mesurant la pression, la température et la salinité ainsi que d'un fluorimètre et/ou turbidimètre mesurant la fluorescence et la turbidité de l'eau de mer. Les données sont acquises et géolocalisées en temps réel à bord d'un navire, via le logiciel constructeur, grâce au câble électroporteur dont son treuil est équipé. Des ailerons situés à l'arrière du Scanfish lui permettent de pouvoir monter ou descendre (Fig.11). Ainsi, en fonctionnement, le robot réalise des oscillations successives bornées par des profondeurs maximum et minimum données. Pendant ces ondulations, le poisson réalise des mesures et les envoie à l'ordinateur de bord en temps réel. Une Bathysonde est de même nécessaire pour réaliser des prélèvements d'eau à intervalles espacés pour calibrer ces mesures.

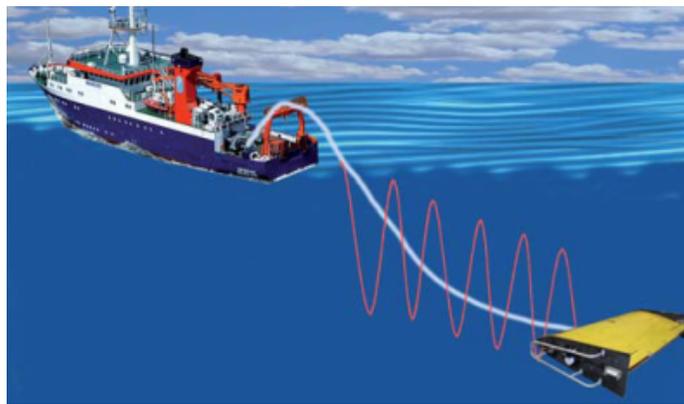


Figure 11 : Schéma du Scanfish (poisson remorqué) tracté par un bateau. La courbe orange illustre le mouvement ondulatoire du Scanfish (Habasque J., 2015).

2.2.3 Traitement des données.

Le traitement de données brutes acoustiques récoltées connaît deux phases de traitement : une phase de correction et une phase de traitement.

Durant la phase de correction, les données brutes acoustiques récoltées directement par le sondeur acoustique subissent une correction. Ce travail s'articule autour du nettoyage du signal qui consiste à l'isolement des effets parasites comme le bruit du navire par exemple.

La couche des premiers mètres de surface est aussi éliminée car le sillage du navire et les vagues génèrent des nuages de bulle d'air qui ont une contribution non négligeable sur le signal acoustique. La bonne détection du fond doit ensuite être vérifiée, en effet, la présence de banc de

poissons au fond peut générer des détections aberrantes qu'il faut corriger. Après la correction des bruits et la détection de fond, le signal est intégré et donne la densité acoustique (par unité de distance et de profondeur). Cette phase est connue sous le nom de l'écho-intégration. C'est cette densité acoustique fruit de l'écho-intégration que nous utiliserons dans ce travail. Les données corrigées, sont ensuite analysées via un ordinateur équipé d'un logiciel de calcul et de programmation scientifique (Matlab). En premier lieu, les trajets des bateaux ont été visualisés en traçant des variables longitude et latitude enregistrées par le GPS. Cette visualisation nous permet de voir la zone de couverture de ces deux campagnes (Fig.6). En deuxième lieu, les profils des paramètres mesurés par le Scanfish tels que la température, la fluorescence, la turbidité, la salinité et la pression ont été aussi visualisés. Ainsi à travers un algorithme de détection de la couche de diffusion acoustique, nous avons visualisé les profils de densité acoustique pour chaque section à des fréquences données. Pour faire un lien entre la dynamique de l'upwelling et la structuration des organismes de notre région, nous avons regardé en parallèle les densités acoustiques et les profils des différentes variables enregistrées par le Scanfish. Nous nous sommes concentrés sur les sections permettant d'étudier la structuration côte-large des communautés de zooplancton. La Figure 12 nous a permis de voir la structuration du zooplancton autrement dit ce que le signal acoustique pourrait représenter en terme de population zooplanctonique. Cette figure est extraite de Habasque J. 2015 représente la réponse fréquentielle des grands types de réflecteurs planctoniques et des poissons.

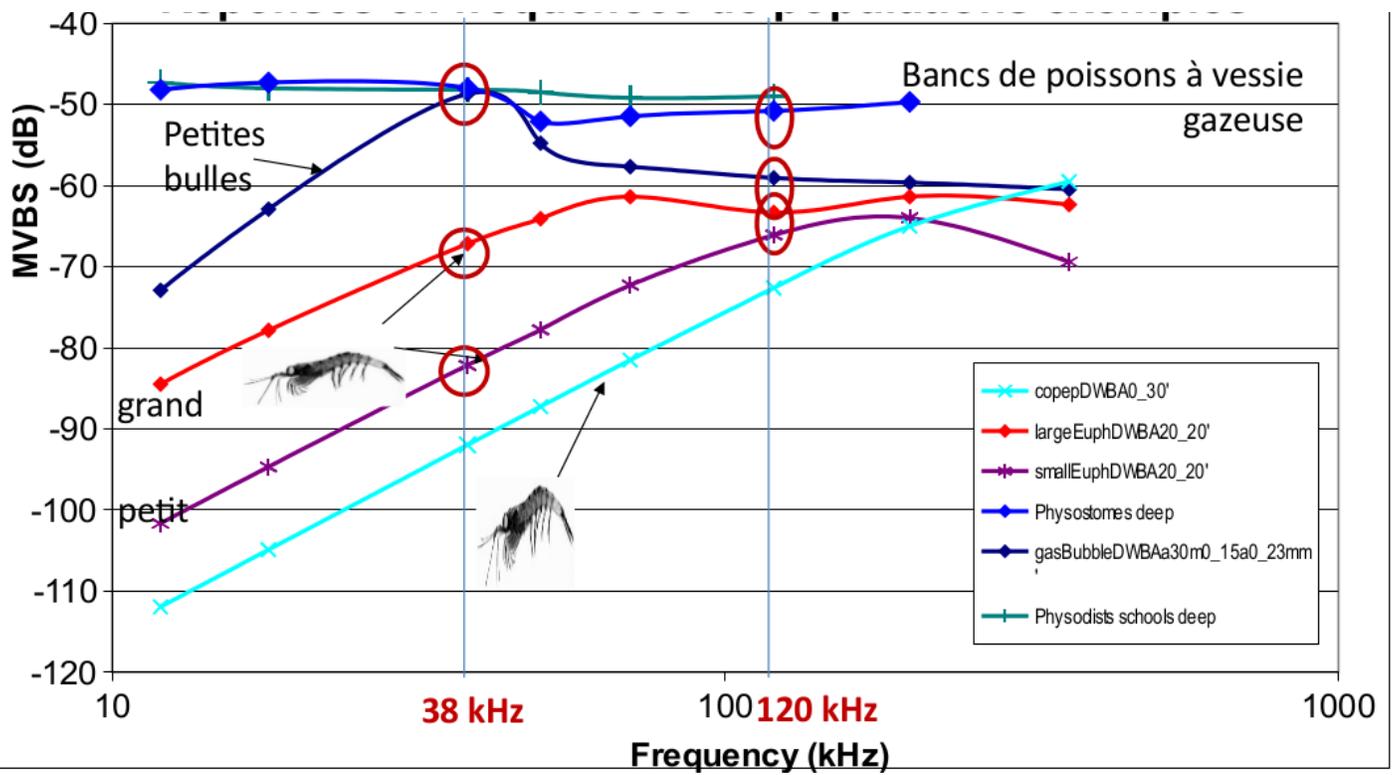


Figure 12 : Courbes de l'intensité de la réponse acoustique en fonction de la fréquence pour les grands types de réflecteurs. Extrait de Habasque J. (2015)

Chapitre 3 : Résultats et discussions.

3.1 Structuration de la densité acoustique sur le plateau.

Les organismes planctoniques sont détectés par les ondes acoustiques selon le même processus physique de rétrodiffusion que les poissons. Ce sont cependant des organismes beaucoup plus petits que les poissons qui sont proches les uns des autres dans la colonne d'eau. Les échos qu'ils génèrent prennent la forme de couches diffusantes sur les échogrammes. Cette partie du mémoire aura pour but d'étudier le rôle des structures hydrodynamiques sur la distribution du zooplancton en utilisant les informations issues de la densité acoustique des couches diffusantes sur le plateau du Sénégal.

3.1.1 Évaluation du zooplancton sur le plateau sénégalais par méthode acoustique.

Les organismes zooplanctoniques présentent des distributions spatiales agrégées à large échelle et des variations inter-annuelles et saisonnières complexes (Levin, 1992). Or, ces organismes sont appréhendés par des méthodes d'échantillonnage discrètes et grossières dans le temps et dans l'espace. L'observation de ces organismes se fait majoritairement par leur collecte avec des filets à plancton. Les caractéristiques des nombreux filets à plancton varient en fonction de la classe de taille considérée et de la question scientifique à laquelle l'étude s'intéresse. Cependant, les filets sont généralement utilisés en station, impliquant l'arrêt ou le fort ralentissement du navire, ce qui limite la surface potentiellement échantillonnée. L'identification manuelle des échantillons par des experts est généralement très chronophage. L'acoustique sous-marine est donc une des seules techniques qui permet d'assurer une couverture spatio-temporelle capturant la variabilité naturelle haute fréquence de l'environnement marin et des communautés de zooplancton qui y vit. La méthode acoustique basée sur la technique d'écho-intégration est utilisée pour évaluer les stocks des pélagiques. Les sondeurs multifréquences permettent de voir l'indice de réflexion des cibles. La combinaison des différentes fréquences permet de discriminer les grandes cibles telles que les poissons, les bancs de poissons et des petites cibles comme le plancton. En effet l'intérêt de cette section est d'évaluer le zooplancton sur le plateau par la méthode acoustique. Pour ce

faire nous avons utilisé dans un premier temps la section acoustique faite au Nord du Sénégal à 16°29'N pendant la campagne AWA. Le choix de cette section s'explique du fait que des échantillonnages in-situ à l'aide d'un multinet ont été effectués pour certaines stations localisées le long de la section acoustique côte-large (Fig.14). Le multinet est un instrument de pêche du plancton contenant cinq filets qui permettent de collecter les communautés à des profondeurs données (Fig.13). La détermination des groupes dominants et des spectres de taille a été faite à l'aide d'un Zooscan (Rodrigues et al., 2016 ; Gorsky et al., 2010). A travers cette étude Rodrigues et al. (2016) ont montré que les copépodes dominent sur le plateau (Fig.15). Les auteurs ont également déterminé la répartition des copépodes dans la colonne d'eau par couche (Fig.16). Ces copépodes sont plus abondants pour les stations 1 et 2 sur le plateau que pour la station 3 (à l'extérieur du plateau).



Figure13 : Le multinet : filet de pêche à plancton contenant cinq filets.

source : <https://www.hydrobios.de/product/multinet/> (image du multinet)

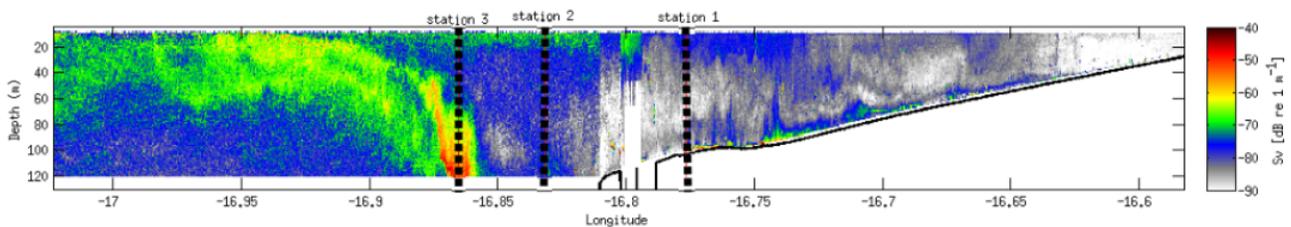


Figure 14 : Section acoustique à 70 kHz suivant la radiale à 16°29' N pendant AWA, faite du 03-Mar-2014 à 06:06:27 au 03-Mar-2014 à 10:47:04. Les traits noirs en pointillés indiquent la position des stations multinet 1, 2 et 3 effectuées le long de cette section.

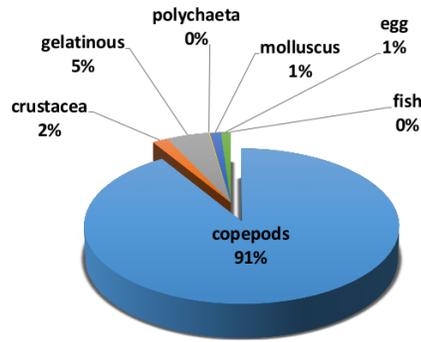


Figure 15 : Contribution des principaux groupes de zooplancton à l'abondance totale pour l'ensemble des stations multinet (D'après Rodrigues et al., 2016).

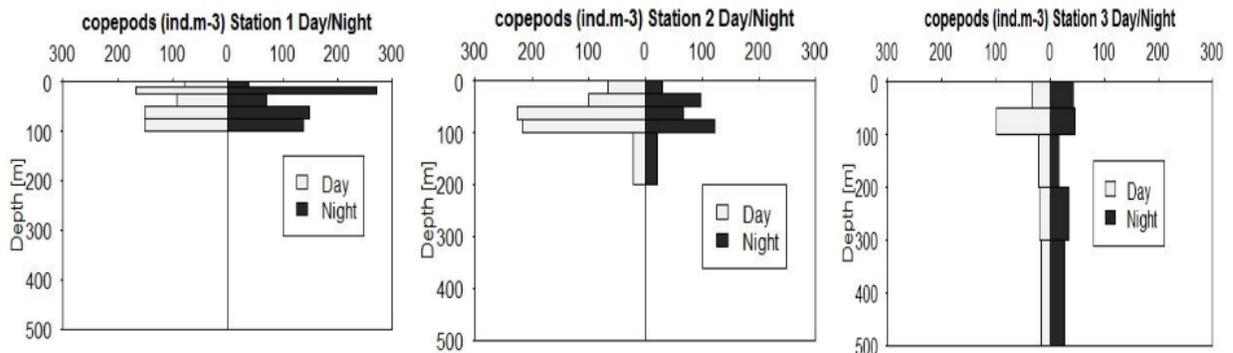


Figure 16 : Variation de l'abondance des copépodes (ind/m³) en fonction de la profondeur aux stations 1, 2 et 3 localisées sur la figure 14 (D'après Rodriguez et al., 2016). En blanc, abondance des stations de jour et en noir, abondance de nuit.

Cette partie consiste à comparer la distribution du zooplancton vue par acoustique aux observations de communautés de zooplancton échantillonnées à l'aide d'un multinet. Pour cela nous ne tiendrons compte que des données du multinet acquises de jour car la section acoustique est faite pendant la journée.

Station 1

La station 1 est caractérisée par un profil acoustique variant quasi linéairement en fonction de la profondeur (Fig.17a). Ceci pourrait être dû à la présence d'espèces de caractéristiques acoustiques proches. Lorsqu'on regarde l'évolution de la moyenne par couche de la densité acoustique en fonction de la fréquence (Fig.17b), nous constatons une évolution décroissante de

cette densité sur la couche 0-25 m contrairement aux couches 25-50 m, 50-75 m et 75-100 m. La couche 75-100 m montre une augmentation à partir ~ 120 kHz par rapport aux couches 25-50 m et 50-75 m. D'après la réponse en fréquence des populations types (Fig.12), l'évolution décroissante sur la couche 0-25 m permet de supposer que cette couche contient des bulles d'air. Le spectre croissant sur les couches 25-50 m, 50-75 m et 75-100 m montre que ces couches contiennent de copépodes. D'après l'abondance calculée à partir des échantillons du multinet (Fig.17c), les couches 50-75 m et 75-100 m ont des abondances identiques de l'ordre de 150 ind.m^{-3} et l'abondance de la couche 25-50 m est de l'ordre de 100 ind.m^{-3} . L'augmentation de la pente du spectre de la couche 75-100 m à partir ~ 120 kHz montre que la couche 75-100 m contient plus de copépodes que celle de 50-75 m. L'abondance identique dans les couches 50-75 m et 75-100 m (Fig.17c) et l'augmentation de la pente du spectre de la couche 75-100 m par rapport au spectre de la couche 50-75 m à partir ~ 120 kHz montrent que cette couche contient probablement des organismes plus gros comme les petits euphausiacés (Fig.12) qui ont pu éviter d'être capturés dans le filet du multinet.

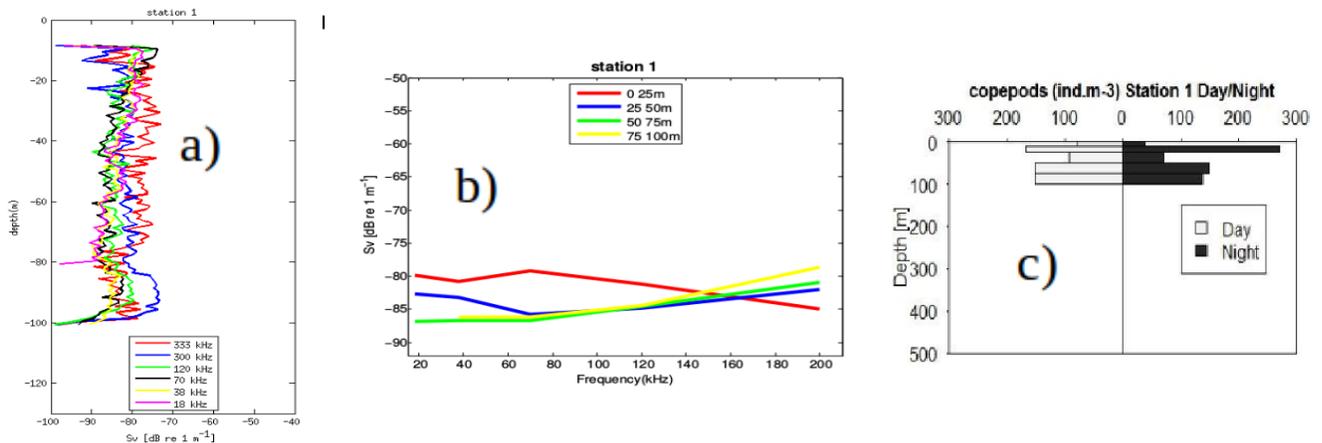


Figure 17: Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 1 localisée sur la figure 14. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de Sv par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d'eau par l'analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m^{-3}], d'après Rodrigues et al., (2016) c).

Station 2 :

Sur la station 2 les valeurs de Sv varient quasi linéairement en fonction de la profondeur (Fig.18a). Comme pour la station 1, la station 2 est caractérisée par la présence d'espèces aux

comportements acoustiques voisins. Les spectres de densité montrent que l'ensemble des couches présentent une même allure du spectre, c'est à dire une variation de la moyenne de Sv croissante en fonction de la fréquence. Les densités sont 5 à 10 Sv plus fortes que pour la station 1. Mais la couche 0-25 m est également 5 à 10 Sv plus forte que les autres. La faible abondance observée pour cette couche de surface (Fig.18c), ses densités plus fortes et la forme en cloche du spectre aux faibles fréquences laissent supposer la présence de bulles dans cette couche de surface. La couche 25-50 m présente deux fois moins de copépodes par m³ que les couches 50-75 m et 75-100 m. Cela se traduit par une différence de densité moyenne sur ces couches de 3-4 dB aux plus hautes fréquences. Au vue des abondances entre les couches 50-75 m et 75-100 m, on s'attendrait à avoir des densités moyennes très proches. Elles sont effectivement très proches mais la pente du spectre de la couche 50-75 m est plus forte, notamment pour les basses fréquences (18 à 120 kHz ; Fig.18b). Entre 100 et 125 m, l'abondance de copépodes est plus faible mais les densités restent plus fortes que pour la couche 25-50 m où l'abondance est plus forte. Le spectre dans cette couche est néanmoins quasiment plat.

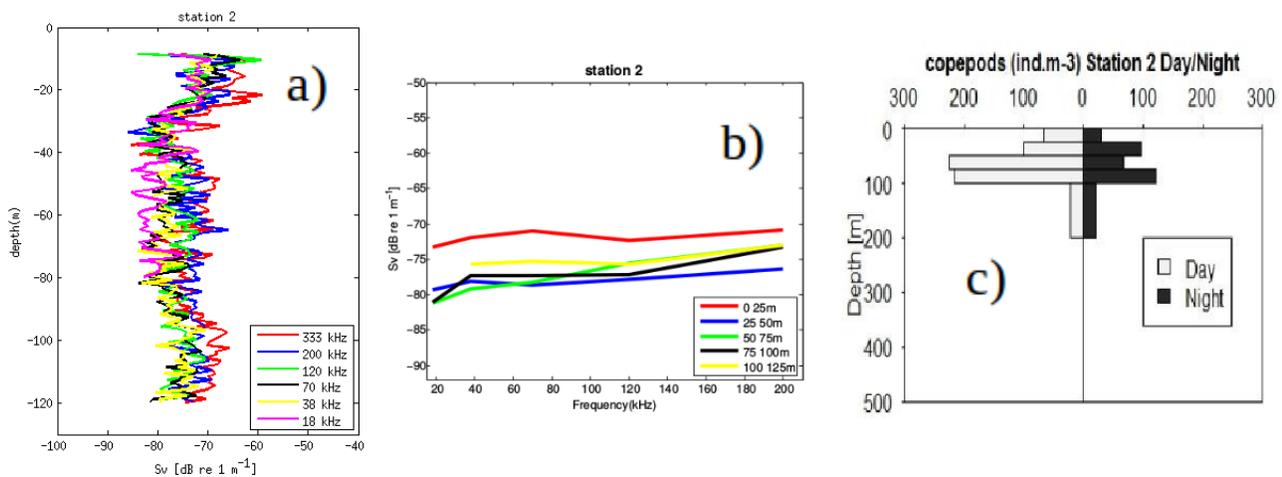


Figure 18: Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 2 localisée sur la figure 14. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de Sv par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d'eau par l'analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m⁻³], d'après Rodrigues et al. (2016) c).

Station 3 :

La station 3 est caractérisée par un profil acoustique qui croît avec la profondeur (Fig.19a). La couche 100-125 m présente des fortes valeurs de densité (S_v variant entre -50 et -55 dB) qui nous indique que ce signal acoustique n'est pas dû aux copépodes mais plutôt à des organismes à inclusion gazeuse comme les poissons (Fig.12). L'allure du spectre de la couche 0-25 m montre que cette couche de surface contient probablement beaucoup de bulles d'air. Dans la couche 25-50 m, les densités sont faibles mais plus fortes qu'aux stations 1 et 2 avec une abondance plus faible de copépodes (bien que l'abondance ait été estimée sur une couche de 50 m). La forme du spectre aux basses fréquences indique la présence potentielle de bulles dans cette couche. L'abondance est également moyennée dans la couche 50-100 m mais ce sont les couches présentant les plus fortes abondances pour cette station ($\sim 100 \text{ ind./m}^3$). La pente du spectre est plus forte pour la couche 50-75 m que pour la couche 75-100 m (Fig.19b) tandis que la densité moyenne est 5 à 10 dB plus forte pour cette dernière couche. Cette couche prend probablement en compte le banc de poissons qui semble être défini dans la couche inférieure. Les fortes densités et la pente associée à la couche 50-75 m à proximité d'un banc de poissons pourraient indiquer la présence d'euphausiacés qui n'ont pas forcément été capturés vu leur plus grande capacité d'évitement aux filets.

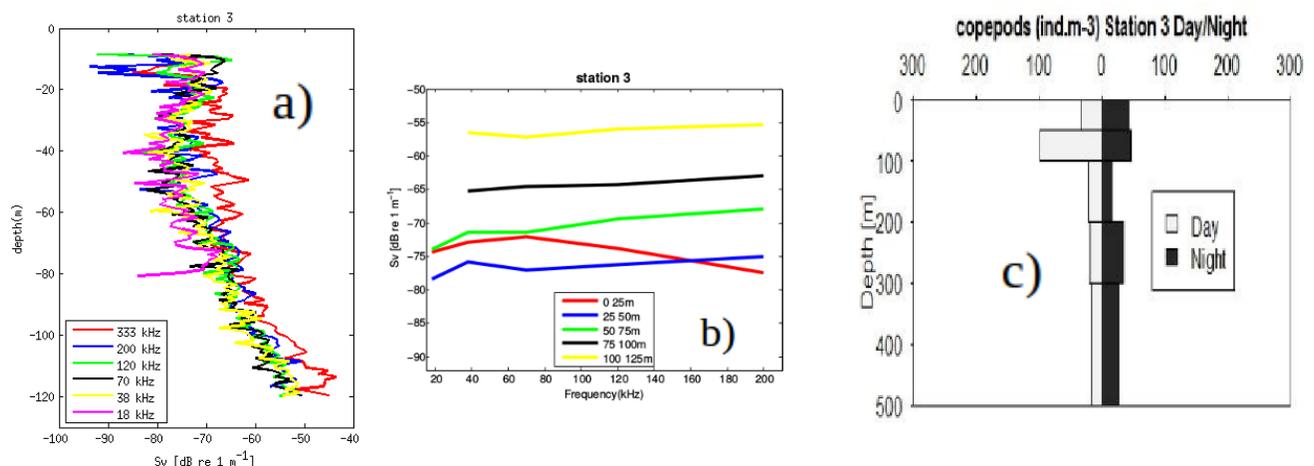


Figure 19: Comparaison des données acoustiques à celles du multinet pour la station 3 localisée sur la figure 13. Profils acoustiques aux fréquences 18, 38, 70, 120, 200 et 333 kHz a), Spectres acoustiques par couche de 25 m (moyenne de S_v par couche en fonction de la fréquence entre la couche de surface et 100 m de profondeur) b) et distribution des copépodes dans la colonne d'eau par l'analyse Zooscan des échantillons multinet [ind.m^{-3}], d'après Rodrigues et al. (2016) c).

En somme, lorsqu'on fait une analyse globale entre les données acoustiques et celles du multinet sur ces trois stations, nous remarquons que le niveau de la densité acoustique n'est pas fonction du nombre de copépodes. Par exemple l'abondance en copépode est minimale à la station 3 et est associée à un niveau élevé de Sv.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène :

- L'hypothèse de la couche diffusante homogène en copépode est fausse, c'est-à-dire que la couche visible par l'échogramme ne contient pas uniquement des copépodes mais aussi des micro-organismes qui peuvent passer à travers les mailles du filet ou des macro-organismes qui peuvent éviter le filet tels que les euphausiacés, les larves de poisson,
- La surface échantillonnée par le multinet est restreinte comparée à celle de l'acoustique.
- La présence des grands réflecteurs acoustiques (type poisson) qui génère un masquage relativement fort empêche la détection d'une grande partie de l'écho intéressant.

3.1.2 Distribution côte-large

Dans cette section, il est question d'étudier la distribution côte-large du zooplancton sur le plateau du Sénégal à partir des données acoustiques. Dans un premier temps, pour illustrer cette distribution, nous montrons 3 transects effectués à différentes latitudes : une section au Nord du plateau à 16°15'N (Fig.20), une au milieu du plateau à 14°N (Fig.21) et une au Sud du plateau à 12°30'N (Fig.22). Les densités acoustiques montrent l'existence d'un gradient de densité croissant de la côte vers la bordure externe du plateau. En effet les zones côtières de bathymétrie faible sont caractérisées par une densité acoustique faible et presque homogène (Sv autour de -85 dB) pour la plupart des sections acoustiques. Par contre pour les zones plus profondes, une densité acoustique hétérogène et beaucoup plus contrastée est remarquée. L'allure de la moyenne de Sv montre une évolution croissante des côtes vers la bordure du plateau.

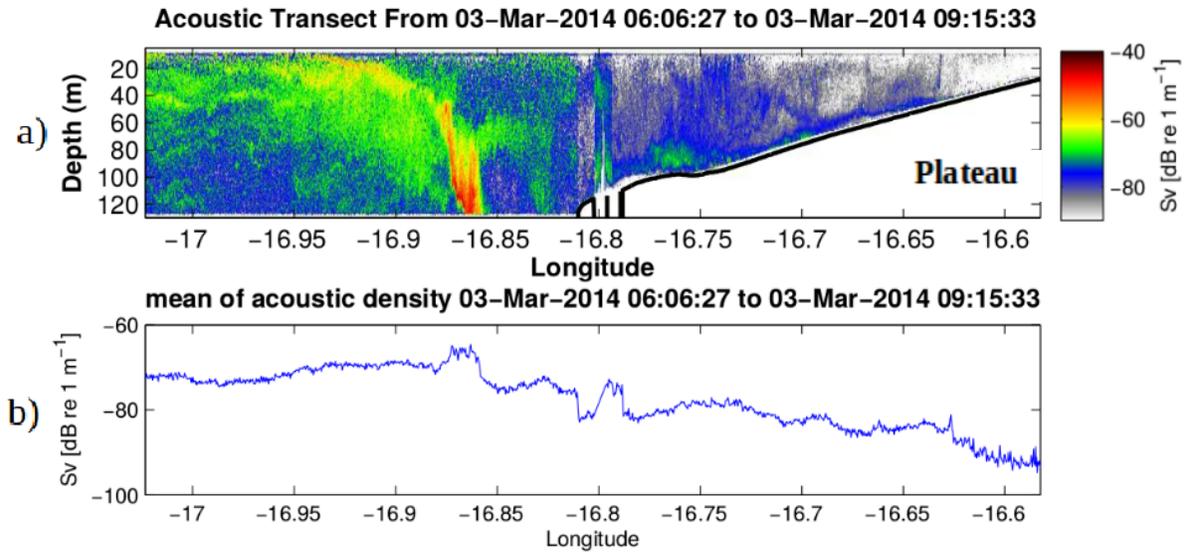


Figure 20: Section acoustique à 16°15'N au Nord du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.

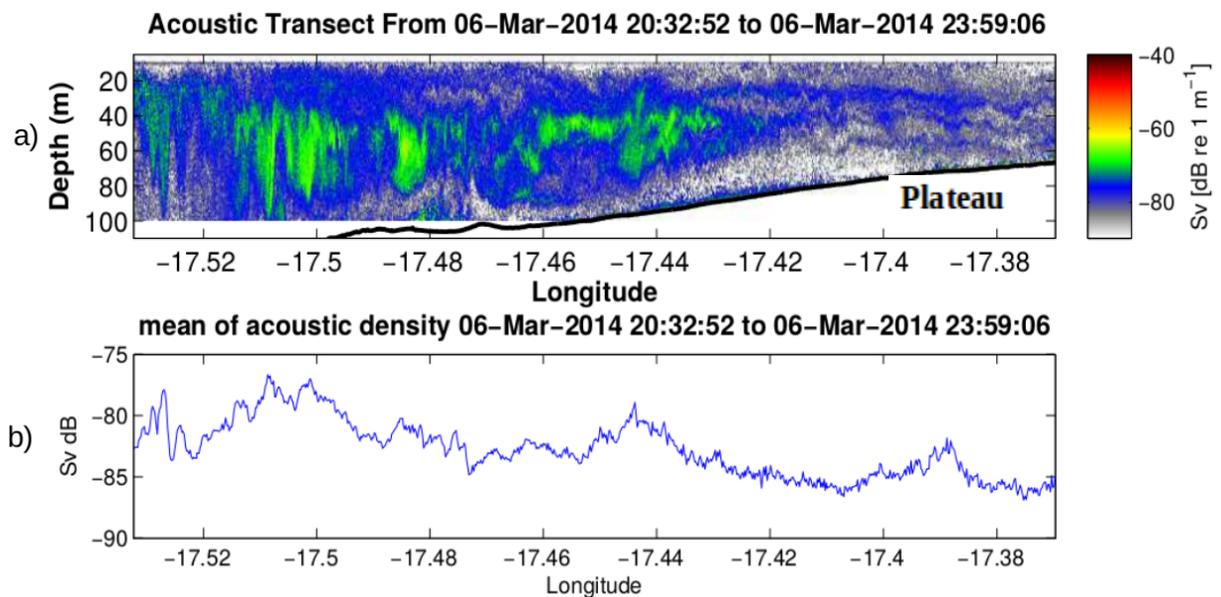


Figure 21 : Section acoustique à 14°N au milieu du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.

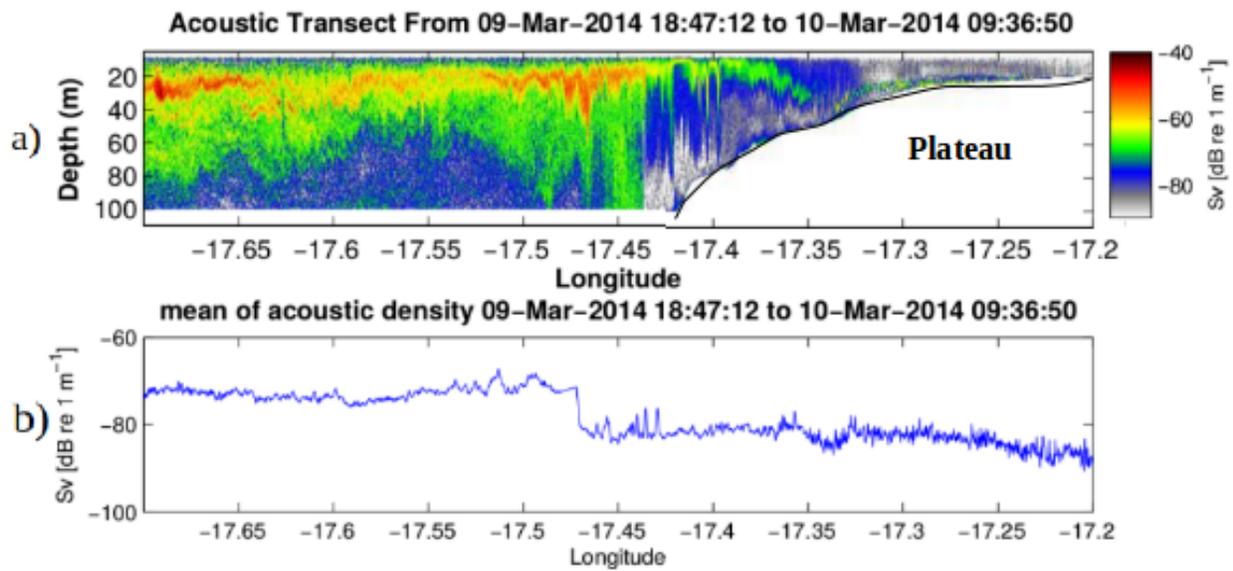


Figure 22 : Section acoustique à 12°30'N au Sud du plateau sénégalais pendant la campagne AWA à une fréquence de 70 kHz : a) Section de la densité acoustique et b) moyenne verticale de la densité acoustique.

Pour étudier l'évolution côte-large de la densité acoustique sur le plateau, la moyenne de Sv est représentée en fonction de la bathymétrie pour les campagnes AWA et UPSEN2 (Fig.23). Ces figures montrent que le zooplancton est distribué de la même manière c'est dire que la densité moyenne sur la colonne d'eau augmente avec la profondeur.

La faible concentration du zooplancton observée dans les zones les plus côtières pourrait être expliquée par une forte prédation du zooplancton par les prédateurs supérieurs dans ces zones peu profondes. La distribution côte-large pourrait aussi être influencée par la dynamique d'upwelling. Comme expliqué dans les paragraphes précédents, l'upwelling est caractérisé par une remontée des eaux profondes, qui viennent remplacer celles de surface chassées vers le large. Ce mouvement de ces masses d'eaux peuvent entraîner des organismes vers le large. Ce résultat est en concordance avec ceux issus des études menées par Séguin et Ibanez (1974), Séguin (1966), Médina-Gaertner (1985). Ces auteurs signalent qu'en période d'upwelling, des espèces habituellement considérées comme néritiques peuvent se concentrer au large vraisemblablement entraînées par les alizés (dynamique d'upwelling). Par contre Bainbridge (1972) a montré le

contraire à travers son étude menée grâce aux deux campagnes de récoltes de zooplancton par filets à plancton le long des côtes africaines du cap-vert à la Sierra-Léone. L'auteur a conclu que le zooplancton est plus abondant dans les stations les plus côtières. Cette divergence des résultats pourrait être due au fait que les filets de pêche à plancton échantillonnent des surfaces restreintes et son usage perturbe le système et provoque la fuite de certaines espèces. En outre comme explicité dans le paragraphe intitulé « évaluation du zooplancton par la méthode acoustique », les macro-organismes dotés d'un pouvoir d'évitement du filet plus grand et des micro-organismes capables de pénétrer à travers les mailles du filet, sont sous-échantillonnés.

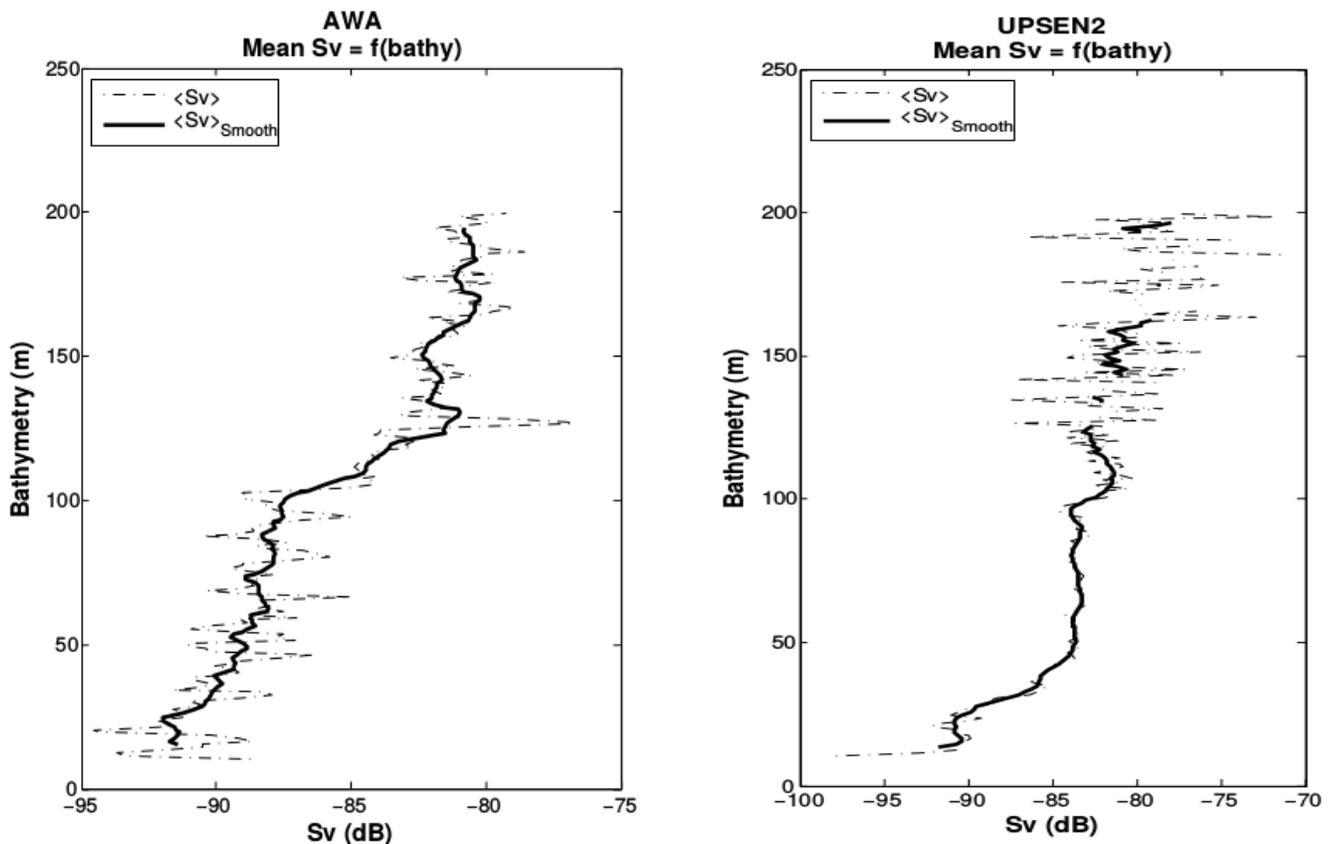


Figure 23 : Densité acoustique (Sv) à 120 kHz en fonction de la bathymétrie pour les campagnes AWA (gauche) et UPSEN2 (droite).

3.1.3 Distribution Nord-Sud.

L'allure de la moyenne de Sv en fonction de la latitude sur tout le plateau nous permet de distinguer trois zones de fortes densités acoustiques pendant la campagne AWA qui s'est déroulée

pendant la saison d'upwelling. Il s'agit de la zone Sud au large de la Casamance (entre $\sim 12,5$ et $13,5^\circ\text{N}$), la zone au voisinage de Dakar et Kayar (entre $14,5$ et $15,5^\circ\text{N}$) et la zone située au voisinage de la ville de Saint-louis (entre $\sim 16^\circ$ et 17°N) (Fig.24). La forte concentration du zooplancton observée au voisinage de la région de Dakar pourrait être due aux apports importants en sels nutritifs d'origine urbaine. En réalité les eaux usées d'origine anthropique et industrielle drainent de la matière organique en décomposition et de la matière minérale. Ces nutriments viennent s'ajouter aux sels nutritifs amenés en surface via la dynamique d'upwelling. Ainsi la disponibilité accrue des sels nutritifs va permettre un fort développement du phytoplancton qui à son tour peut soutenir le développement du zooplancton. Les pics observés au Nord et au Sud du plateau pourraient être dus aux apports fluviaux du Sénégal, de la Gambie et de la Casamance en sels nutritifs qui viennent s'ajouter aux sels nutritifs disponibles via la dynamique d'upwelling. Les zones côtières recevant des apports importants d'eaux douces et de nutriments en provenance des fleuves montrent en général une productivité accrue en raison des activités anthropiques (rejets industriels et ménagers). En réalité pendant la saison des pluies, les fleuves comme les océans reçoivent une grande quantité de la matière organique et minérale. Ces matières sont drainées par les eaux de ruissellement en provenance des bassins versants lorsqu'il pleut. La situation du fleuve dans le continent fait que le fleuve reçoit plus ces matières que l'océan. Pendant la saison non pluvieuse, les seuls apports reçus par l'océan (hormis les apports atmosphériques) se font au niveau des embouchures. Une autre raison pourrait être à l'origine de ces zones de plus fortes densités acoustiques, notamment au nord de Dakar et au large de la Casamance. En effet ces deux zones ont été identifiées comme étant des zones de rétention privilégiées. A ce titre, elles sont susceptibles de permettre le développement des espèces en présence et de concentrer les proies et prédateurs.

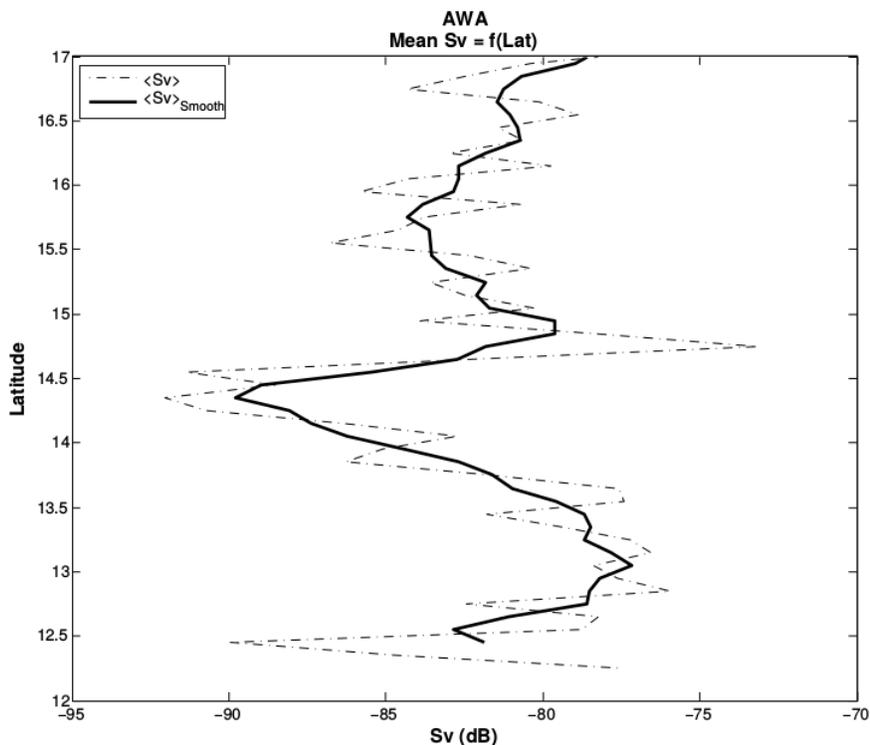


Figure 24: Distribution moyenne de la densité acoustique à 120 kHz sur le plateau (0-200 m) en fonction de la latitude pour la campagne AWA 2014 (saison d’upwelling).

3.2 Lien entre les variables environnementales et la densité acoustique.

Cette partie a pour but de comprendre la variabilité biotique et abiotique de l’environnement de ces petits pélagiques et de comprendre comment cet environnement structure ces communautés de petits pélagiques en terme de distribution et de variabilité. Pour ce faire nous allons étudier le comportement du zooplancton en présence ou en absence de la lumière, puis nous regarderons les effets de la biomasse phytoplanctonique, de la turbidité et de la température.

3.2.1 Effet de la lumière et comportement nyctéméral.

Par définition le terme nyctémère est un terme technique utilisé en écologie pour désigner une alternance d’un jour et d’une nuit correspondant à un cycle biologique de 24 heures. Ce cycle inclut chez la plupart des espèces complexes une période de veille et une période de sommeil. Pour étudier le comportement nyctéméral du zooplancton sur le plateau, nous présentons la

distribution d'un transect acoustique réalisé pendant la campagne AWA fait entre 16 h et 21 h dans des profondeurs comprises entre 70 et 100 m de 14,01°N à 14,72°N (Fig.25) puis nous montrerons la distribution de Sv en fonction de la bathymétrie en faisant une distinction jour-nuit pour les campagnes AWA et UPSEN2 (Fig.26). L'analyse de la figure 25 montre que de 16 h à ~18 h, la couche de forte Sv est au fond. Par contre de ~ 18 h à la fin du transect, la couche de forte Sv est au voisinage de la surface. Cette différence de positionnement de la couche de forte Sv peut s'expliquer par la migration verticale quotidienne du zooplancton. En fin de journée le zooplancton migre des eaux de subsurface vers les eaux de surface où le phytoplancton croit pendant la journée grâce à la lumière. Pendant la journée le zooplancton redescend en profondeur vers les eaux sombres où la vision du prédateur est réduite.

La figure 26 tente de généraliser le comportement du zooplancton entre le jour et la nuit en montrant la densité acoustique moyennée sur la colonne d'eau en fonction de la profondeur pour les campagnes AWA et UPSEN2. La différence de densité moyenne est beaucoup plus visible sur les petits fonds (bathymétrie < 50 m). La distinction de Sv jour-nuit montre que Sv est plus forte pendant la nuit sur les petits fonds (bathymétrie ~ < 50 m) que dans les zones de bathymétrie supérieure à 50 m où nous constatons une différence faible de Sv entre la journée et la nuit. Cette différence de distribution sur les petits fonds pourrait être due à la migration des organismes zooplanctoniques. L'hypothèse qui pourrait expliquer cette différence de Sv sur les petits fonds est que le zooplancton migre verticalement et qu'il « disparaît » dans les sédiments en journée. Cette migration serait à l'origine des faibles Sv notées pendant la journée dans les petits fonds.

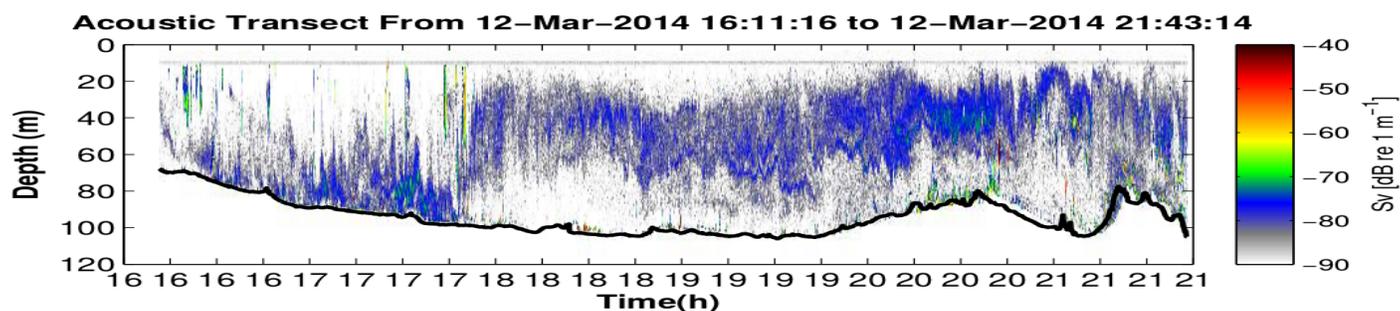


Figure 25 : Section acoustique à 70 kHz entre 70 et 105 m de profondeur entre les latitudes 14°N (16h11) et 14,72°N (21h43) illustrant la migration verticale du zooplancton.

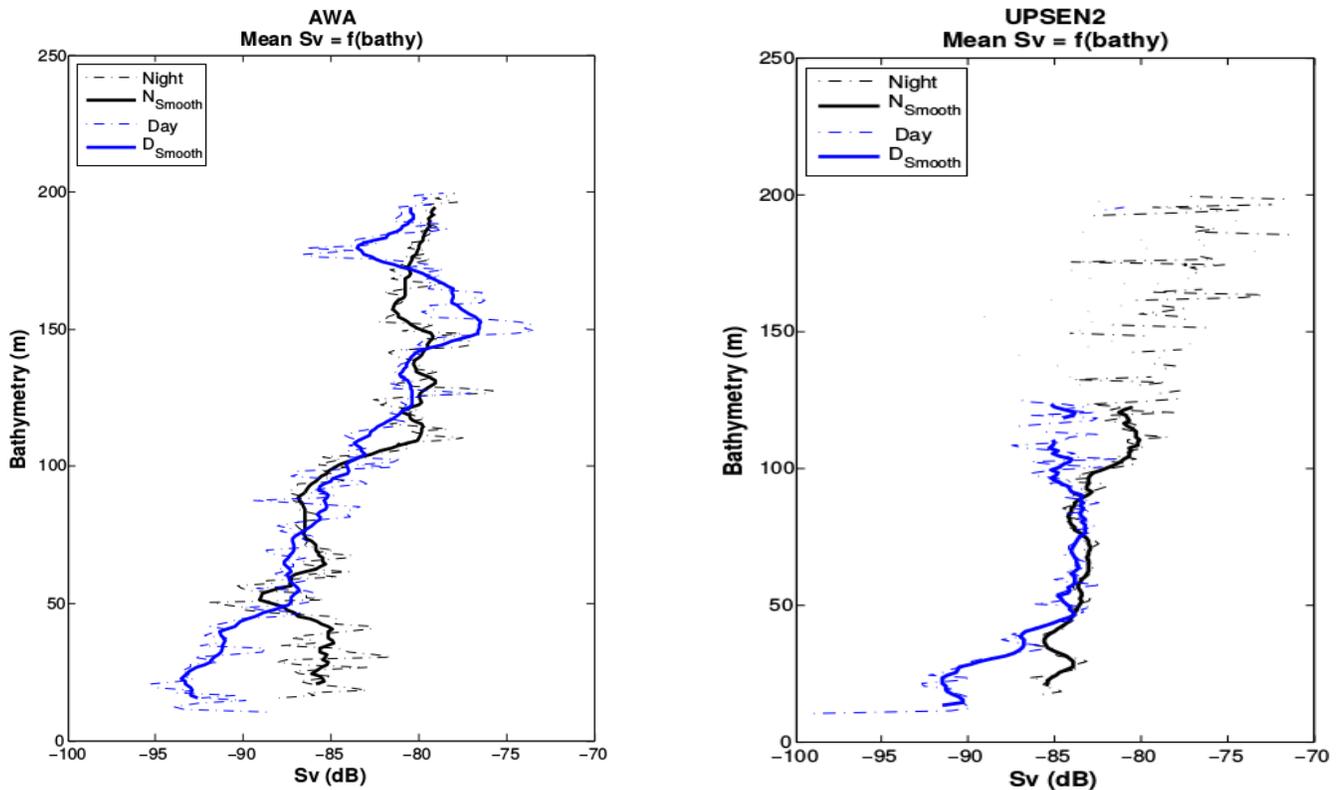


Figure 26 : Densité acoustique à une fréquence de 120 kHz en fonction de la bathymétrie pour la campagne AWA et UPSEN2. En bleu les profils de jour et en noir les profils de nuit.

Le comportement de migration cyclique est observé dans la plupart des grandes formes de zooplancton, dans les écosystèmes d'eau douce comme dans les écosystèmes d'eau salée (Putzeys et Hernandez-Leon, 2005). Il est généralement et majoritairement reconnu que la migration du zooplancton a lieu en réponse à la pression de prédation exercée par les prédateurs invertébrés (Burks et al., 2002 ; Van de Meutter et al., 2004 ; Van de Meutter et al., 2005) et par les prédateurs vertébrés, les poissons, selon leur régime alimentaire aux différents stades de vie (White, 1998; Lauridsen et al., 1999; Romare et al., 2003). Par conséquent ce n'est pas toute la communauté zooplanctonique qui est sujette à effectuer des migrations, mais plutôt les espèces ciblées par les prédateurs. Ces prédateurs comme les poissons planctivores, chassent généralement à vue. Leurs proies de prédilection sont donc les grosses formes de zooplancton aisément discernables (Lampert, 1993 ; Masson et al., 2001). Il s'agit en fait de l'hypothèse généralement acceptée pour expliquer les mouvements migratoires verticaux (Lampert, 1993). Le

zooplancton remonte dans la colonne d'eau en soirée et redescend à l'aube évitant ainsi la lumière qui trahirait sa présence aux prédateurs. Les groupes de zooplancton les plus visibles tels que les individus très colorés ou les femelles portant des œufs sont reconnus pour faire une migration verticale de plus forte amplitude. Étant plus facilement repérables par les prédateurs potentiels, ces groupes de zooplancton évitent d'autant plus la zone éclairée de la colonne d'eau. L'amplitude de la migration verticale varie selon les propriétés de l'eau (Wissel et Ramacharan, 2003). Plus l'eau est claire, plus la capacité de détection des prédateurs s'affine et plus le zooplancton doit descendre profondément dans la colonne d'eau le jour. L'amplitude de la migration varie selon l'abondance et le degré d'activité des prédateurs (Loose, 1993). En cas de gradient thermique faible et de nourriture abondante en eaux profondes, le zooplancton reste en zone sécuritaire et évite de migrer, ce qui ne lui serait pas énergétiquement profitable dans ce cas. De toute évidence le zooplancton tend à éviter les prédateurs. Ces derniers exsudent des signaux chimiques (kairomones) et c'est leur concentration dans l'eau qui stimule la migration (Loose, 1993). En effet, si les signaux chimiques dégagés par les prédateurs suffisent à préparer le zooplancton à la migration, ce sont les variations de l'intensité lumineuse qui la gèrent (Ringelberg, 1991). Les kairomones libérées par les poissons ne joueraient que le rôle d'alarme pour le zooplancton (Ringelberg, 1993b). En plus de ces facteurs influençant la migration verticale du zooplancton vient s'ajouter l'effet de la disponibilité de la ressource. Ce facteur sera mis en évidence sur la section suivante.

3.2.2 Effet de la biomasse phytoplanctonique.

Pour mieux mettre en évidence l'effet de la biomasse phytoplanctonique sur le zooplancton, nous avons utilisé le signal acoustique qui permet de voir la distribution du zooplancton et la fluorescence pour quantifier la biomasse de phytoplancton mesurée par le Scanfish (Fig.27). La partie gauche de la figure 27 correspond aux données collectées pendant la journée. Le maximum de fluorescence est localisé dans la couche de surface pendant toute la section. L'analyse en parallèle entre données acoustiques et fluorescence montre une dissociation entre les fortes valeurs de la densité acoustique et celles de la fluorescence pendant le jour. Par contre un couplage est noté pendant la nuit. Autrement dit lorsqu'on relie ces variables aux communautés qu'elles quantifient, on pourra dire que pendant la journée le phytoplancton et le zooplancton

vivent dans des zones différentes alors que la nuit ces deux espèces se concentrent dans les eaux de surface.

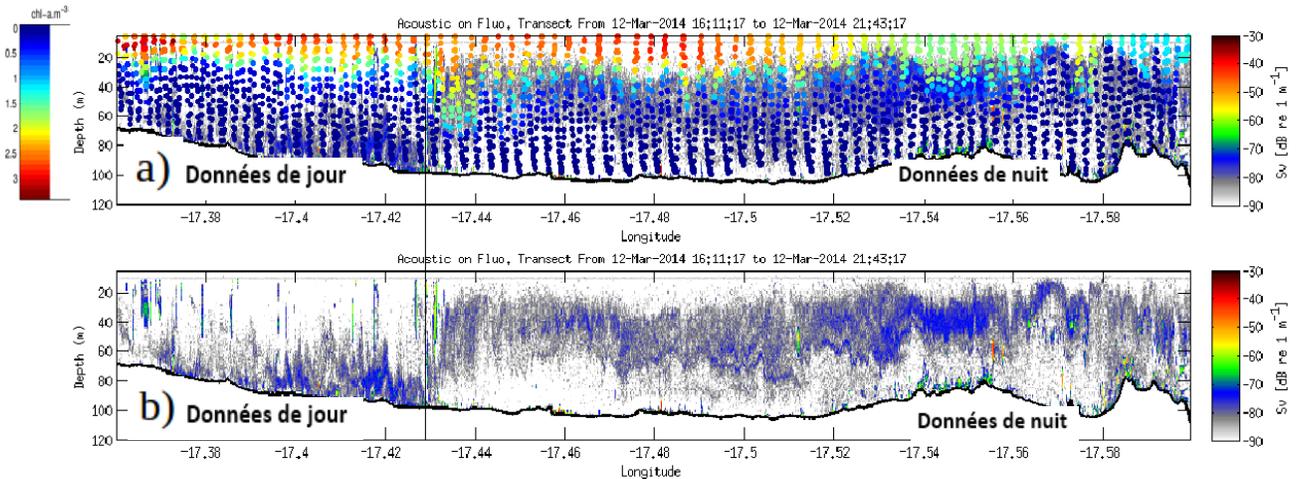


Figure 27: Couplage des données de fluorescence et celles acoustique a), la densité acoustique à 70 kHz en fonction de la longitude b). Cette figure montre le lien entre le zooplancton et le phytoplancton trouvé sur le plateau sénégalais pendant la période d'upwelling.

Ceci vient confirmer que le mouvement vertical du zooplancton vers les eaux de surface observé dans la section précédente est aussi dû à la recherche de nourriture (phytoplancton). L'hypothèse la plus plausible serait donc que le zooplancton se nourrirait du phytoplancton principalement pendant la nuit et particulièrement en surface où le phytoplancton se trouve en grande abondance. Ainsi pendant la journée le phytoplancton utilise les sels nutritifs présents dans la couche euphotique pour effectuer la photosynthèse en présence de la lumière solaire indispensable à la croissance du phytoplancton. Donc l'effet de la lumière agit dans le sens de provoquer la séparation entre zooplancton et le phytoplancton pendant la journée. Par contre pendant la nuit l'absence de la lumière et l'abondance du phytoplancton à la surface entraîneront le zooplancton à regagner la couche de surface pour brouter le phytoplancton qui s'est développé pendant la journée. Cette hypothèse se repose sur un grand nombre de données de la littérature. Ainsi Gauld, (1951) a trouvé un plus grand pourcentage de copépodes avec un intestin rempli la nuit que le jour. Enright, (1969) expliquait également la diminution du phytoplancton nocturne par le broutage. Fuller, (1937) a montré expérimentalement un broutage nocturne plus abondant. Dans la baie de Monterey, Benoit-Bird et al., (2010) ont étudié l'interaction entre le phytoplancton, formant de fines couches diffusantes et le zooplancton, distribué sous la forme de couches

diffusantes plus larges observées dans la même zone. Les deux types de couches se superposaient lorsque le zooplancton consommait le phytoplancton mais étaient séparés d'une dizaine de mètres lorsque la concentration en phytoplancton dans la couche représentait moins de 20% de la concentration intégrée sur la colonne d'eau.

3.2.3 Effet de la turbidité.

La turbidité est une caractéristique optique de l'eau à savoir sa capacité de diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est due à la présence de particules minérales, organiques détritiques et vivantes ou mortes en suspension dans l'eau. Ainsi plus une eau est chargée en particules de matière plus elle est turbide (Fig.28). Les fortes valeurs de la densité acoustique sont repérées en profondeur à gauche du trait noir. Par contre du trait noir à la fin (à droite), la couche de forte densité acoustique est au voisinage de la surface (Fig.28a). La Figure (28b) montre que les fortes valeurs de fluorescence sont sur la couche de surface autrement dit le phytoplancton est plus concentré en surface qu'en profondeur. L'analyse de la Figure (28c) montre que les fortes valeurs de turbidité sont au voisinage de la couche de surface de la droite jusqu'au trait noir. Du trait noir à la fin, les fortes valeurs de la fluorescence sont retrouvées en profondeurs et en surface. L'analyse en parallèle de ces trois profils nous permet de dire que les fortes valeurs observées de la gauche au trait noir pourraient être dues au plancton c'est-à-dire l'ensemble du phytoplancton et du zooplancton. Du trait noir à la fin les fortes valeurs observées en surface pourraient être dues au phytoplancton et celles repérées en profondeur pourraient être dues à la présence du zooplancton. Donc la présence du zooplancton et du phytoplancton dans l'eau augmente sa turbidité.

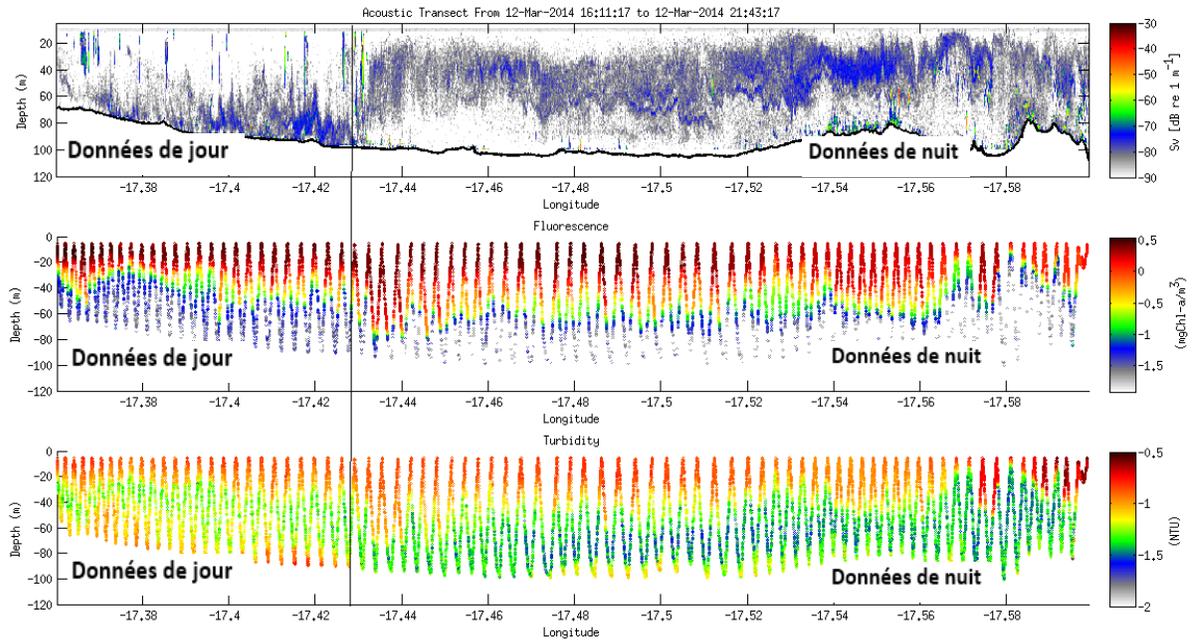


Figure 28 : Section acoustique à 70 kHz et Scanfish menée pendant la campagne AWA : a) densité acoustique [dB] ; b) fluorescence [mgChl-a m^{-3}] et c) turbidité [NTU].

3.2.4 Effet de la température.

On s'intéresse dans cette partie à l'influence de la température sur le plancton. Lorsqu'on regarde en premier lieu les profils de température (Fig.29b) et de fluorescence (Fig.29c), on voit que la couche de fortes valeurs de température coïncide avec celle des fortes valeurs de fluorescence. Par contre lorsqu'on compare le profil de la température et celui de la densité acoustique (Fig.29a), on constate qu'il n'existe aucune relation directe entre ces deux variables. Mais puisqu'on a pu montrer précédemment qu'il existe une relation directe entre le zooplancton et le phytoplancton représenté respectivement par les variables de la densité acoustique et de la fluorescence, donc il pourrait exister une relation indirecte entre la température et le zooplancton. En effet l'un des principaux facteurs de contrôle de la production primaire pélagique est représenté par le rayonnement global solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire reçue par l'écosystème. Cette énergie conditionne la température des eaux ainsi que la quantité de lumière disponible pour le phytoplancton. La température agit sur la croissance du phytoplancton de façon directe et indirecte. De manière directe, elle influence le métabolisme des organismes (action sur la vitesse

des réactions enzymatiques). De façon indirecte, la température va déterminer les conditions du milieu, en particulier l'épaisseur de la couche de mélange de surface par l'intermédiaire de la thermocline. C'est la différence de température entre les eaux de surface et celles du fond qui sera le facteur principal agissant sur l'épaisseur de la couche de mélange de surface. En effet, lorsque les eaux de surface se réchauffent, il y a mise en place d'une thermocline qui isole les eaux chaudes de surface des eaux froides du fond. Cette thermocline est une barrière de densité limitant les échanges entre la surface et la subsurface. Le phytoplancton situé au-dessus de la thermocline est donc retenu dans la couche de mélange de surface. Ce qui conditionnera ainsi partiellement le déclenchement du bloom phytoplanctonique. Ce développement du phytoplancton au niveau de la couche de surface provoquera un regroupement du zooplancton lorsque les conditions vitales sont réunies.

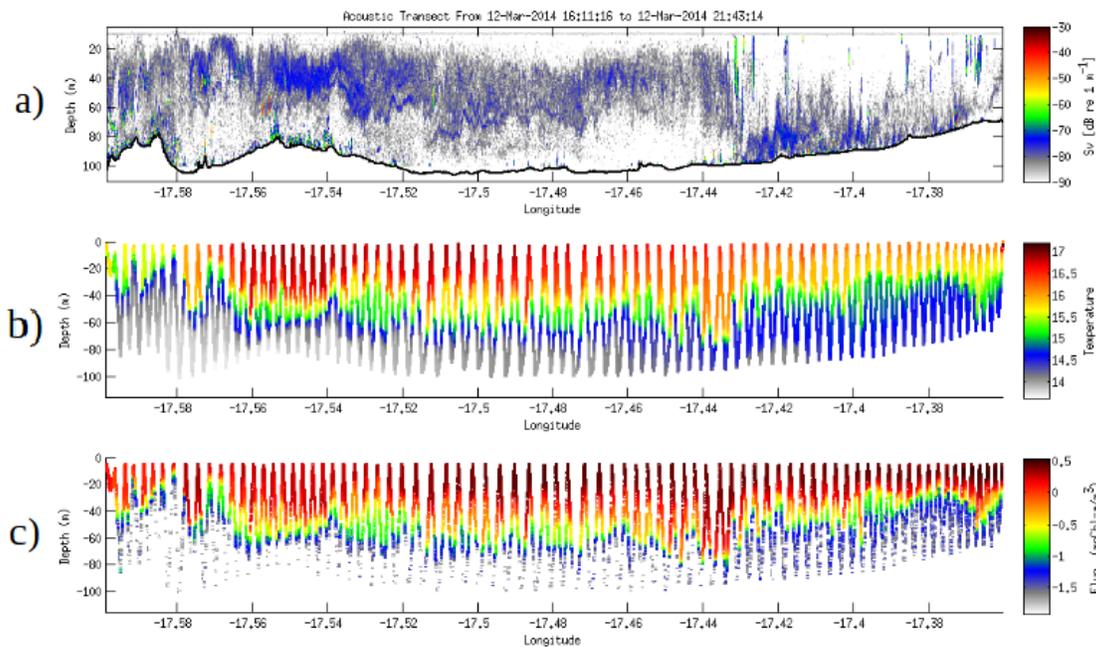


Figure 29: Section zonale des variables a) densité acoustique [dB] à 70 kHz, b) température [$^{\circ}\text{C}$] et c) fluorescence [mgchl-a m^{-3}].

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était d'étudier la distribution du zooplancton du plateau du Sénégal et son contrôle environnemental. Cela nous a permis d'améliorer nos connaissances de l'écosystème du plateau. L'étude des données du multinet vis à vis des profils acoustiques nous indique que les différences de densité acoustique des couches diffusantes ne reflètent pas nécessairement les différences d'abondance de copépodes, c'est-à-dire que les valeurs plus fortes n'indiquent pas forcément des abondances plus fortes. Les couches diffusantes ne sont pas composées uniquement de copépodes et peuvent contenir du macro-plancton tel que des euphausiacés qui sont susceptibles de pouvoir éviter plus efficacement d'être piégés dans les mailles du multinet. L'étude de la distribution a montré que le zooplancton du plateau augmente de la bande côtière vers l'extérieur du plateau. En ce qui concerne la distribution Nord-Sud, on distingue trois zones de fort développement zooplanctonique : une zone au voisinage de l'embouchure du Sénégal, une zone au alentour de Dakar et une autre entre la Gambie et la Casamance.

L'étude du contrôle environnemental du zooplancton nous a permis de conclure que le zooplancton du plateau semble effectuer une migration nyctémérale notamment dans les fonds inférieurs à 50 m. Ce mouvement est lié à la prédation et à la nourriture. En effet pendant la période d'upwelling les fortes concentrations du phytoplancton sont localisées dans les eaux de surface. Le zooplancton, le principal consommateur du phytoplancton effectue le mouvement des eaux profondes vers les eaux de surface pour consommer le phytoplancton pendant la nuit. Par contre pendant la journée, le zooplancton fuit les eaux de surface éclairées par la lumière solaire pour éviter les prédateurs visuels.

L'étude du lien entre le zooplancton et les variables de turbidité, de température et fluorescence montre que la présence du zooplancton et du phytoplancton dans une eau augmente sa turbidité. En effet un lien direct est observé entre le zooplancton et le phytoplancton. C'est à dire que le zooplancton consomme préférentiellement le phytoplancton. Aucun lien direct entre température et le zooplancton n'est observé mais puisque nous avons pu montrer qu'il existe un lien direct entre la température et le phytoplancton nous pouvons déduire qu'il y a une relation indirecte entre la température et le zooplancton.

En perspectives, il serait intéressant d'étudier :

- ✓ la distribution temporelle du zooplancton du plateau par la méthode acoustique.
- ✓ l'influence des vagues internes et de l'oxygène sur la distribution du zooplancton du plateau.

Bibliographie

- [1] **Alcaraz, M., Calbet, A., Estrada, M., Marrasé, C., Saiz, E. et Trepas, I. (2007).** Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea. *Progress in Oceanography* 74:294-312
- [2] **Andersen, V., Gubanova, A., Nival, P. et Ruellet, T. (2001a).** Zooplankton community during the transition from spring bloom to oligotrophy in the open NW Mediterranean and effects of wind events. 2. Vertical distributions and migrations. *Journal of Plankton Research* 23:243-261
- [3] **Andersen, V., Nival, P., Caparroy, P. et Gubanova, A. (2001b).** Zooplankton community during the transition from spring bloom to oligotrophy in the open NW Mediterranean and effects of wind events. 1. Abundance and specific composition. *Journal of Plankton Research* 23:227-242
- [4] **Bainbridge, R. (1961).** Migrations in T.H. Waterman (Editor). *The Physiology of Crustacea II Sense organs, Integration and Behaviour*. Academic Press, New-York. pp. 431- 463
- [5] **Bainbridge, V. (1960).** Occurrence of *Calanoides carinatus* in the plancton of the Gulf of Guinea. *Nature*, 188, 4754 : 932-933.
- [6] **Banase, K. (1995).** Zooplankton: Pivotal role in the control of ocean production. *ICES Journal of Marine Science* 52:265-277
- [7] **Benoit-Bird, K.J., Moline, M.A., Waluk, C.M. et Robbins, I. C. (2010).** Integrated measurements of acoustical and optical thin layers I : Vertical scales of association. *Continental Shelf Research*, 30 (1), 17–28.
- [8] **Bergeron, J.P. (2009).** Nutritional condition of anchovy *Engraulis encrasicolus* larvae in connection with mesozooplankton feeding catabolism in the southern Bay of Biscay, NE Atlantic. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 377:76-83
- [9] **Binet, D. (1978).** Analyse globale des populations de Copépodes pélagiques du plateau continental ivoirien. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, Vol. XVI, 1 : 19-61.
- [10] **Burks, R. L. D. M., Lodge, E., Jeppesen T., et Lauridsen, L. (2002).** Diel horizontal migration of zooplankton : costs and benefits of inhabiting the littoral. *Freshwater Biology* 47 : 343-365.
- [11] **Carr, M. E. (2002).** Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. *Dsr2*, 49 : 59–80.

- [12] **Conway, H. L. et Whitley, T. E. (1979).** Distribution, fluxes and biological utilization of inorganic nitrogen during a spring bloom in the New York Bight. *Journal of Marine Research* 37:657-668
- [13] **Costalago, D., Tecchio, S., Palomera, I., Álvarez-Calleja, I., Ospina-Álvarez, A. et Raicevich S (2011).** Ecological understanding for fishery management: Condition and growth of anchovy late larvae during different seasons in the Northwestern Mediterranean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93:350-358
- [14] **Debby, I., Jackson, G. A., Angel, M. V., Lampitt, R. S., et Burd, A. B. (2004).** Effect of net avoidance on estimates of diel vertical migration. *Limnology and Oceanography*, 49 (6), 2297–2303
- [15] **Diouf, P. (1991).** Le zooplancton au Sénégal. in : Pêcheries ouest africaines : variabilité, instabilité et changement. Paris, cury p. et roy c. ed. Pages 103–116.
- [16] **Domain, F. (1980).** Contribution à la connaissance de l'écologie des poissons démersaux du plateau continental sénégal-Mauritanien
- [17] **Ekman, V. W. (1905).** On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Ark. Mat.Astron. Fys.*, 2 : 1–53.
- [18] **Enrigh, J.T. (1969).** Zooplankton grazing rates estimated under fields conditions. *Ecology*. 50 (6) : 1070— 1075.
- [19] **Fleminger, A. et Clutter, R. I. (1965).** Avoidance of Towed Nets by Zooplankton. *Limnology and Oceanography*, 10 (1), 96–104.
- [20] **Fuller, J. L. (1937).** Feeding rate of *Calanus finmarchicus* in relation to environmental conditions. *Biol. Bull. mar. Biol. Lab. Woods Hole* 72 : 233- 46
- [21] **Gauld, D. T. (1951).** The grazing rate of planktonic Copepods. *J. mar. biol. Ass. U.K.* 29 : 695-706.
- [22] **Gorsky, G., Ohman, M. D., Picheral, M., Gasparini, S., Stemmann, L., Romagnan, J. B., Cawood, A., Pesant, S., García-Comas, C., et Prejger, F. (2010).** Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton Research*, 32 (3), 285 –303.
- [23] **Habasque J., 2015.** Cours de Master “Méthode directe d’observation et/ou d’évaluation : l’acoustique”.
- [24] **Kozhov, M. (1963).** Lake Baikal and its life, *Monographiae Biologicae*. Springer, 352 p.

- [25] **Lampert, W. (1993).** Ultimate causes of diel vertical migration of zooplankton: New evidence for the predator-avoidance hypothesis. *Diel vertical migration of zooplankton (Lelystad, The NetherJands)*. *Archiv fur Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 79-88
- [26] **Lauridsen, T. L., Jeppesen, E., Mitchell, S. F., Lodge, D. M. et Burks, R. L. (1999).** Diel variation in horizontal distribution of *Daphnia* and *Ceriodaphnia* in oligotrophic and mesotrophic lakes with contrasting fish densities . *Hydrobiologia* 408/409 : 241-250.
- [27] **Levin, S. A. (1992).** The Problem of Pattern and Scale in Ecology : The Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology*, 73 (6), 1943–1967.
- [28] **Licandro, P. et Icardi, P. (2009).** Basin scale distribution of zooplankton in the Ligurian Sea (north- western Mediterranean) in late autumn. *Hydrobiologia* 617:17-40
- [29] **Loose, C. L. (1993).** *Daphnia* diel vertical migration behavior: Response to vertebrate predator abundance. *Diel vertical migration of zooplankton (Lelystad)*. *Archiv fur Hydrobiologie Beiheft*, 29-36
- [30] **Masson, S., Angeli, N. Guillard, J. et Pinel-Alloul, B. (2001).** Diel vertical and horizontal distribution of crustacean zooplankton and young of the year fish in a sub-alpine lake: an approach based on high frequency sampling. *Journal of Plankton Research* 23 : 1041-1060.
- [31] **Médina-Gaenner, M. (1985).** Etude du zooplancton côtier de la baie de Dakar et de son utilisation par les poissons comme source de nourriture. Thèse Doct. 3ème cycle Univ. Bretagne Occidentale, 141p.
- [32] **Ménard, F. Dallot, S., Thomas, G., et Braconnot, J. C. (1994).** Temporal fluctuations of two Mediterranean salp populations from 1967 to 1990. Analysis of the influence of environmental variables using a Markov chain model *Marine Ecology Progress Series* 104:139-152
- [33] **Ndoye S., Capet X., Estrade P., Sow B., Dagherne D., Lazar A., Gaye A. et Brehmer P. (2014).** SST patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 119(12) : 8315–8335.
- [34] **Pauly, D. et Christensen, V. (1995).** Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374, 255–257.
- [35] **Perry, R. I., Dilke, B. R. et Parsons, T. R. (1983).** Tidal mixing and summer plankton distributions in Hecate Strait, British Columbia. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40/7 : 871-887.

- [36] **Plounevez, S. et Champalbert, G. (2000).** Diet, feeding behaviour and trophic activity of the anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.) in the Gulf of Lions (Mediterranean Sea). *Oceanologica Acta* 23:175-192
- [37] **Putzeys, S. et Hernandez-Leon, H. (2005).** A mode of zooplankton diel vertical migration off the Canary Islands : implication for active carbon flux. *Journal of Sea Research* 53 : 2.13- 222.
- [38] **Raybaud, V., Nival, P., Mousseau, L., Gubanova, A., Altukhov, D., Khvorov, S., Ibañez, F. et Andersen, V. (2008).** Short term changes in zooplankton community during the summer-autumn transition in the open NW Mediterranean Sea: species composition, abundance and diversity. *Biogeosciences* 5:1765-1782
- [39] **Ringelberg, J. (1991).** A mechanism of predator-mediated induction of diel vertical migration in *Daphnia hyalina*. *Journal of Plankton Research*, 13, 83-89.
- [40] **Ringelberg, J. (1993).** Phototaxis as a behavioural component of diel vertical migration in a pelagic *Daphnia*. Diel vertical migration of zooplankton (Lelystad, The Netherlands). *Archiv für Hydrobiologie Ergebnisse der Limnologie*, 45-55
- [41] **Rodriguez, E., Rainer, K., Brehmer, P., Machu, E et Osvaldina, S (2016).** Analysis of zooplankton using the zooscan approach over the continental shelf of Senegal and Mauritania: species composition and DVM behavior.
- [42] **Romare, P., Berg, S., Lauridsen, T. et Jeppesen, E. (2003).** Spatial and temporal distribution of fish and zooplankton in a shallow lake . *Freshwater Biology* 48 : 1353-1362.
- [43] **Rothschild, B. J. et Osborn, T. R. (1988).** Small-Scale Turbulence and Plankton Contact Rates. *Journal of Plankton Research*, 10, 465-474.
- [44] **Rykaczewski, R. R. et Checkley, D. (2008).** Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(6) : 1965–1970.
- [45] **Ryther, J. H. (1969).** Photosynthesis and fish production in the sea. *Science, New Series*, 166 : 72-76. Les ressources démersales dans le contexte général du Golfe de Guinée. Th. de Doctorat, Thèse de DOCTORAT D'ETAT à l'université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- [46] **Sabatés, A., Olivar, M. P., Salat, J., Palomera, I. et Alemany, F. (2007).** Physical and biological processes controlling the distribution of fish larvae in the NW Mediterranean. *Progress in Oceanography* 74:355-376
- [47] **Séret, C. (1985).** Zooplancton de la côte sud de la presqu'île du Cap-Vert. Doc. CRODT.

- [48] Sieburth, J. M., Smetacek, V. et Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography* 23:1256 - 1263
- [49] Siokou-Frangou, I., Christaki, U., Mazzocchi, M. G., Montresor, M., Ribera, M., Vaqué, D. et Zingone, A. (2010). Plankton in the open Mediterranean Sea: a review. *Biogeosciences* 7:1543-1586
- [50] Sommer, U., Stibor, H., Katchakis, A., Sommer, F., et Hansen, T. (2002). Pelagic food web configurations at different levels of nutrient richness and their implications for the ratio fish production: primary production. *Hydrobiologia* 484:11- 20
- [51] Touré, D. (1971). Variation quantitative du zooplancton dans la région du Cap-Vert septembre 1970 à août 1971. *Doc. Scient. CRODT*. 39, 25p
- [52] Van de Meutter, F., Stoks, R. et De Meester, L. (2004). Behaviorallinkage of pelagic prey and littoral predators: microhabitat selection by *Daphnia* induced by damselfly larvae. *Oikos* 107 : 265-272.
- [53] Van de Meutter, F., Stoks, R. et De Meester, L. (2005). Spatial avoidance of littoral and pelagic invertebrate predators by *Daphnia* . *Oecologia* 142 : 489-499.
- [54] Visser, A. W., Saito ,R., Saiz, E. et Kiorboe, T. (2001). Observations of copepod feeding and vertical distribution under natural turbulent conditions in the North Sea. *Marine Biology*, 138, 1011-1019.
- [55] Wegmann, K. et Metzner, H. (1971). Synchronization of *Dunaliella* cultures. *Arch. Mikrobiol.* 78 : 360- 367.
- [56] Wetzel, R. (2001). *Limnology*, 3 E. lake and river ecosystems. San Diego : Academic Press, 850 pages.
- [57] White, M. D. (1998). Horizontal distribution of pelagic zooplankton in relation to predation gradient . *Ecography* 21 : 44-62.
- [58] Wissel, B. et Ramacharan, C. W. (2003). Plasticity of vertical distribution of crustacean zooplankton in lakes with varying levels of water colour . *Journal of Plankton Research* 25 : 1047-1057.
- [59] Wooster, W., Bakun, A. et McLain, D. (1976). The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*, 34 : 131–140.

[60] Zhu, Y., Tande, K. S. et Zhou, M. (2009). Mesoscale physical processes and zooplankton transport- retention in the northern Norwegian shelf region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56:1922-1933.

Webographie

<http://raymond.rodriquez1.free.fr/Documents/Biodiversite-popul/ecosysteme.jpg> (interactions au sein de l'écosystème marin).

<https://www.google.com/search?q=coccolithophores> (image des coccolithophores)

<https://fr.depositphotos.com/124935056/stock-photo-diatoms-unicellular-algae.html> (image du Diatomé)

<https://fr.depositphotos.com/124935030/stock-photo-dinoflagellates-plankton-flagellate.html> (image des Dinoflagellés).

<https://www.google.com/search?q=copépodes> (image du copépode)

<https://www.google.com/search?q=cladocères> (image des cladocères)

<https://www.google.com/search?q=rotifère> (image des rotifères)

<https://www.hydrobios.de/product/multinet/> (image du multinet)