



HAL
open science

Les éléphants de mer auxiliaires d'étude à la description de l'océanographie physique et à l'écologie marine

Baptiste Picard

► **To cite this version:**

Baptiste Picard. Les éléphants de mer auxiliaires d'étude à la description de l'océanographie physique et à l'écologie marine . Biologie animale. 2017. hal-01558088

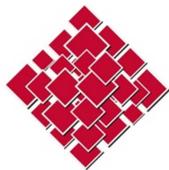
HAL Id: hal-01558088

<https://ephe.hal.science/hal-01558088>

Submitted on 7 Jul 2017

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

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



École Pratique
des Hautes Études



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

Sciences de la Vie et de la Terre

**Les éléphants de mer auxiliaires d'étude à la description de l'océanographie
physique et à l'écologie marine**

Présenté par

Baptiste Picard

Pour l'obtention du diplôme de l'École Pratique des Hautes Études

Dans le cadre de mémoire préparé sous la direction de :

Tuteur pédagogique : Bruno DELESALLE, maître de conférences EPHE, USR 3278 CRIOBE EPHE – UPVD
- CNRS,

Tuteurs scientifiques : Christophe GUINET, chargé de recherche, UMR7372 CEBC-CNRS,

Fabien ROQUET, chercheur contractuel, Department of Meteorology of the
Stockholm University,

Table des matières

Remerciement	8
Chapitre I	10
Introduction générale	10
1.1) Etude de l'océan	11
1.2) Bio-logging	12
1.3) SO-MEMO	15
Présentation du projet de recherche	17
Chapitre II	21
Modèles & sites d'études	21
2.1) Modèle d'étude : l'éléphant de mer de Kerguelen.....	22
2.1.1) Généralités	22
2.1.2) Biologie de l'espèce	22
2.1.3) Comportement en mer	23
2.1.4) Régime alimentaire	25
2.2) Sites d'étude	26
2.2.1) Kerguelen	26
2.2.2) L'océan Austral.....	27
2.3) Le terrain et les balises	29
2.3.1) Le terrain	29
2.3.2) Les balises.....	30
Chapitre III	39
Préparation et distribution des données océanographiques physiques.....	39
3.1) Introduction.....	40
3.2) Calibration en mode différé	42
3.2.1) CTD SRDL basse résolution	44
3.2.2) CTD SRDL haute résolution.....	46
3.2.3) Les TDR	48
3.3) Résultats	50
3.3.1) Calibration	50
3.3.2) Création du MEOP consortium.....	55
3.4) Discussion.....	

3.4.1) Evolution de la méthodologie et bilan	59
3.4.2) Perspective	60
Chapitre IV	62
Ecologie : Etude comportementale de l'éléphant de mer grâce aux balises.....	62
4.1) Introduction.....	63
4.2) Méthodologie.....	65
4.2.1) Correction de la lumière.....	65
4.2.2) Les localisations.....	66
4.2.3) Délimitation et caractérisation des plongées.....	66
4.2.4) Calcul des tentatives de capture	67
4.2.5) Détection des événements de bioluminescence	69
4.3) Résultats.....	71
4.4) Discussion.....	75
4.4.1) Le capteur de lumière	75
4.4.2) Comportement des éléphants de mer	76
V) Conclusion générale	77
4.1) Synthèse des résultats.....	79
4.1.1) Rappel des objectifs	79
4.1.2) Mise en place d'une routine de correction des données environnementales.....	80
4.1.3) La bioluminescence	80
4.2) Perspective	81
4.2.1) Le projet MEOP.....	81
4.2.2) Bioluminescence et comportement de nage	82
4.3) Bilan.....	83
VI) Bibliographie	84
ANNEXES.....	92
Annexe 1 : Exemple de création d'un fichier de visualisation PDF pour le déploiement FT01 (1 balise)	94
Annexe 2 : Etalonnage de la balise 13323 au SHOM.....	96
Annexe 3: The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle <i>Lepidochelys olivacea</i> along the Guiana coast	98
Annexe 4: Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour.....	99
Annexe 5: Characterization of Postdive Recovery Using Sound Recordings and Its Relationship to	

Dive Duration, Exertion and Foraging Effort of Southern Elephant Seals (<i>Mirounga Leonina</i>).....	100
Annexe 6: Adjustment of Diving Behaviour with Prey Encounters and Body Condition in a Deep Diving Predator: The Southern Elephant Seal	101
Annexe 7: Calibration Procedures and First Dataset of Southern Ocean Chlorophyll <i>a</i> Profiles Collected by Elephant Seals Equipped with a Newly Developed CTD-Fluorescence Tags.....	102
Annexe 8: Winter use of sea ice and ocean water mass habitat by southern elephant seals: The length and breadth of the mystery.....	103
Annexe 9 : Marine bioluminescence: record by a light-sensor and related foraging behaviour of a diving predator	104
Annexe 10: How Elephant Seals (<i>Mirounga leonina</i>) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate	105
Annexe 11: Southern Elephant Seal foraging success in relation to temperature and light conditions: insight on their prey distribution.....	106

Table des figures :

<i>Figure 1 : Localisation des flotteurs Argo (source Coriolis)</i>	12
<i>Figure 2 : Répartition du nombre de profils enregistrés en fonction de la provenance sur un gradient latitudinale.</i>	14
<i>Figure 3 : Ensemble des trajets d'éléphants de mer intégrés dans le SO-MEMO</i>	16
<i>Figure 4 : Densité des profils verticaux récoltés par des CTD lors de campagnes océanographiques (la colorbar représente le nombre de profils par pixel) téléchargés depuis World Ocean Database et visualisés sur Ocean Data View.</i>	17
<i>Figure 5 : Cycle de vie d'une année d'un éléphant de mer</i>	23
<i>Figure 6 : Exemple de profils de plongée d'un éléphant de mer durant 24h</i>	24
<i>Figure 7 : Exemple d'un trajet de 8 mois d'une femelle équipée à Kerguelen en janvier 2013. Chaque couleur représente une durée de 5 jours durant le trajet.</i>	24
<i>Figure 8 : Représentation de l'océan austral et des fronts (Talley 2011) : front subtropical (STF), front subantarctique (SAF), front polaire (PF)</i>	28
<i>Figure 9 : Exemple de profils océanographiques basse résolution (température en haut et salinité en bas) enregistrés par un éléphant de mer. Chaque point noir est un point de profil et ici les données sont interpolées</i>	

<i>pour la visualisation.</i>	40
<i>Figure 10 : Exemple de profil de densité en fonction de la profondeur. Le profil transmis par satellite (en bleu) présente un décalage de pression par rapport au profil enregistré dans la balise (en vert).</i>	43
<i>Figure 11 : Données brutes de salinité (en bleu) et données ajustées (en rouge) pour la CTD ct78d-D358-11. L'ajustement est effectué en les comparant aux profils World Ocean Data Base (en noir).</i>	45
<i>Figure 12 : Valeurs brutes (en bleu) et ajustées (en rouge) de la hauteur d'eau. L'ajustement est calculé par rapport aux hauteurs d'eau des profils de référence dans la World Ocean Database. On voit que le rapport des données brutes (en bleu) est amélioré une fois les données ajustées (en rouge).</i>	46
<i>Figure 13 : Comparaison des profils de température basse résolution (en haut) et haute résolution (en bas).</i>	47
<i>Figure 14 : Comparaison d'un profil (température, salinité et densité) en haute (en vert) et basse (en bleu) résolution. Sur les trois variables, calcul de la RMS (graphique du bas) pour mesurer l'erreur.</i>	48
<i>Figure 15 : Comparaison des profils d'un MK9 (en rouge) et d'une CTD (en bleu) pour pouvoir corriger la profondeur</i>	49
<i>Figure 16 : Exemple de graphique de visualisation des données d'une CTD-SRDL. En haut à gauche il y a des informations sur l'individu (nom, nombre de profils, coefficient de correction...). Les trois graphiques du haut représentent, de gauche à droite, les profils de température, salinité et densité. En bas à gauche, on observe le trajet de l'individu et à droite la température en fonction de la salinité.</i>	51
<i>Figure 17 : Calibration de la salinité de la balise ft06-Cy17-10. Les profils « éléphant de mer » sont en bleu et les profils de références WOD sont en noir. Sur le premier graphique, il s'agit des profils bruts, on observe un décalage des données. Sur le deuxième graphique, on a appliqué des coefficients pour recalibrer les profils « éléphant de mer » avec les profils WOD. Le dernier graphique représente le trajet de l'animal, chaque point bleu représentant un profil récolté par la balise éléphant de mer et chaque point noir représente un profil WOD utilisé comme référence.</i>	53
<i>Figure 18 : Ensemble des données CTD-SRDL calibrées pour les données françaises. Chaque couleur représente un ensemble de déploiement de balises.</i>	54
<i>Figure 19 : Ensemble des données TDR calibrées depuis 2008.</i>	55
<i>Figure 20 : Carte du monde représentant la répartition des profils CTD (température et salinité) actuellement disponibles dans la base de données MEOP –CTD.</i>	57
<i>Figure 21 : Comparaison entre les CTD WOD13 et les balises calibrées dans MEOP. On peut voir que MEOP apporte un vrai plus dans le jeu de données mondiales dans l'océan Austral.</i>	57
<i>Figure 22 : Exemple de « spike ». La haute résolution (en vert) permet de mettre en évidence les points aberrants fournis par la basse résolution (en bleu).</i>	61
<i>Figure 23 : Filtre de l'axe X d'accélération avec un filtre passe-haut à 0.33Hz. A gauche, les données brutes et à droite, l'accélération dynamique</i>	68
<i>Figure 24 : Détection des tentatives de capture de proie sur les 3 axes. Le premier graphique représente la plongée de l'animal. Les trois suivants représentent les axes X, Y et Z. Les lignes rouges représentent les seuils calculés à l'aide de kmeans.</i>	69
<i>Figure 25 : Exemple de détection d'un événement de bioluminescence. La courbe du haut représente la profondeur à laquelle est l'éléphant de mer au cours du temps, celle du bas la lumière.. On constate un pic de lumière vers 800 mètres.</i>	70
<i>Figure 26 : Répartition des événements de bioluminescence en fonction de l'orientation du capteur.</i>	71
<i>Figure 27 : Détection d'un événement de bioluminescence sur les 3 axes (de haut en bas, devant, dessus,</i>	

derrière). Sur le dernier graphique, on voit la profondeur avec en rouge la phase de fond de la plongée. Chaque croix rouge représente une tentative de capture de proie. _____	72
Figure 28 : Répartition des événements de bioluminescence sur le capteur orienté vers l'avant en fonction de la différence temporelle (en seconde) avec les tentatives de capture de proie. _____	73
Figure 29 : Répartition du nombre d'événements de bioluminescence en fonction de la différence temporelle avec les tentatives de capture de proie (en seconde). _____	73
Figure 30 : Box plot représentant l'intensité des événements de bioluminescence en fonction de l'écart temporelle en seconde à une tentative de capture. _____	74
Figure 31 : Calcul du « pitch » et du « roll » (3e graphique) au moment des événements de bioluminescence (1er graphique). Le deuxième graphique représente la plongée avec sa phase de fond (en rouge). _____	82

Table des illustrations

Illustration 1 : Représentation d'un mâle éléphant de mer austral en arrière-plan, suivi d'une femelle et d'un petit au premier plan. Illustration par P. Folkens. _____	22
Illustration 2 : Localisation et Topographie de l'archipel des Kerguelen. Source Google Map _____	26
Illustration 3 : Exemple de pose d'une balise sur un jeune mâle à Pointe Suzanne, Kerguelen _____	30
Illustration 4 : Schéma d'une balise GPS "SPOT" (source Wild life computer) _____	31
Illustration 5 : Schéma d'une balise de type MK9 (source Wild life computer) _____	33
Illustration 6 : Schéma d'une balise de type MK10 fast-loc (source Wild life computer) _____	34
Illustration 7 : Schéma d'une balise TDR accéléromètre (source Wild life computer) _____	35
Illustration 8 : Schéma d'une balise CTD SRDL (source SMRU) _____	36
Illustration 9 : Femelle équipée de 3 balises : MK10 accéléromètre devant MK10 fast-loc au milieu et MK9 à l'arrière. _____	64

Table des Tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des balises posées sur les éléphants de mer. _____	37
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données calibrées au sein de MEOP _____	58

Remerciement

Tout d'abord je tiens à remercier le laboratoire du CEBC pour son accueil et plus particulièrement Xavier Bonnet et Christophe Guinet pour leur gestion du laboratoire.

Je tiens à remercier particulièrement Christophe pour le soutien que tu m'apportes depuis maintenant 6 ans et le plaisir que j'ai à travailler avec toi. Depuis mon stage en informatique en 2011 pas mal de choses ont changé, tu m'as donné la chance de partir à Kerguelen, que je croyais en Bretagne à mon arrivée, et de découvrir le monde de la recherche alors merci et j'espère pouvoir continuer à travailler avec toi.

Merci aux membres du jury : Damien Chevallier, Jean-Benoit Charrassin, Gilles Reverdin, Cédric Marteau et Sylvie Demignot d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Merci Bruno Delesalle pour son aide dans la réalisation de mon EPHE.

Merci à Fabien Roquet pour l'encadrement, ton aide et les séjours à Stockholm. Tu m'as fait découvrir Matlab, et aujourd'hui c'est mon quotidien. Je ne suis pas sûr de devoir te dire merci pour ça mais bon je vais le faire quand même.

Merci à Jade pour ton aide sur à peu près tout : perso et travail, tu es là depuis mon arrivée à Chizé et c'est toujours un plaisir d'échanger avec toi. Longue vie à la bioluminescence !

Merci à Chizé d'être Chizé, je suis arrivé en 2011 pour un stage de 6 mois et me voilà en 2017 toujours au même endroit avec plein de rencontres extra en plus :

- Mes colocs de la Foye Monjault : Andreaz, Ambre, Joan, Pierre et Alizée et tous ceux qui sont venus un soir, une nuit, un mois... pour avoir réussi en très peu de temps à s'appeler la maison des dépravés. Mes colocs de Villefollet : Andreaz, Alizée, Pierre, Laurie, Gaëtan, Joris etc pour que chaque soir soit une aventure.

- Nory, Tom, Mary-Ann, Fabien, Alice, Meu-Meu, Hoel et Arnaud pour les bons moments passés à Kerguelen. Et spécialement Nory pour m'avoir tout appris sur le terrain alors que je partais vraiment de 0.

- Les plus anciens déjà partis qui me font sentir jeune et les petits nouveaux qui me donnent un coup de vieux qui font qu'on est content d'aller bosser, de faire du volley, de l'ultimate ou une soirée dans les villages de 200 habitants. Je n'arriverai pas à faire une liste exhaustive mais j'espère vous l'avoir montré et sinon rien n'est perdu comme dit un grand sage : « Je suis hyper chaud ».

- Christophe et Arnaud pour le resto du laboratoire, c'est vous qui faites la pluie (quand vous êtes fermés) et le beau temps (quand vous êtes ouvert) au labo alors vraiment un grand merci.

- A mes deux collègues de bureau Joffrey et Yves avec qui on a beaucoup partagé. Vous avez fini vos thèses et moi mon diplôme, une page se tourne et votre présence va me manquer.

Je ne sais pas comment les choses vont évoluer pour moi par la suite, mais Chizé est et restera une partie très importante de ma vie alors vraiment merci.

Chapitre I

Introduction générale

1.1) Etude de l'océan

Aujourd'hui, l'océan est échantillonné par diverses méthodes : profils de température, salinité et pression réalisés depuis les navires océanographiques ; utilisation de sondes XCTD (sonde à usage unique permettant de réaliser un profil de température, salinité pression) depuis les navires où elles sont mises en œuvre, profileur Argo. Les scientifiques cherchent à acquérir toujours plus de données, tout particulièrement dans les régions sous échantillonnées à savoir l'océan profond, les milieux côtiers et polaires (Von Schuckmann et al. 2016) pour essayer de mieux le comprendre. Avec le développement des satellites, des projets tels que le Surface Water Ocean Topography Mission (SWOT), ont vu le jour pour étudier les océans depuis l'espace (Stewart 1985). Ce projet, qui est une collaboration du CNES (Centre National d'Études Spatiales) et de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), a pour objectif de mesurer le niveau de surface de l'eau à l'aide de systèmes embarqués sur les satellites. *In fine*, il s'agit de mieux comprendre la circulation des océans et ainsi d'améliorer les modèles climatiques (Durand et al. 2010). Cependant, la résolution de ces techniques est relativement faible (environ 200 km).

Pour avoir des données à plus fine échelle, il existe des équipements déployés en mer afin de récolter des profils verticaux de données océanographiques de température et de salinité localisés de l'ordre du kilomètre. Par exemple, les profileurs Argo sont des systèmes qui stationnent à 1000 m de profondeur et vont dériver avec les courants. Généralement, tous les 10 jours, ces profileurs entament une descente à 2000 m de profondeur avant de remonter vers la surface en enregistrant des valeurs de salinité et de température. Arrivés en surface, les données enregistrées sont transmises via le système Argos ou Iridium. Elles permettent d'étudier les océans à des échelles plus fines (Yuan et al. 2014). A l'heure actuelle, il y en a plus de 3 000 qui dérivent dans les océans (Figure 1).

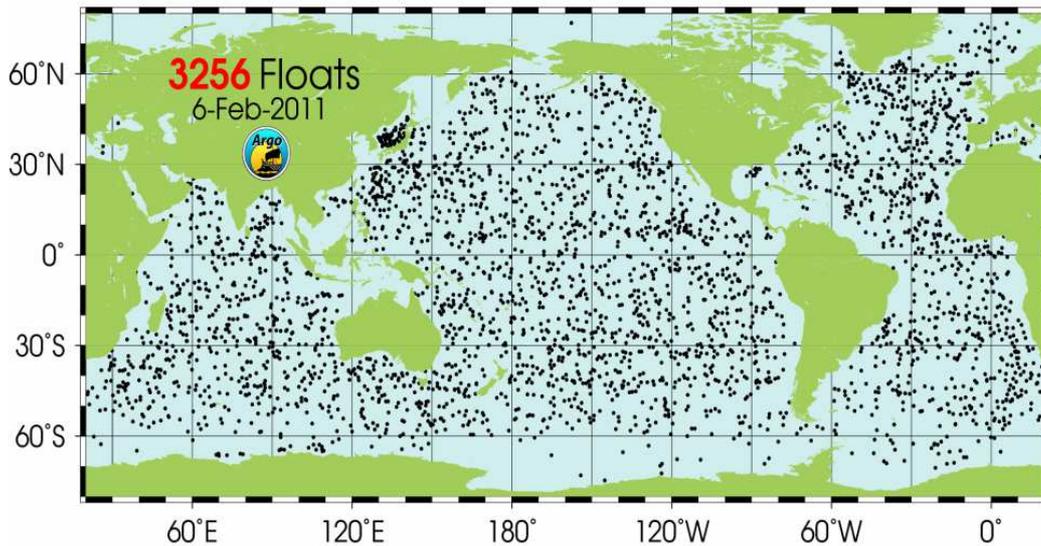


Figure 1 : Localisation des flotteurs Argo (source Coriolis)

Cependant comme le montre la Figure 1, plus on est dans les latitudes extrêmes, moins il y a de profils enregistrés. Ceci est dû à la difficulté d'échantillonner ces parties de l'océan à cause de la glace ou du peu de bateaux qui se rendent dans ces régions et du coût que cela représente. Aujourd'hui, le bio-logging, à savoir l'équipement d'animaux avec des enregistreurs/balises permettant d'échantillonner/transmettre un ensemble de paramètres environnementaux offre un nouveau moyen de bio-échantillonner des environnements difficile d'accès tels que les océans polaires.

1.2) Bio-logging

Le bio-logging peut être défini comme l'utilisation d'appareils miniaturisés attachés sur des animaux afin d'enregistrer et/ou transmettre des données comportementales, physiologiques et/ou environnementales (Rutz et Hays 2009). De prime abord, cette technologie est surtout utilisée sur des animaux au comportement cryptique, qu'on ne peut observer autrement de par la difficulté d'accès de leur habitat (Boyd et al., 2004). De ce fait, le bio-logging s'est surtout développé au début pour étudier des espèces marines, et tout particulièrement des espèces plongeurs.

Le premier « Time Depth Recorder » (TDR) fut développé dans les années 60 et permettait d'enregistrer des données de pression (plongée) durant une heure sur des

phoques de Weddell (*Leptonychotes weddellii*) (Kooyman 1965). Depuis cette époque, les capteurs n'ont jamais cessé d'évoluer et la capacité de miniaturisation a permis d'utiliser cette technologie sur des modèles d'études variés : tortue marine (Eckert et al. 1986), pinnipèdes (Leboeuf et al. 1986) et oiseaux (Wilson et Bain 1984).

En parallèle de ces balises TDR, en 1978 a été créé le système Argos. Il permet de localiser et de collecter des données par satellite. En 1986, la société CLS (Collecte Localisation Satellites) a été créée par le Centre National D'Etudes Spatiales (CNES) et l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER). L'objectif de cette société est de collecter des informations océanographiques et météorologiques en milieu marin, mais aussi le déplacement de navires et animaux au moyen de ce système. CLS est l'opérateur et le fournisseur de produits utilisant cette technologie. L'une de leurs premières missions a été d'équiper des bateaux de pêche asiatiques dans le Pacifique pour suivre leur déplacement. Par la suite, cette technologie a été déployée sur les animaux marins et terrestres. Les premières balises Argos sur des prédateurs marins ont été déployées sur des grands albatros de l'archipel Crozet (Jouventin & Weimerskirch 1990). C'est cette technologie qui est mise en œuvre depuis maintenant plus de 10 ans pour étudier les déplacements, le comportement de plongées et échantillonner les conditions océanographiques rencontrées par les éléphants de mer de Kerguelen.

La capacité de ces animaux à se rendre dans des lieux difficiles d'accès pour l'homme, tels que les milieux hauturiers ou polaires, ainsi que l'évolution des techniques d'acquisitions (batterie, localisation, capteurs embarqués...(Fedak et al. 2002; Vincent et al. 2002) ont fait de ces espèces une formidable source d'acquisition de données océanographiques (température, salinité, concentration en oxygène dissous, lumière (Boehlert et al. 2001; Fedak 2004) dans des environnements très difficiles d'accès tels que la zone de banquise en période hivernale.

Bien que cette nouvelle source d'information puisse être utilisée en biologie, afin d'étudier l'écologie en mer de ces espèces (Fedak 2004; Yan Ropert-Coudert et Wilson 2005), elle représente un support tout à fait intéressant aux études océanographiques afin de mieux comprendre la circulation et la structuration verticale de l'océan (Park et al. 2008)(Lydersen et al. 2002).

Depuis 2003, l'équipe de Christophe Guinet utilise ces avancées technologiques pour étudier l'écologie des éléphants de mer du sud (*Mirounga leonina*, Linné, 1758), le plus souvent en relation directe avec des paramètres océanographiques tels que la température et la salinité, mais aussi la fluorescence afin d'estimer les concentrations locales en phytoplancton (Guinet et al. 2013), la lumière (Vacquié-Garcia et al. 2012) ou l'oxygène dissous (Frederic Bailleul, Vacquie-Garcia, et Guinet 2015a). Ces animaux permettent d'échantillonner des structures océanographiques d'intérêt à méso et subméso-échelles telles que des tourbillons et des fronts qui sont activement utilisés par ces prédateurs. En plongeant continuellement à des profondeurs importantes (jusqu'à 2149 mètres; (McIntyre et al. 2010), ils peuvent enregistrer des profils océanographiques dans des régions sous-échantillonnées de l'océan mondial (Figure 2). Son équipe se concentre sur une zone bien particulière et difficile d'accès, l'archipel de Kerguelen qui fait partie des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF).

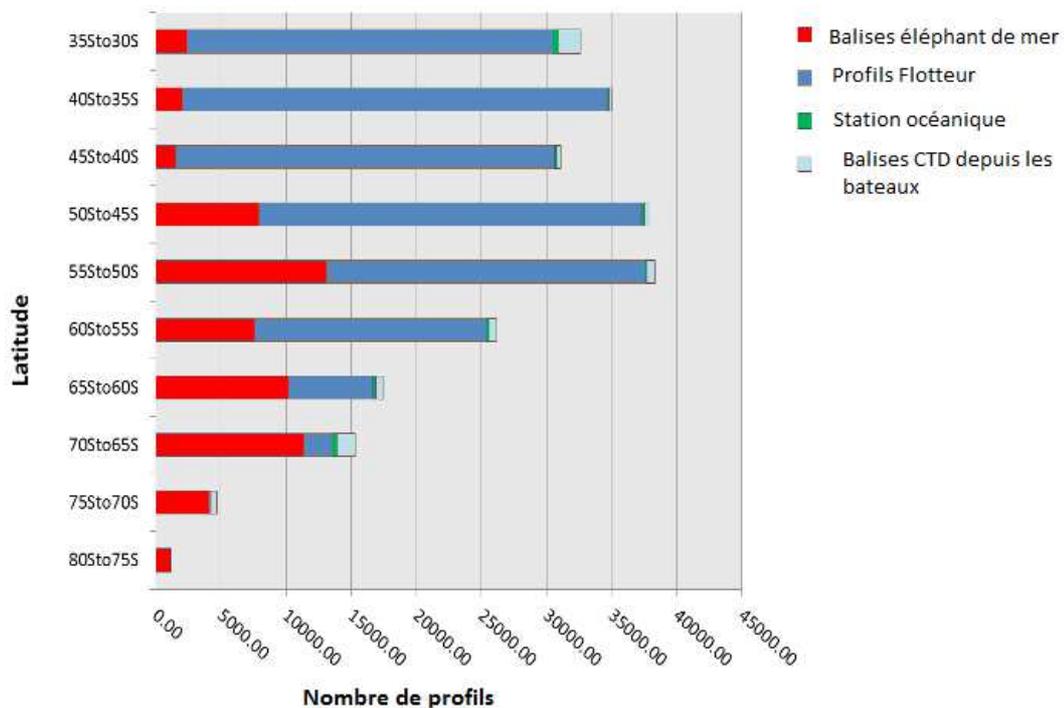


Figure 2 : Répartition du nombre de profils enregistrés en fonction de la provenance sur un gradient latitudinale.

Entre 2003 et 2016, le déploiement de 132 balises à vocation océanographique a permis la collecte d'un important jeu de données (~40 000 profils) sur le secteur indien de

l'océan Austral sous la forme de profils verticaux de température (en degré Celsius) et de salinité en fonction de la pression (en dbar). Au niveau international, ce sont 1200 balises qui ont été ainsi déployées, lors de 171 opérations de déploiements et qui ont permis la collecte de plus de 510 000 profils océanographiques. On observe que plus les latitudes deviennent élevées, plus le pourcentage de profils enregistrés par des balises déployées sur des espèces de phoques polaire, dont les éléphants de mer devient important. Ce pourcentage finit même par atteindre les 100% dans les régions qui sont presque toute l'année prises dans les glaces.

=====

1.3) SO-MEMO

C'est dans ce contexte qu'a été mise en place en 2004 la collecte de données océanographiques par des phoques polaires. Ce Service d'Observation Mammifère marin Echantillonneur du Milieu Océanique (SO-MEMO) a été labellisé par la CSOA (Commission spécialisée Océan Atmosphère) en 2010. Il a pour but d'assurer l'acquisition et la distribution des données océanographiques récoltées par les prédateurs marins plongeurs.

Le SO-MEMO avec SO-PIRATA (Pilot Research morred Array in the Tropical Atlantic), SSS (Sea Surface Salinity) et ARGO fait partie d'une des quatre composantes labélisées par le CNRS-INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) pour l'observation de l'océan hauturier. Cet ensemble constitue le système d'observation, d'expérimentation et de recherche en environnement - Coriolis Temps Différé Observations Océaniques (SOERE - CTDO2) porté par Gilles Reverdin (LOCEAN/MNHN, Université La Sorbonne).

Les données proviennent essentiellement des éléphants de mer équipés à Kerguelen en collaboration avec l'Australie (Integrated Marine Observing System) et la Chine (Shanghai Ocean University) (Figure 3) mais proviennent également des phoques de Weddell en Antarctique, (Jean-Benoit Charrassin, LOCEAN/MNHN, Université La Sorbonne).

Le SO-MEMO permet d'alimenter une base de données internationale : la World Ocean Database. Créée par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), elle

regroupe l'ensemble des données environnementales collectées dans l'océan mondial (Figure 4). Depuis 2001, les données enregistrées grâce à des mammifères marins y sont intégrées (Boehlert et al. 2001). En 2015 a été créé le portail MEOP (Marine Mammal Exploring the Oceans : Pole to Pole), point d'accès unique aux données océanographiques collectées par des animaux marins plongeurs au niveau international et qui fédère les données collectées par 10 pays ayant équipé des animaux marins plongeurs et en garantissant un contrôle qualité et un niveau de précision minimal de 0.03°C en température et 0.05 en salinité.

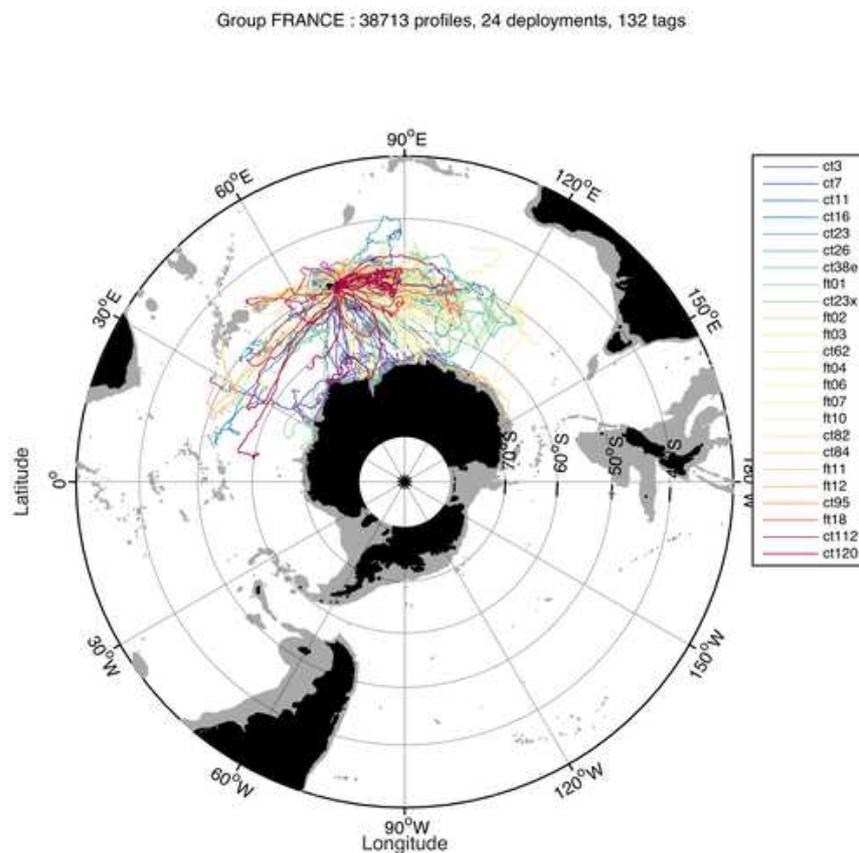


Figure 3 : Ensemble des trajets d'éléphants de mer intégrés dans le SO-MEMO

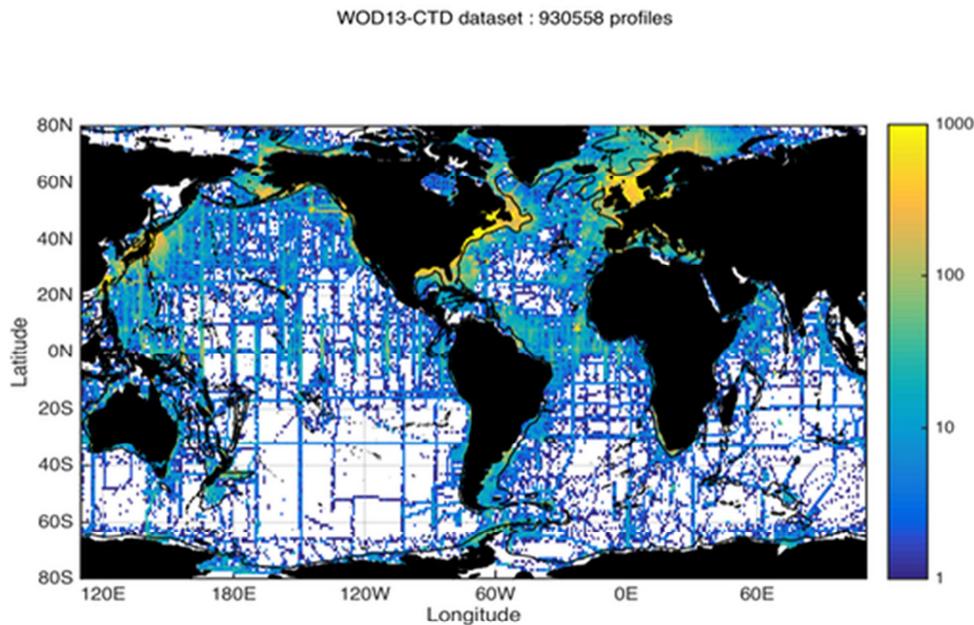


Figure 4 : Densité des profils verticaux récoltés par des CTD lors de campagnes océanographiques (la colorbar représente le nombre de profils par pixel) téléchargés depuis World Ocean Database et visualisés sur Ocean Data View.

1.4) Présentation du projet de recherche

Dans ce contexte, mon projet d'étude s'intègre autour de deux axes, l'un océanographique, l'autre écologique, l'objectif global du programme de recherche conduit par Christophe Guinet étant d'essayer de comprendre les liens entre le contexte océanographique local et le comportement et performances de pêche de l'éléphant de mer.

Dans ce cadre général, ma contribution, outre la mise en place et la gestion au quotidien de la base de données « éléphants de mer » regroupant l'ensemble des informations et des données océanographiques et écologiques issues du programme « éléphant de mer », consiste à garantir la qualité des données océanographiques issues des données bio-logging. Pour cela, j'interviens dans le développement et l'application de procédures de calibration pré-déploiement (comprenant des tests en mer et la préparation du matériel avant le déploiement) des balises utilisées dans le programme « éléphants de mer » et dans la correction post-déploiement des données de température et de salinité issues de ces balises. Ce travail est conduit en collaboration étroite avec Fabien Roquet basé à l'université de Stockholm en Suède (Roquet et al. 2014). L'objectif est que ces données puissent être utilisées avec un niveau de précision garanti dans les modèles et travaux de

recherche océanographiques et climatiques, mais puissent fournir des informations précises sur le contexte océanographique dans lequel ces animaux évoluent et pêchent.

La deuxième partie de mon projet de recherche porte sur un axe plus écologique et a pour objectif d'essayer de mieux comprendre le comportement de recherche alimentaire des éléphants de mer et de voir si l'on peut l'associer à son environnement. Par exemple il a été montré que la température de l'eau et la lumière joue un rôle sur le comportement de chasse des individus (Guinet et al. 2014)(Annexe 11). Pour cette partie, je me focaliserai sur un paramètre biologique de l'environnement lié à la lumière : la bioluminescence. Je chercherai à vérifier si les éléphants de mer utilisent la bioluminescence en profondeur pour s'orienter vers leurs proies.

De plus, ce projet s'intègre dans un programme international : Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole (MEOP), qui regroupe les données collectées par une grande partie des mammifères marins équipés de balises. Aujourd'hui, MEOP regroupe plus de 20 laboratoires issus de 10 pays différents.

Ce rapport comporte, en plus de l'introduction générale, quatre chapitres :

- Le chapitre II présentera le modèle d'étude qu'est l'éléphant de mer ainsi que les sites d'études et le matériel utilisé pour récolter les données.
- Le chapitre III concernera la partie liée à l'océanographie de mon travail. Il présentera les enjeux et problématiques des données océanographiques récoltées grâce aux éléphants de mer. Les méthodologies développées et utilisées pour obtenir un jeu de données étalonné, y seront expliquées.
- Le chapitre IV sera centré sur la partie écologique et plus particulièrement sur l'utilisation des capteurs de lumière présents dans les balises pour détecter la bioluminescence. L'objectif sera d'utiliser la lumière comme indicateur des événements de bioluminescence présents dans l'océan austral et de les associer au comportement de recherche alimentaire en mer des éléphants de mer en utilisant les tentatives de captures de proie. Les méthodologies ainsi que les résultats seront présentés.

- Le chapitre V résumera les résultats obtenus dans les différents chapitres précédents. Je ferais la synthèse de mon travail et présenterai des perspectives ainsi qu'un bilan.

Chapitre II

Modèles & sites d'études

2.1) Modèle d'étude : l'éléphant de mer de Kerguelen

2.1.1) Généralités

L'éléphant de mer fait partie du clade des Pinnipèdes de la famille des Phocidés (phoque). Il est le plus grand représentant de cette dernière et se divise en deux espèces : l'éléphant de mer du nord (*Mirounga angustirostris*) qui se trouve sur la côte nord-ouest américaine, et l'éléphant de mer du sud (*Mirounga leonina*) que l'on trouve dans les mers australes subantarctiques et plus particulièrement sur trois sites : Géorgie du Sud, l'île de Macquarie et les îles Kerguelen (McMahon et al. 2005). C'est sur la population d'éléphants de mer du sud des îles Kerguelen, estimée à environ 200 000 individus (Guinet, Jouventin, et Weimerskirch 1992; McMahon et al. 2005), que notre projet est basé.



Illustration 1 : Représentation d'un mâle éléphant de mer austral en arrière-plan, suivi d'une femelle et d'un petit au premier plan. Illustration par P. Folkens.

2.1.2) Biologie de l'espèce

L'éléphant de mer du sud possède l'un des plus grands dimorphismes sexuels du règne animal chez les vertébrés (Slip & al. 1994) . En effet, les mâles peuvent peser jusqu'à 4 tonnes et mesurer jusqu'à 6 mètres alors que les femelles pèsent environ 500 kg pour une taille de 2,5 mètres en moyenne.

Les éléphants de mer du sud alternent des périodes en mer, de 2 à 8 mois, avec deux périodes à terre pour la mue, en février, et la reproduction, en octobre (Figure 5). Ils ont un système de reproduction polygyne, où un mâle dominant, le pacha, possède un harem pouvant compter jusqu'à 100 femelles. C'est pendant ces deux périodes à terre que nous les équipons de balises afin de récolter des données.

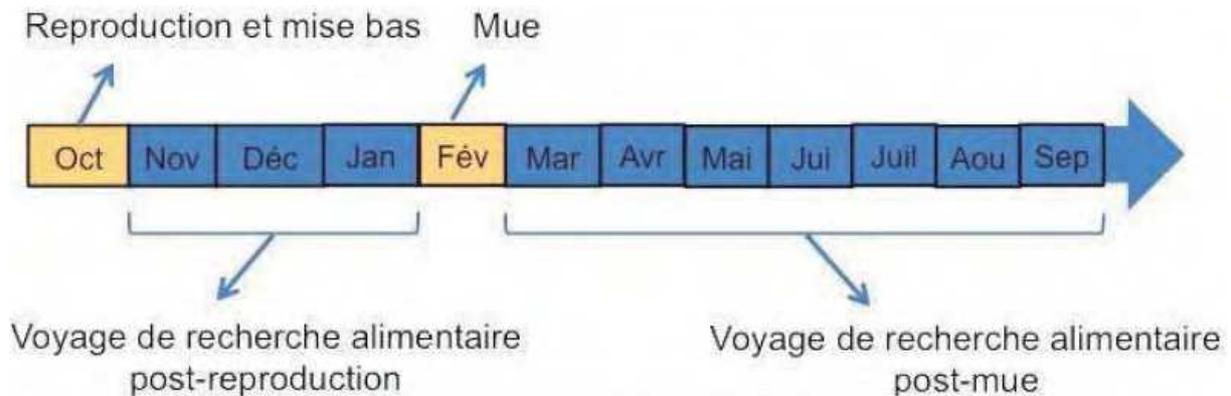


Figure 5 : Cycle de vie d'une année d'un éléphant de mer

2.1.3) Comportement en mer

Durant leur période en mer, les éléphants de mer du sud parcourent plusieurs milliers de kilomètres. Ils plongent continuellement à des profondeurs moyennes de l'ordre de 400 m, mais peuvent aller au-delà de 2000m (McIntyre et al. 2010), ce qui font d'eux un modèle d'étude parfait pour ce travail. Les plongées durent en moyenne vingt minutes, mais peuvent dépasser exceptionnellement une heure (Figure 6).

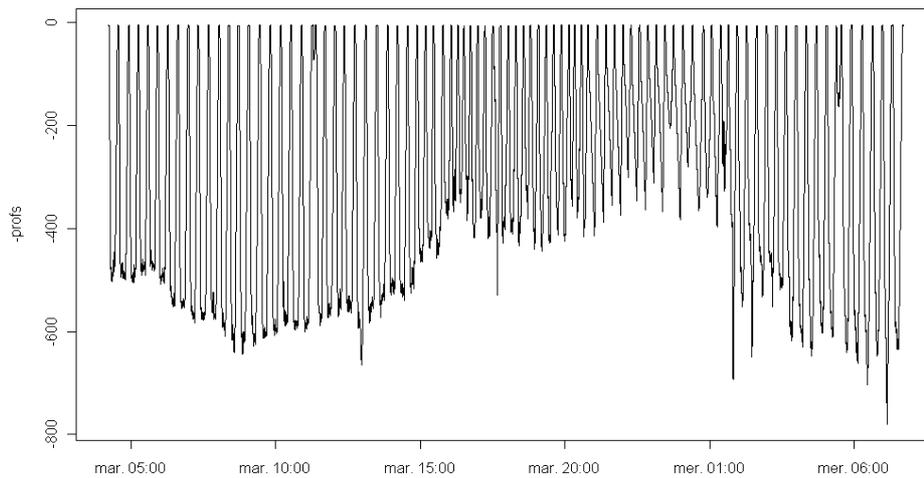


Figure 6 : Exemple de profils de plongée d'un éléphant de mer durant 24h

Une ségrégation spatiale entre les mâles et les femelles a souvent été mise en évidence (Frédéric Bailleul et al. 2010). Les mâles se retrouvent principalement sur le plateau de Kerguelen ou sur le plateau antarctique faisant des plongées benthiques, c'est-à-dire des plongées de fond, tandis que les femelles et les juvéniles se dirigent dans la zone inter-frontale, entre les fronts antarctique et subantarctique, ou à proximité du continent antarctique (Figure 7).

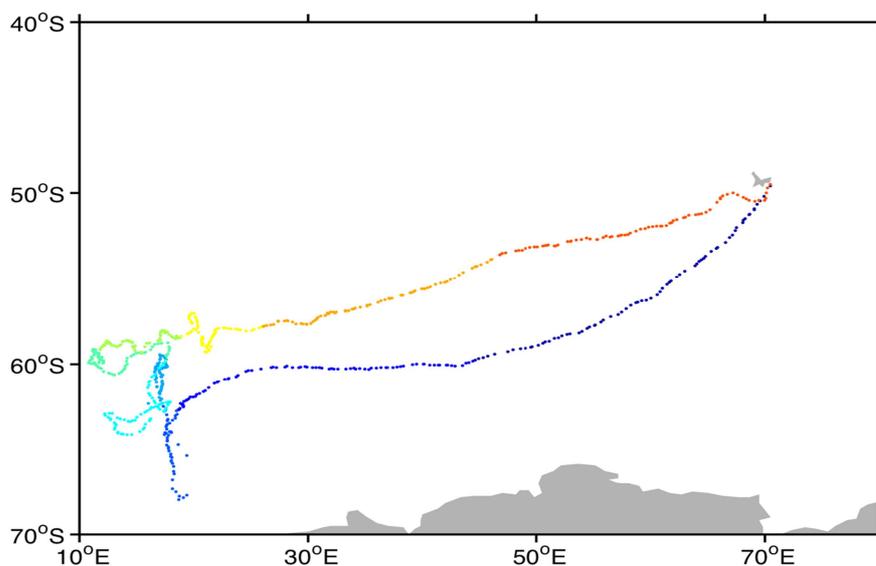


Figure 7 : Exemple d'un trajet de 8 mois d'une femelle équipée à Kerguelen en janvier 2013. Chaque couleur représente une durée de 5 jours durant le trajet.

2.1.4) Régime alimentaire

L'analyse des isotopes stables de l'azote ($\delta_{15}N$), qui est un bon indicateur du positionnement de l'espèce dans la chaîne trophique (Vanderklift et Ponsard 2003), a permis de mettre en évidence que tous les individus, mâle et femelles ont un régime alimentaire identique jusqu'à 4 ans. Les signatures isotopiques et les analyses des profils en d'acide gras, suggèrent très fortement que leur régime alimentaire est dominé par la consommation de poissons lanternes ou myctophidés (Daneri et Carlini, s.d.). Mâles et femelles s'alimentent alors pour la grande majorité d'entre eux en milieu hauturier (au large) et ont un mode de pêche pélagique (dans la colonne d'eau).

Par la suite, tandis que les femelles vont conserver le même régime alimentaire, les mâles vont changer à la fois d'habitat de pêche en abandonnant la pêche en milieu hauturier et pélagiques pour se nourrir principalement au niveau benthique sur les plateaux de Kerguelen et périantarctique. Ils s'élèvent alors progressivement dans la chaîne trophique, alors qu'ils restent fidèles à leur habitat de pêche (Martin et al. 2011) et leur régime alimentaire est vraisemblablement dominé par la consommation de poissons et calamars benthiques et épi-benthiques (Frederic Bailleul, Cotté, et Guinet 2010; Chaigne et al. 2013).

Les myctophidés sont des poissons mésopélagiques que l'on retrouve en grande quantité dans l'océan. Ils mesurent entre deux et quinze centimètres (Hulley 1998). Ils sont connus pour effectuer des migrations nyctémérales (Gjøsaeter et Kawaguchi 1980). La journée, on les retrouve à des profondeurs situées entre 300m et 1500m, tandis que la nuit, ils vont remonter à proximité de la surface, entre 10m et 100m, pour pouvoir se nourrir de zooplancton. Le spectre de vision de ces poissons est adapté au grande profondeur avec un maximum de sensibilité correspondant à la lumière bleue (Turner et al. 2009). Les myctophidés sont aussi appelés poissons-lanternes, car ils peuvent aussi émettre de la lumière (i.e. ils sont bioluminescents) (Case et al. 1977).

2.2) Sites d'étude

2.2.1) Kerguelen

L'archipel des îles Kerguelen, aussi appelé l'île de la Désolation (Cook 1842), fait partie des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF) avec l'archipel de Crozet, l'île d'Amsterdam, les îles Éparses et de la Terre Adélie. L'archipel se trouve dans l'océan austral à 3400 km de la terre habitée la plus proche. L'île principale a une superficie de 7215 km², ce qui est équivalent à la taille de la Corse.



Illustration 2 : Localisation et Topographie de l'archipel des Kerguelen. Source Google Map

Depuis 1950, la France occupe ce territoire en continu depuis la base de Port aux Français qui accueille entre 40 et 120 personnes toute l'année. Ces personnes, qui peuvent rester entre quelques mois et un an et demi, vont assurer le fonctionnement de la base sur le plan logistique, technique et scientifique.

Les scientifiques présents à Kerguelen travaillent principalement sur la péninsule Courbet et dans le golfe du Morbihan situés à l'est de l'île principale. Durant la période de reproduction des éléphants de mer, c'est la colonie se trouvant à Pointe Morne (sud-est de la péninsule Courbet) qui est suivie. Durant la période de mue, nous travaillons sur des individus qui se trouvent sur l'ensemble de la péninsule en fonction de l'endroit où ils reviennent à terre.

2.2.2) L'océan Austral

L'océan Austral est l'océan qui entoure le continent antarctique. Il s'étend du 60 °S, au niveau de la Nouvelle-Zélande, jusqu'au 48 °S, au sud de l'océan Atlantique (Laws 1985). L'absence de continent favorise la création d'une circulation atmosphérique très intense.

L'océan Austral tient une place particulière dans le système climatique de la Terre. En étant en contact avec les trois grands bassins océaniques que sont les océans Pacifique, Atlantique et Indien dont il va mélanger et redistribuer le contenu thermique (Orsi, et al. 1995).

On y trouve le courant océanique le plus puissant au monde : le courant circumpolaire Antarctique (ACC,(Deacon 1937)). Ce courant qui circule d'ouest en est, brasse 150 millions de mètres cubes d'eau par seconde soit 150 fois le débit de tous les fleuves du monde réunis (Nowlin et Klinck 1986). Ce courant va former une frontière entre l'océan Austral et les autres océans qui le bordent.

L'océan Austral se divise en différentes masses d'eau qui se définissent par des caractéristiques physico-chimiques : température, salinité et densité qui leur sont propres. On dénombre trois grandes catégories de masses d'eau dans l'océan Austral : les eaux subtropicales, subantarctiques et antarctiques. Deux masses d'eau qui se touchent vont former un front. Un front est défini par un gradient accusé des propriétés d'une masse d'eau (densité, température, salinité) vers une autre. Ainsi dans l'océan austral on dénombre trois fronts principaux : le front subtropical (STF), le front subantarctique (SAF) et le front polaire (PF)(Orsi et al. 1995; Belkin et Gordon 1996; Park et al. 2009) (Figure 8).

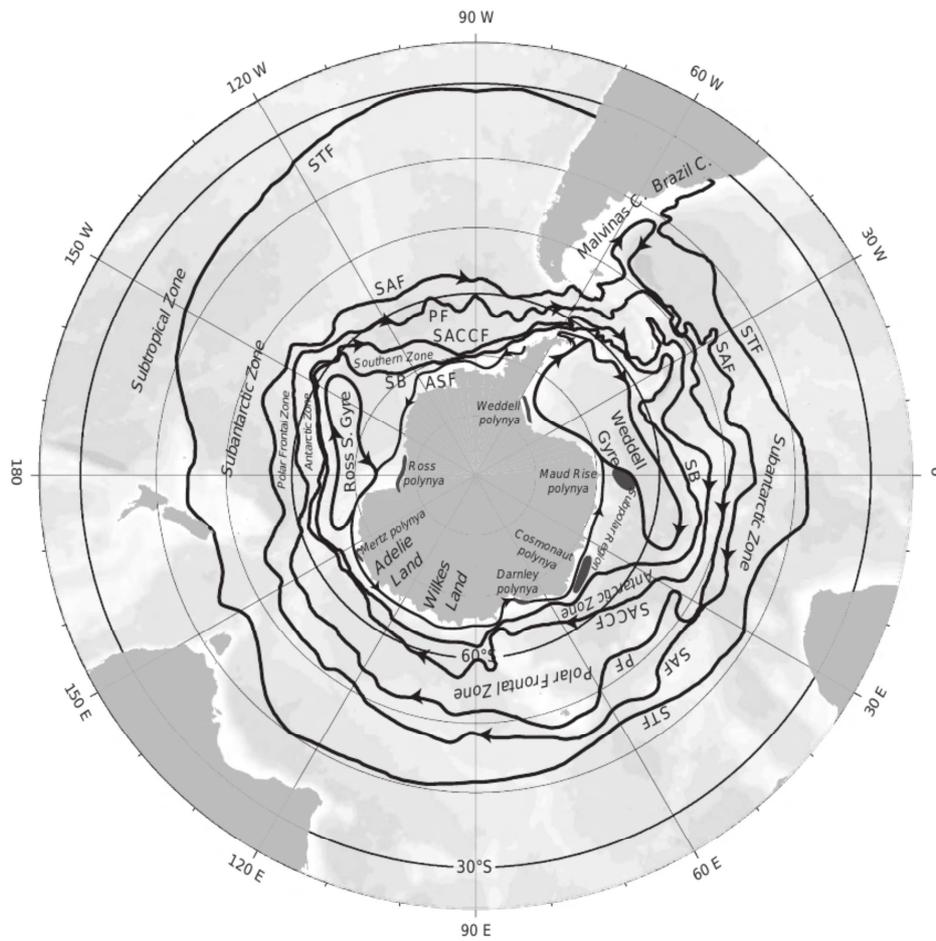


Figure 8 : Représentation de l'océan austral et des fronts (Talley 2011) : front subtropical (STF), front subantarctique (SAF), front polaire (PF)

2.3) Le terrain et les balises

2.3.1) Le terrain

Chaque année, trois personnes se rendent sur l'archipel de Kerguelen durant les périodes où les éléphants de mer sont à terre. Ils sont en charge de la partie terrain du programme « éléphant de mer ». Le terrain se divise en deux périodes : pendant la reproduction, de fin septembre à début novembre, et pendant la mue de fin décembre à début février. Durant ces deux périodes, l'équipe envoyée sur le terrain a pour mission d'une part de poser des balises sur des individus et d'autre part de récupérer celles posées la saison précédente. De plus, pendant la période de reproduction, un travail de suivi de population est effectué. Cent vingt petits sont bagués à la naissance, et sont pesés et mesurés au sevrage, trois semaines plus tard afin de caractériser les variations interannuelles de performances de pêches des femelles d'éléphants de mer lors de leur voyage alimentaire de pré-reproduction. Les habitats de pêches privilégiés par les mères de ces petits à savoir la zone frontale polaire, la zone antarctique et le plateau de Kerguelen sont caractérisés à partir de l'analyse des signatures isotopiques en $\delta_{13}C$ du sang complet des petits (Authier et al. 2012).

Pour conduire ce travail de terrain, j'ai effectué deux missions à Kerguelen, de décembre 2013 à mars 2014 où j'ai pu voir et apprendre les manipulations effectuées sur les éléphants de mer en étant sous la direction de Nory El Ksabi, puis de décembre 2015 à mai 2016 en tant que responsable du programme « éléphant de mer ».



Illustration 3 : Exemple de pose d'une balise sur un jeune mâle à Pointe Suzanne, Kerguelen

2.3.2) Les balises

Durant ces missions de terrain, différentes combinaisons de balises Argos et d'enregistreurs comportementaux ont été déployées sur les animaux. Depuis 2003, en collaboration avec le CNES, les éléphants de mer sont équipés de balise utilisant la technologie Argos.

Les balises **Argos** permettent d'obtenir des informations sur la localisation de l'animal. Pour cela, les balises utilisent les satellites Argos et calculent la localisation grâce à la dérive en fréquence du signal ou effet Doppler (Argos, 1996). Elles ont une précision allant d'une

centaine de mètres à quelques kilomètres. Chaque localisation est caractérisée par une date, une latitude, une longitude et une classe de qualité de localisation. Dans l'ordre de la meilleure qualité à la moins bonne, la classe peut avoir pour valeur : 3, 2, 1, 0, A, B, Z. Les classes A, B et Z ne permettent pas d'évaluer la précision de la localisation. Les trajets Argos sont transmis en temps réel par satellite, on peut donc suivre les animaux équipés lorsqu'ils sont en mer. Cependant, le système Argos ne permet de transmettre que quelques points par jour à des intervalles de temps d'environ une à trois heures.

Certaines balises utilisent aujourd'hui en plus la technologie **GPS** (Global Positioning System). Elles ont une précision d'une cinquantaine de mètres pour un intervalle de temps de quelques minutes. L'inconvénient est qu'elles ne transmettent pas la totalité du trajet GPS par satellite. Pour obtenir ce trajet GPS complet, il faut donc obligatoirement récupérer la balise pour pouvoir en extraire les données.



Illustration 4 : Schème d'une balise GPS "SPOT" (source Wild life computer)

Aujourd'hui, la plupart des balises que l'on utilise ont l'un des deux systèmes de localisation intégré. Mais on utilise aussi des balises Argos qui n'émettent que des signaux afin de permettre la localisation des éléphants de mer en complément d'autres balises et enregistreurs. En effet l'autonomie de ces balises Argos est beaucoup plus importante. Cela permet d'augmenter les chances de localiser via le système Argos l'animal lorsqu'il revient à terre et ainsi de récupérer les autres balises et enregistreurs qui contiennent les données les plus importantes et dont l'autonomie est plus limitée. Nous utilisons encore les deux systèmes de localisation puisque l'Argos permet de suivre l'individu durant son voyage et en mer et permet de retrouver les balises. Le GPS permet, si l'on récupère la balise, d'obtenir un trajet échantillonné plus précisément à l'échelle spatiale et temporelle (avec la possibilité d'obtenir une localisation pratiquement chaque fois que l'animal remonte à la surface pour

respirer).

2.3.2.1) Enregistreur Time Depth Recorders (TDR)

Les enregistreurs Time Depth Recorders (**TDR**) sont des appareils permettant de mesurer le comportement de plongée. Les TDR utilisés sur les éléphants de mer sont développées par Wildlife Computers (Washington, USA) qui est une entreprise spécialisée dans l'instrumentation des animaux sauvages. Les données sont archivées à bord de l'enregistreur qui doit être récupéré pour en permettre le téléchargement. Nous en utilisons trois modèles différents de TDR produits par Wildlife computer.

a) TDR MK9

Les TDR version MK9 permettent d'enregistrer le comportement de plongée de l'animal avec une fréquence d'échantillonnage maximale d'une seconde. Elles contiennent trois capteurs : un de température, un de lumière et un de pression. Le capteur de température enregistre dans une gamme de température comprise entre -40°C et 60°C . Il a une résolution de 0.05°C et une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Le capteur de lumière mesure les changements d'intensité de lumière dans un environnement sombre. Sa gamme de détection est comprise entre $5 \times 10^{-12}\text{W.cm}^{-2}$ et $5 \times 10^{-2}\text{W.cm}^{-2}$. Cependant, l'enregistreur calcule le logarithme de cette valeur avec la fonction : $L = 250 + 20 \log_{10}(i)$ où L est la mesure stockée par la balise et i la mesure du capteur. Nous utilisons donc la valeur L stockée par la balise qui a une gamme comprise entre 10 et 250. Enfin, le TDR mesure la pression qui nous donne donc la profondeur de plongée de l'animal avec une résolution de 0.5m et une précision de $\pm 1\%$. Les MK9 peuvent fonctionner jusqu'à 8 mois.

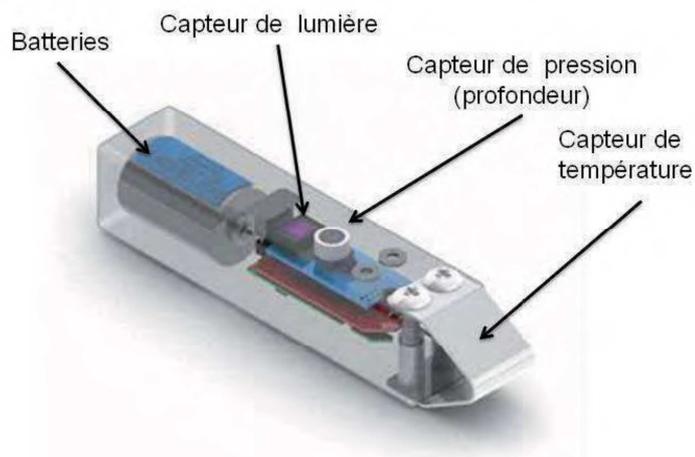


Illustration 5 : Schéma d'une balise de type MK9 (source Wild life computer)

b) TDR MK10 fast-loc

Les TDR MK10 fast-loc ont les mêmes capteurs de bases à que les balises MK9 : température, lumière et pression échantillonnées à une seconde. Les capteurs ont les mêmes caractéristiques. Cependant, les balises intègrent en plus, les systèmes de localisation Argos et GPS. Elles vont donc permettre de géo-localiser précisément les plongées des éléphants de mer. Les MK10 fast-loc ne transmettent que les positions Argos (et une partie des localisations GPS) via les satellites. Il faut donc aussi récupérer la balise pour pouvoir avoir accès aux données comportementales et au trajet GPS complet. En raison de la consommation d'énergie associée à la géo localisation GPS et la transmission des positions, ces balises ne peuvent fonctionner que pendant trois mois. Nous pouvons donc les poser uniquement pendant la période post-reproduction lorsque les trajets des éléphants durent un peu plus de deux mois.

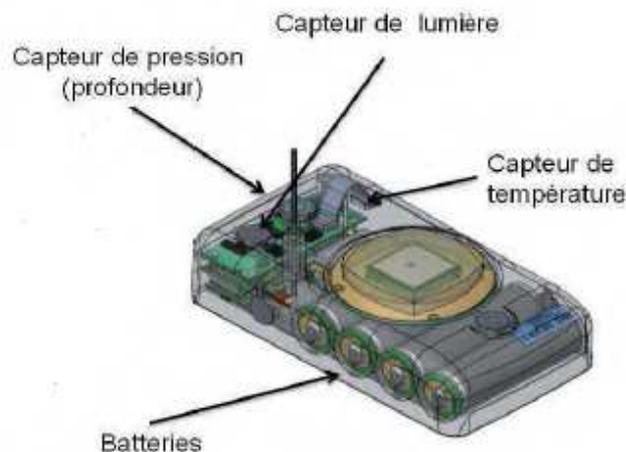


Illustration 6 : Schéma d'une balise de type MK10 fast-loc (source Wild life computer)

c) TDR accéléromètre et/ou magnétomètre

Ces enregistreurs vont échantillonner la pression, la température et la lumière à une fréquence maximale de 1Hz (tout comme les MK9). En plus de cela, elles vont pouvoir enregistrer l'accélération et la magnétométrie sur trois axes à une fréquence comprise en 4 et 32 Hz. Le plus souvent, la fréquence d'échantillonnage choisie est de 16 Hz (ce qui offre un bon compromis entre la consommation d'énergie, la mémoire d'archivage disponible et les comportements qui peuvent être extraits de ces signaux). La combinaison des informations sur la pression, l'accélération, la magnétométrie et la vitesse de déplacement permet de reconstruire les trajectoires de plongées en trois dimensions et, par conséquent, d'étudier les mouvements des animaux marins (Watanuki et al. 2003; Sato et al. 2010). Ces enregistreurs permettent aussi d'étudier le comportement de ces animaux. Par exemple, les données d'accélération permettent de détecter les mouvements de tête, mais aussi de corps associés aux tentatives de captures de proie tout au long de la plongée (Suzuki et al. 2009; Viviant et al. 2009), d'estimer le nombre et l'amplitude des mouvements des nageoires caudales qui servent à la propulsion de l'éléphant de mer (i.e. l'effort de nage) ainsi que la posture de l'éléphant de mer lors des différentes phases d'une plongée. Ces enregistreurs n'ont selon la fréquence d'échantillonnage sélectionnée qu'une autonomie de 1 ou 2 mois maximum et doivent être, tout comme les MK9, obligatoirement couplés avec une autre

balise Argos pour pouvoir les retrouver. Il faut en effet récupérer l'enregistreur pour obtenir les données.

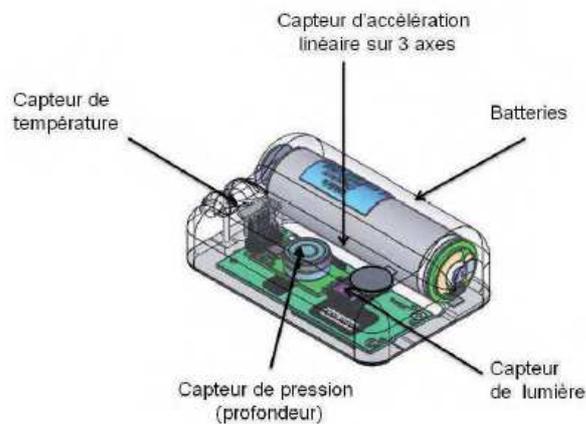


Illustration 7 : Schéma d'une balise TDR accéléromètre (source Wild life computer)

2.3.2.2) Balises Conductivity-Temperature-Depth Satellite-Relayed-Data-Logger (CTD-SRDL)

Les Conductivity-Temperature-Depth Satellite-Relayed-Data-Logger (**CTD_SRDL**) sont des balises Argos qui permettent de mesurer en plus des données océanographiques telles que la température et la salinité à des précisions (0.03°C et 0.05 PSU) qui permettent des applications océanographiques. Développés par le Sea Mammal Research Unit (SMRU) basé en Écosse, ils permettent d'obtenir des profils verticaux de température et de conductivité, et donc par extension de salinité et densité (Boehme et al. 2009). Elles utilisent les localisations Argos et un système utilisant la technologie GPS est en cours de développement. Durant tout le trajet de l'animal, la balise transmet via le système Argos entre 4 et 8 profils verticaux par jour. Ces profils sont des « profils résumés ». Pour un profil, on a entre 5 et 25 points qui vont de la surface à la profondeur maximale. Cependant, si l'on récupère la balise posée sur l'animal à son retour à terre, nous pouvons avoir tous les profils de plongée (60 profils par jour) à une fréquence d'échantillonnage de 0.5Hz. Depuis quelques années, nous pouvons aussi ajouter sur ces balises des **capteurs d'oxygène dissous** ou de fluorescence ce qui permet d'estimer les concentrations en **chlorophylle a**. Ces balises peuvent fonctionner pendant environ huit mois. Elles peuvent donc être utilisées pour

étudier les trajets post-mue des individus qui vont durer environ six -sept mois. Ces balises permettent la transmission de deux à quatre profils quotidiennement. Ainsi si l'on ne récupère pas la balise nous obtenons quand même des données. Cependant, si l'on parvient à les récupérer, le nombre de profils enregistrés est quasiment dix fois supérieur.

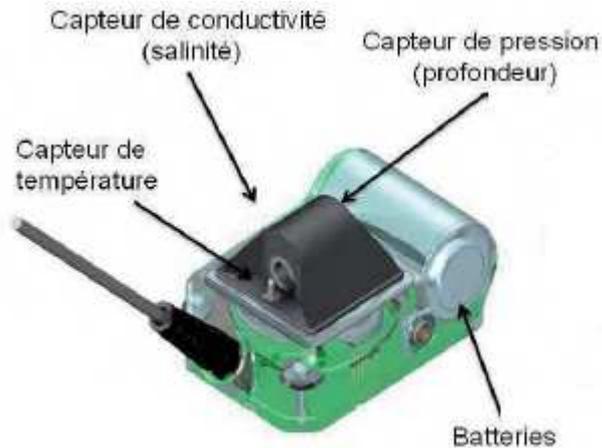


Illustration 8 : Schéma d'une balise CTD SRDL (source SMRU)

Un tableau résumant les caractéristiques de chaque appareil utilisé dans le cadre de mon diplôme est fourni ci-après (Tableau 1).

Type balise	Localisation	Profondeur	Température	Salinité	Fluorescence	Oxygène	Lumière	Accéléromètre	Magnétomètre	Accès Données
TDR MK9	-	X	X	-	-	-	X	-	-	Doit être récupéré pour télécharger les données
TDR MK10 fast-loc	Argos + GPS	X	X	-	-	-	X	-	-	Localisations transmises, pour le reste doit être récupéré
TDR accéléromètre /magnétomètre	-	X	X	-	-	-	X	X	X	Doit être récupéré pour télécharger les données
CTD SRDL	Argos	X	X	X	X (parfois)	X (parfois)	-	-	-	4-8 profils transmis/ jour

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des balises posées sur les éléphants de mer.

Chapitre III

Préparation et distribution des données océanographiques physiques

3.1) Introduction

Depuis 2003, des éléphants de mer sont équipés avec des balises CTD-SRDL à Kerguelen. Ces balises vont enregistrer pendant 2 à 8 mois et transmettre via Argos environ 2 à 4 profils quotidiens de température et de salinité en fonction de la pression (Figure 9). Il faut savoir que la salinité n'est pas enregistrée directement par la balise. C'est la conductivité qui est enregistrée et ensuite en utilisant en plus la température et la pression on obtient la salinité (Poisson 1980). Les profils sont résumés aux points les plus significatifs grâce à la méthode du broken stick (Fedak et al. 2002). Ces profils transmis via Argos sont des profils « basse résolution ».

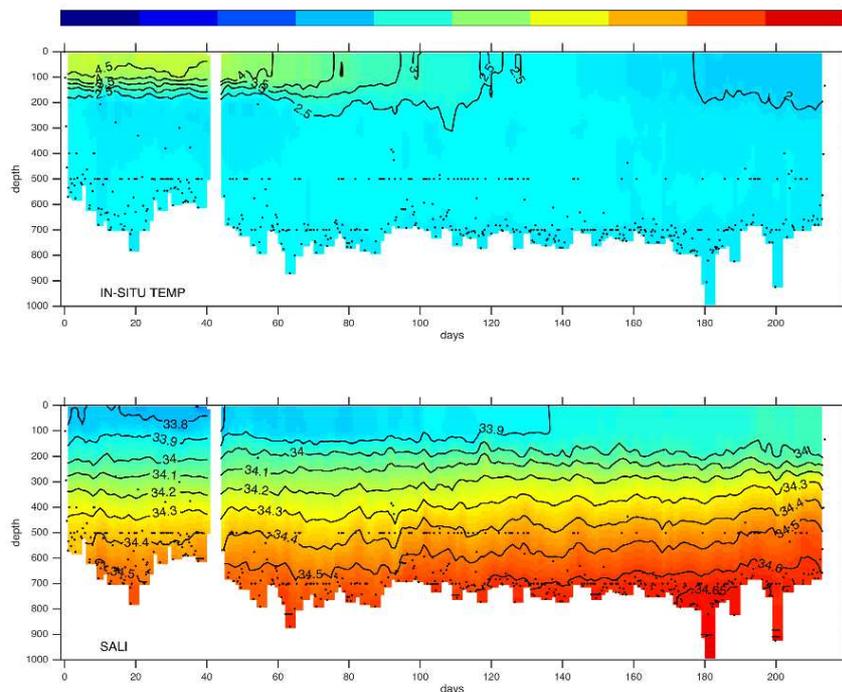


Figure 9 : Exemple de profils océanographiques basse résolution (température en haut et salinité en bas) enregistrés par un éléphant de mer. Chaque point noir est un point de profil et ici les données sont interpolées pour la visualisation.

Avant d'être déployées, les balises sont testées en laboratoire par Valeport, le constructeur des capteurs présents dans les balises dans un bassin où l'environnement est contrôlé. Cet étalonnage permet d'assurer un haut niveau de qualité des données récoltées avec une résolution de 0.001 °C pour la température, de 0.05 dbar pour la pression et de

0.002 mS/cm pour la conductivité, d'après le constructeur. Cependant la comparaison de profils obtenus simultanément entre une balise CTD-SMRU et une CTD de type Seabird utilisée lors des campagnes océanographiques permettent d'identifier différentes sources d'anomalies de mesure sur les balises CTD éléphant de mer (SMRU). Ces différences sont pour l'essentiel liées, d'une part, à des décalages en valeurs absolues des mesures de pression, température et salinité et, d'autre part, à des effets de la pression sur les mesures de conductivité et, dans une moindre mesure, sur la température (Roquet et al. 2014). Pour chaque paramètre (pression, température, salinité) de chaque balise, des coefficients de correction vont devoir être calculés et intégrés dans chacune des balises.

Pour permettre le calcul de ces coefficients de correction, outre les tests effectués en laboratoire de météorologie du SHOM à Brest (Coll. M. LeMenn) je me rends chaque année en mer Méditerranée à bord du bateau de la flotte océanographique côtière française Thétys II pour effectuer des enregistrements de profils de référence de température et de salinité in situ. Les balises sont accrochées avec un enregistreur CTD référent et immergées à 400 mètres de profondeur pour effectuer des profils T/S. Cela permet de vérifier qu'il n'y a pas une dérive de la mesure des capteurs en fonction de la profondeur et de pouvoir ajuster, le cas échéant, les coefficients de calculs des différents paramètres (Roquet et al. 2011).

Cependant, même si cette étape d'étalonnage est réalisée, une fois installées sur les éléphants de mer, les balises ne se comportent pas toujours de la même façon que dans un environnement contrôlé ou avec des appareils de références. Les balises vont fonctionner pendant plusieurs mois et les capteurs peuvent dériver au cours du temps. Les coefficients de calcul des paramètres du départ ne sont donc plus valables. La salinité étant une résultante de la température et de la conductivité (Lewis 1980), si un de ces deux paramètres connaît des erreurs d'enregistrement cela va obligatoirement affecter les valeurs de salinité calculées.

Ces données sont utilisées dans plusieurs programmes de recherche en océanographie ou en écologie. Il faut donc pouvoir justifier d'une précision et d'une erreur standard pour chaque paramètre et cela sur l'ensemble de la période de déploiement sur l'éléphant de mer.

L'objectif du travail conduit à détecter et corriger les erreurs produites par les balises à tous les niveaux de la chaîne de traitement. Que ce soit au moment des tests en environnement contrôlé, mais aussi tout au long de la période de déploiement sur l'éléphant de mer, afin de garantir aux utilisateurs finaux un niveau de précision minimum et de distribuer les données.

En collaboration avec le SMRU, qui est le principal constructeur des balises que nous utilisons, la mission est de créer un système unifié des données océanographiques récoltées grâce à des animaux marins bio-échantillonneurs. Ce projet s'intègre dans le cadre d'une collaboration internationale avec des laboratoires qui utilisent les mêmes technologies que nous. Pour assurer un niveau de précision minimal garanti, nous mettons en œuvre des procédures de calibration à différents niveaux.

3.2) Calibration en mode différé

Les balises posées sur les éléphants de mer présentent certains problèmes qui restent aujourd'hui encore d'actualité. La transmission par satellite peut être une première source d'erreur. La couche nuageuse peut entraver une bonne transmission des données et l'on peut obtenir des profils verticaux aberrants (Boehme et al. 2009) (Figure 10). Des erreurs de temps de réponse des capteurs de température et de salinité ont aussi été mises en évidence (Morison et al. 1994). Lorsque les animaux traversent des zones à forte variabilité de température ou de salinité, les profils verticaux sont alors décalés et la température ne correspond pas à la bonne pression.

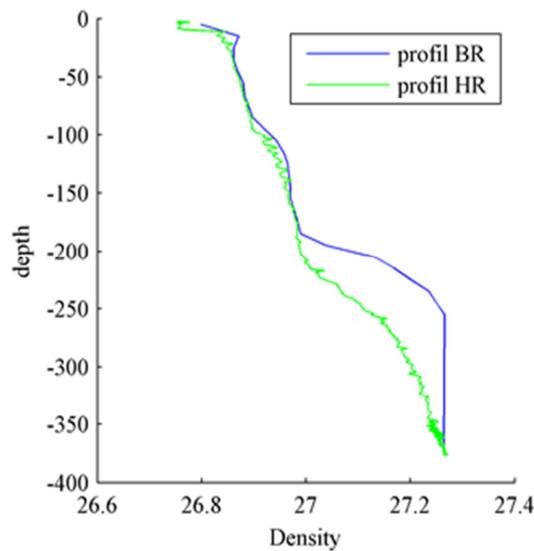


Figure 10 : Exemple de profil de densité en fonction de la profondeur. Le profil transmis par satellite (en bleu) présente un décalage de pression par rapport au profil enregistré dans la balise (en vert).

Afin d'assurer une complémentarité avec les autres méthodes d'acquisition de données océanographiques, une méthode de validation des données doit être établie, de la même manière qu'avec les drifters (Reverdin et al. 2012) ou les gliders (Dobricic 2010) qui sont des robots d'exploration océanographique autonomes permettant des mesures de température et salinité.

En utilisant une calibration en mode différé, c'est-à-dire après récupération de la balise (Roquet et al. 2011), la précision des données passe de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ à $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ pour la température et de ± 0.1 à ± 0.03 pour la salinité. Jusqu'à présent, la calibration des balises déployées sur les prédateurs marins n'était pas quelque chose de systématique et se concentrait surtout sur les balises CTD SRDL basse résolution.

La calibration en mode différée consiste donc à créer une routine automatique de calibration afin que les données soient les plus « propres » possible, et ce quel que soit le type de balise utilisée.

3.2.1) CTD SRDL basse résolution

La première étape de ce travail a été de corriger les profils basse résolution des balises CTD SRDL. Ces balises sont celles déployées depuis le début du projet éléphant de mer en 2003. Même si elles peuvent enregistrer la fluorescence et l'oxygène, mon travail s'est concentré sur la pression, la température et la salinité.

En se basant sur la méthode développée par (Roquet et al. 2011), le travail consiste à mettre en place la calibration automatique des profils quelle que soit l'année de déploiement. En effet, en fonction de l'année de déploiement, le programme qui enregistre les profils océanographiques change, ce qui implique des changements dans les données. Par exemple, durant les premières années, les balises enregistraient la conductivité et non la salinité, il faut donc pouvoir la recalculer.

La procédure de traitement comprend plusieurs étapes pour assurer la meilleure qualité possible des données :

- Visualisation balise par balise pour supprimer les profils aberrants, que cela concerne la localisation ou les données environnementales comme pour l'exemple de la Figure 10.
- Ajustement de la salinité (Figure 11). Ces corrections sont basées sur des comparaisons avec des profils CTD historiques et des données Argo (flotteurs, gliders, drifters...). On recherche des coefficients de calibration d'un polynôme de degré un à appliquer pour chaque CTD afin que les profils correspondent aux profils de références.
- Ajustement de la température quand c'est possible. En pratique, c'est uniquement possible dans le cas où les éléphants de mer se dirigeraient vers des eaux avec présence de glace de mer, ce qui permet d'utiliser la température de congélation comme référence.
- Contrôle qualité des données ajustées (Figure 12): en utilisant 1) l'anomalie de hauteur d'eau de 20 à 500 dbar, 2) la localisation spatiale et temporelle des profils « éléphants de mer » et 3) la World Ocean Database pour la période allant 2000 à 2013 (Roquet et al. 2014).

- Stockage et distribution des données dans un format normalisé, le NetCDF (Network Common Data Form) qui est un format utilisé dans des applications de climatologie, météorologie et océanographie créé par University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Depuis 2014, un document a été rédigé pour formaliser les données océanographiques récoltées par les mammifères marins. Nous avons donc appliqué cette convention (« Marine-Mammals NetCDF Formats and Conventions » 2014). On crée un fichier par individu dans lequel on garde les méta-données de l'individu (sexe, poids, taille, propriétaire des données, coefficient de correction...), les matrices de localisation spatio-temporelle et données de pression, température et salinité. Pour les données océanographiques, on conserve les données brutes et les données corrigées.

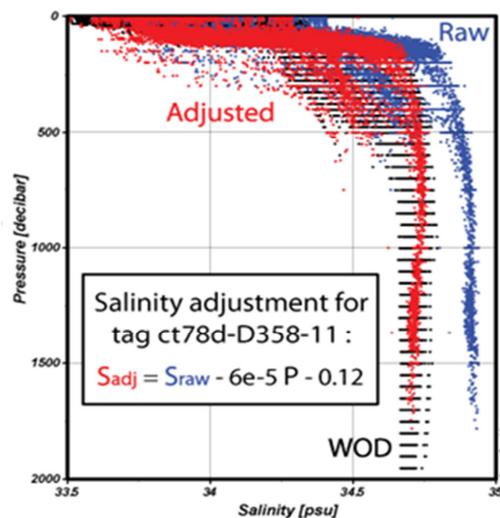


Figure 11 : Données brutes de salinité (en bleu) et données ajustées (en rouge) pour la CTD ct78d-D358-11. L'ajustement est effectué en les comparant aux profils World Ocean Data Base (en noir).

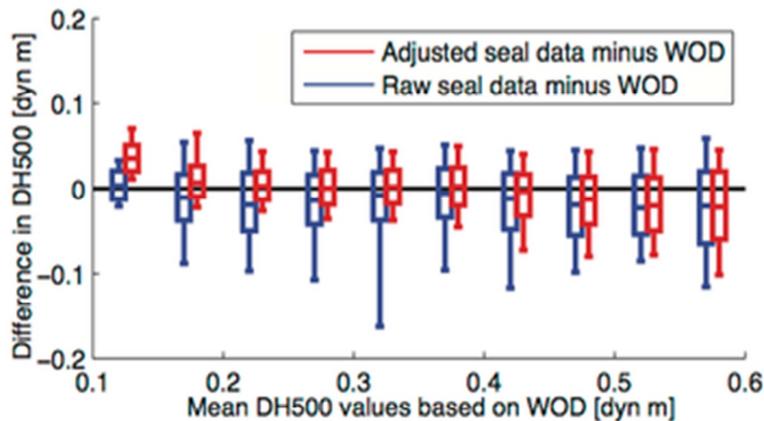


Figure 12 : Valeurs brutes (en bleu) et ajustées (en rouge) de la hauteur d'eau. L'ajustement est calculé par rapport aux hauteurs d'eau des profils de référence dans la World Ocean Database. On voit que le rapport des données brutes (en bleu) est amélioré une fois les données ajustées (en rouge).

3.2.2) CTD SRDL haute résolution

Les balises évoluent avec la technologie. Ainsi, le stockage des données au sein de chaque appareil est de plus en plus grand. Par exemple, au début du programme chaque profil « basse résolution » était résumé en douze points. Aujourd'hui il en compte seize à vingt-cinq.

Depuis 2011, le Sea Mammals Research Unit a mis en place les balises CTD SRDL haute résolution. En plus de transmettre les profils via Argos, la balise enregistre la totalité des données récoltées. Il devient possible de télécharger tous les profils enregistrés si la balise est récupérée. On passe de 8 profils par jour résumé en seize points à soixante profils échantillonnés à la seconde, ce qui fait environ 1200 points par plongée (Figure 13).

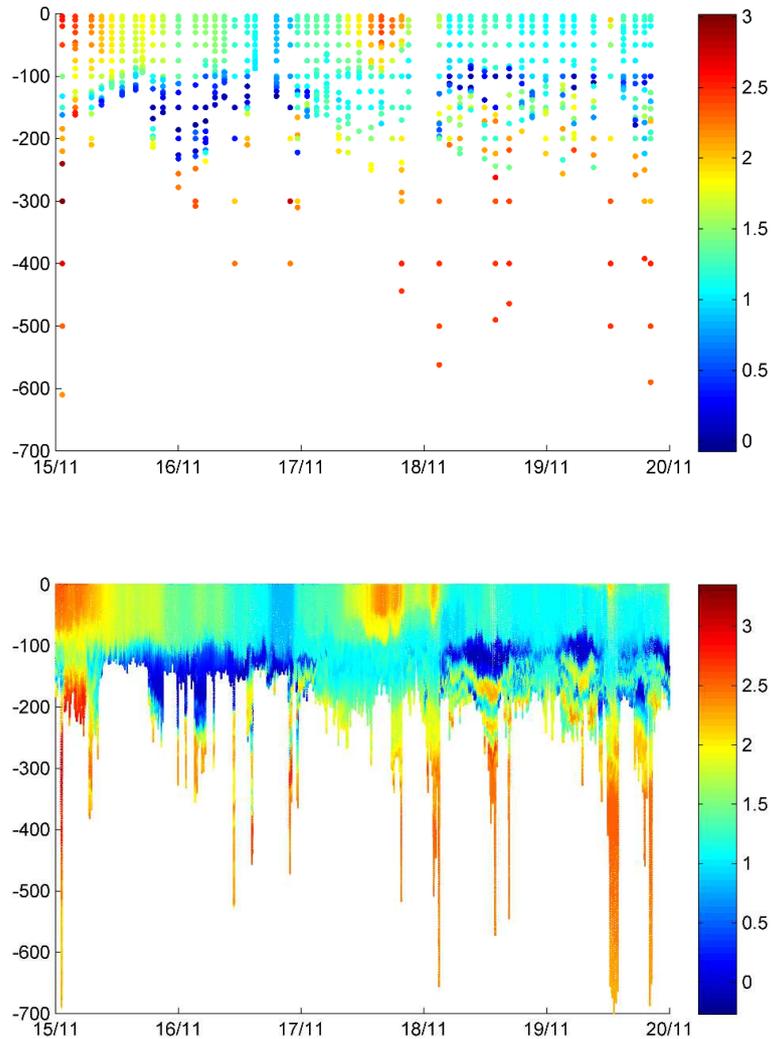


Figure 13 : Comparaison des profils de température basse résolution (en haut) et basse résolution (en bas).

L'objectif du travail concernant les hautes résolutions est au départ le même que pour les basses résolutions. On applique donc la méthode de calibration en mode différé. Cependant, les scripts doivent être adaptés pour faire fonctionner la routine. Par exemple, il faut pouvoir détecter les profils océanographiques, les données brutes étant sous forme de série temporelle. Pour chaque plongée de l'éléphant de mer, un profil océanographique correspond à la remontée, c'est-à-dire de la profondeur maximum à la surface. Les données sont ensuite conservées de deux manières : en profil vertical (équivalent aux basses résolutions), et en profil de trajectoire (on conserve les points de chaque seconde) (« Marine-Mammals NetCDF Formats and Conventions » 2014).

Afin d'identifier des erreurs potentielles dans les jeux de données (cf. Figure 10), un système de comparaison des données hautes et basses résolutions doit aussi être créé. L'objectif est de pouvoir identifier des erreurs de transmission ou de temps de réponse des capteurs (Mensah et al. 2014; Mensah et al. 2015). Pour ce faire, on utilise la donnée haute résolution comme référence. Pour chaque profil commun entre la basse et la haute résolution, on calcule la RMS (Root Mean Square) qui va donner un gradient de l'erreur de mesure pour la température, la salinité et la densité (Figure 14).

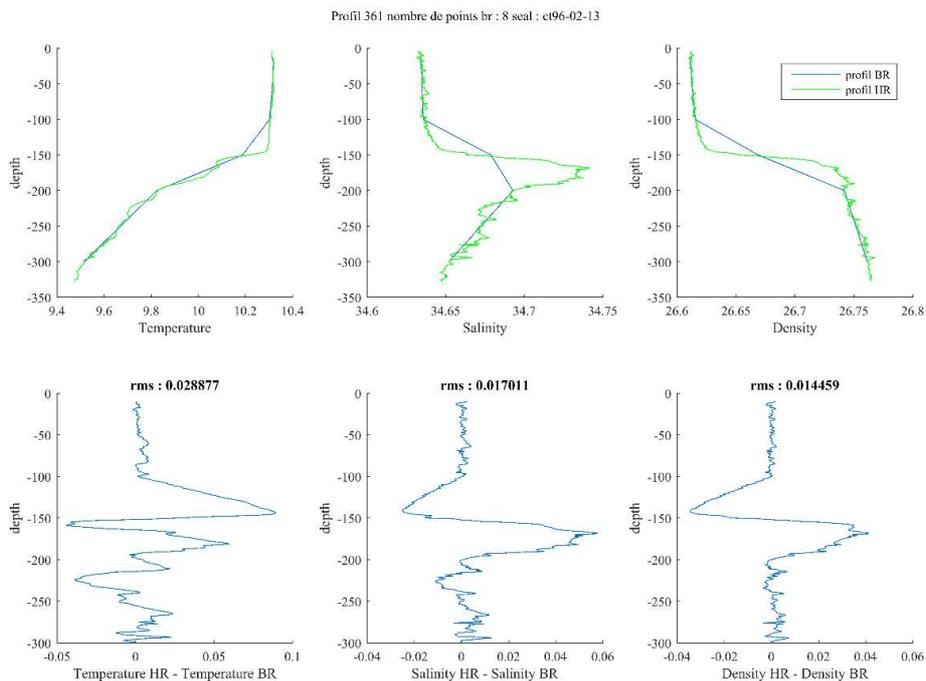


Figure 14 : Comparaison d'un profil (température, salinité et densité) en haute (en vert) et basse (en bleu) résolution. Sur les trois variables, calcul de la RMS (graphique du bas) pour mesurer l'erreur.

Grâce à ces graphiques, on peut identifier les types d'erreurs que peuvent faire les balises et qui n'ont pas encore été corrigés, pour pouvoir par la suite intégrer des corrections automatisées sur les données basse résolution.

3.2.3) Les TDR

Depuis 2008, notre équipe déploie les Time Depth Recording (MK9, MK10 fast-loc, accéléromètre et magnétomètre) durant la période post-reproduction sur les femelles

éléphants de mer. Comme présenté dans le chapitre précédent, ces balises enregistrent la température et la lumière pendant environ deux mois à chaque seconde du trajet de l'animal et sont souvent associées à des balises CTD-SRDL.

La précision des capteurs de ces balises étant moindre par rapport aux CTD-SRDL, nous avons décidé d'utiliser les données de cette dernière comme références pour corriger ceux des TDR. Il faut donc associer les profils des deux balises et faire des comparaisons pour trouver des coefficients de calibration de correction pour la profondeur (Figure 15).

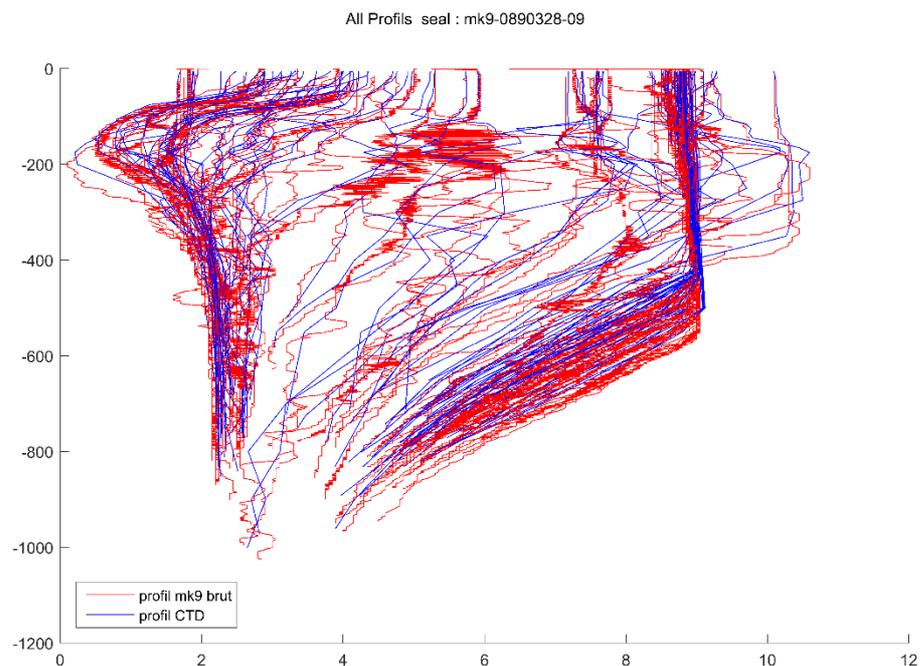


Figure 15 : Comparaison des profils d'un MK9 (en rouge) et d'une CTD (en bleu) pour pouvoir corriger la profondeur

La correction de la profondeur se fait visuellement. En regardant les figures équivalentes à la Figure 15, on ajuste la profondeur du TDR pour qu'elle corresponde au mieux à celle de la CTD.

Une fois la profondeur corrigée, l'objectif est de corriger la température. Il suffit de calculer un polynôme de degré 1 de la forme $\text{Temp}(\text{cor}) = a * \text{Temp}(\text{brut}) + b$.

Les données sont ensuite sauvegardées au format NetCDF profil de trajectoire (« Marine-Mammals NetCDF Formats and Conventions » 2014).

L'ensemble de ce travail a été développé sous Matlab. Il s'est agi de créer les scripts et fonctions qui vont permettre les traitements présentés ci-dessus. En plus des scripts que j'ai développés, j'ai utilisé deux packages : un pour les calculs de variables océaniques (par exemple la densité de l'eau) avec le package Seawater (Morgan et Pender, s. d.) et un pour construire les graphiques de visualisation de trajectoire : M_map (Pawlowicz 2000).

3.3) Résultats

3.3.1) Calibration

La première étape de cette étude a été, en partant du jeu de données CTD-SRDL sur les éléphants de mer, de mettre en place un système de calibration des données de température et de salinité. L'idée est d'utiliser les connaissances océanographiques (Park et al. 2008; Meredith et al. 2011) et les procédures de validation existantes (Durand et Reverdin 2005; Charrassin et al. 2010; Guinet et al. 2013) pour créer un outil fonctionnel de calibration, de correction et de mise en forme des données collectées par ces animaux marins.

La référence pour la création des scripts a été les données basse résolution des CTD-SRDL. Par la suite, il a fallu adapter les scripts pour qu'ils fonctionnent, quel que soit le type de balise et l'année de déploiement. L'objectif étant d'avoir un processus centralisé.

L'ensemble des données comprend les profils de température, de salinité, de fluorescence, d'oxygène et de lumière en fonction de la pression. Chaque profil est localisé dans l'espace et le temps. Chaque balise déployée sur un individu a été éditée et corrigée séparément, car elles ont chacune leurs spécificités en termes d'exactitude et de qualité.

Mon travail a donc été de créer les routines sur Matlab qui vont de manière automatique :

- télécharger les données brutes sur le serveur qui les héberge,
- créer un fichier NetCDF par balise brute afin d'avoir un format identique de base,

- appliquer un premier filtre de correction des profils aberrants en fonction d'un maximum de température, de salinité et de densité, en fonction des conditions environnementales connues

- créer des graphiques de visualisation des données : pour chaque balise, les données sont représentées afin de faciliter par la suite les ajustements de salinité et de température. Les graphiques permettent aussi de détecter des profils aberrants qui n'auraient pas été identifiés lors de la première étape (Figure 10 et Figure 16),

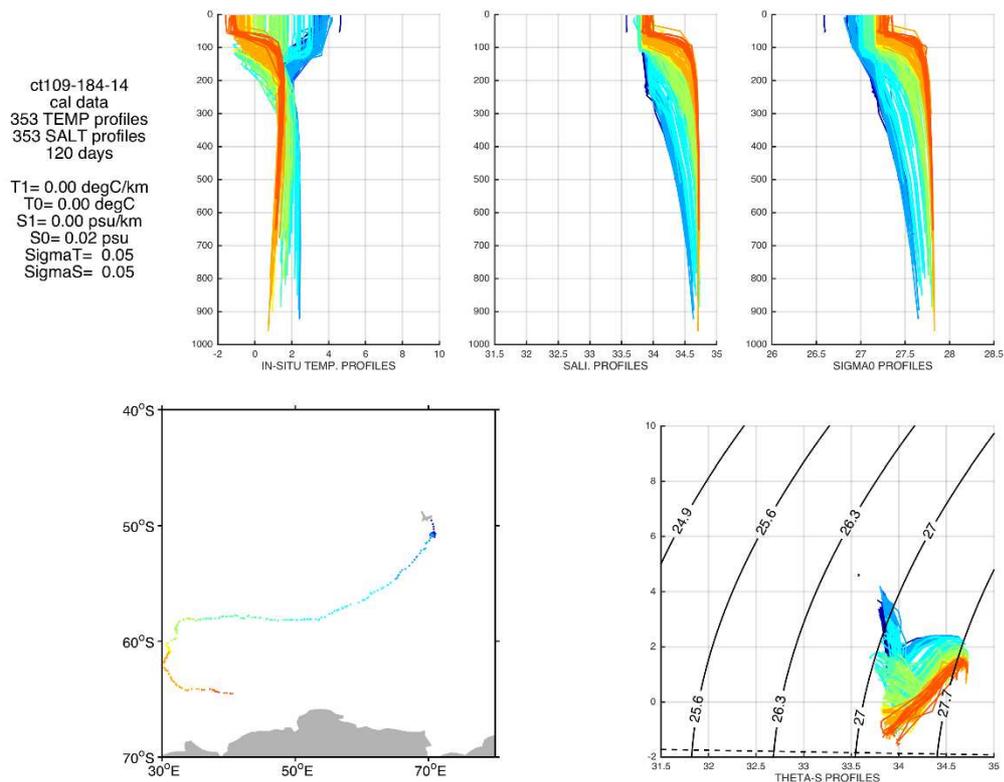


Figure 16 : Exemple de graphique de visualisation des données d'une CTD-SRDL. En haut à gauche il y a des informations sur l'individu (nom, nombre de profils, coefficient de correction...). Les trois graphiques du haut représentent, de gauche à droite, les profils de température, salinité et densité. En bas à gauche, on observe le trajet de l'individu et à droite la température en fonction de la salinité.

- En localisant les profils éléphant de mer en fonction du temps, de la localisation (latitude et longitude) et de la structure de la masse d'eau (en utilisant la hauteur d'eau) on associe les profils de référence World Ocean Database pour calculer les coefficients de correction de température et salinité,

- création de fichiers NetCDF corrigés et de documents PDF (**Annexe 1 : Exemple de création d'un fichier de visualisation PDF pour le déploiement FT01 (1 balise) 88**

Annexe 2 : Etalonnage de la balise 13323 au SHOM 90

Annexe 3: The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle *Lepidochelys olivacea* along the Guiana coast 92

Annexe 4: Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour 93

Annexe 5: Characterization of Postdive Recovery Using Sound Recordings and Its Relationship to Dive Duration, Exertion and Foraging Effort of Southern Elephant Seals (*Mirounga Leonina*)..... 94

Annexe 6: Adjustment of Diving Behaviour with Prey Encounters and Body Condition in a Deep Diving Predator: The Southern Elephant Seal..... 95

Annexe 7: Calibration Procedures and First Dataset of Southern Ocean Chlorophyll a Profiles Collected by Elephant Seals Equipped with a Newly Developed CTD-Fluorescence Tags. 96

Annexe 8: Winter use of sea ice and ocean water mass habitat by southern elephant seals: The length and breadth of the mystery 97

Annexe 9 : Marine bioluminescence: record by a light-sensor and related foraging behaviour of a diving predator 98

Annexe 10: How Elephant Seals (*Mirounga leonina*) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate 99

Annexe 11: Southern Elephant Seal foraging success in relation to temperature and light conditions: insight on their prey distribution.100

Annexe 1 : Exemple de création d'un fichier de visualisation PDF pour le déploiement FT01 (1 balise) qui présentent chaque balise pour faciliter la visualisation, la transmission des données et leur utilisation.

Durant ce processus, nous sommes obligés de saisir à la main les coefficients à appliquer pour corriger les données. Cette étape ne peut être automatisée, car chaque balise est un cas unique. Il faut donc vérifier, à l'aide de graphiques qui comparent les profils éléphants de mer et les profils WOD de référence, que la calibration est correcte et trouver les coefficients à appliquer. (Figure 17). Cette étape intervient avant la création des fichiers NetCDF corrigés.

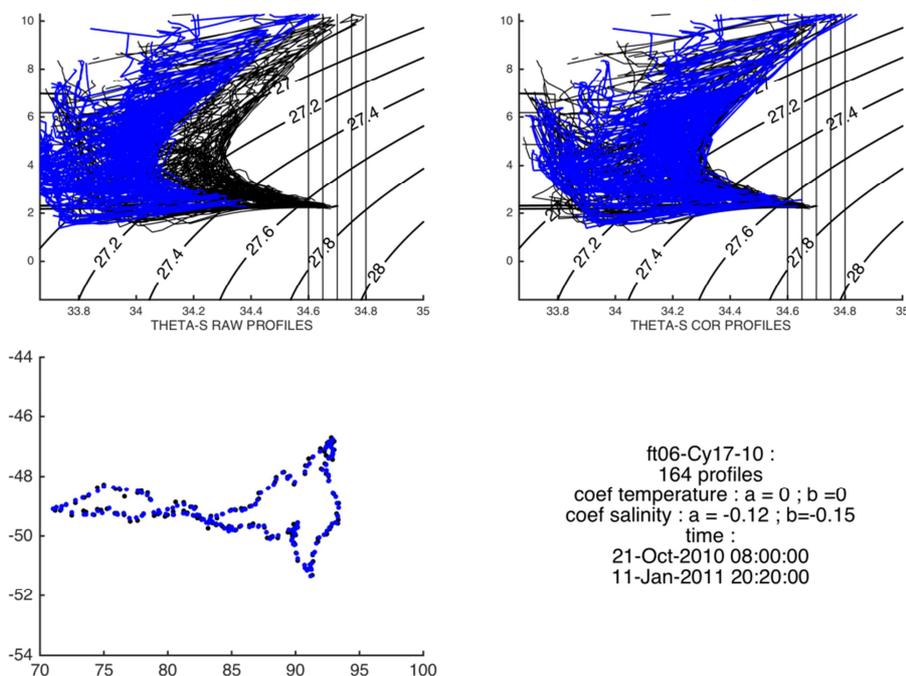


Figure 17 : Calibration de la salinité de la balise ft06-Cy17-10. Les profils « éléphant de mer » sont en bleu et les profils de références WOD sont en noir. Sur le premier graphique, il s'agit des profils bruts, on observe un décalage des données. Sur le deuxième graphique, on a appliqué des coefficients pour recaler les profils « éléphant de mer » avec les profils WOD. Le dernier graphique représente le trajet de l'animal, chaque point bleu représentant un profil récolté par la balise éléphant de mer et chaque point noir représente un profil WOD utilisé comme référence.

De plus, les balises TDR associées à une CTD-SRDL ont toutes été corrigées pour la profondeur et la température. Le jeu de données est aujourd'hui calibré et la routine créée permet d'assurer une stabilité pour les années à venir. On peut voir l'ensemble du jeu de

données disponible sur les Figure 18 et Figure 19 . Cela représente 132 CTD-SRDL et 69 TDR pour plus de 300 000 profils océanographiques.

Nous faisons la distinction entre les types de balises, car la précision des capteurs n'est pas la même. Les CTD-SRDL vont avoir une précision de $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ pour la température et de ± 0.003 pour la salinité tandis que les TDR vont avoir une précision de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ pour la température. Dans la distribution des données, il faut donc être clair pour que toute personne voulant les utiliser puisse trouver facilement ce qu'elle cherche.

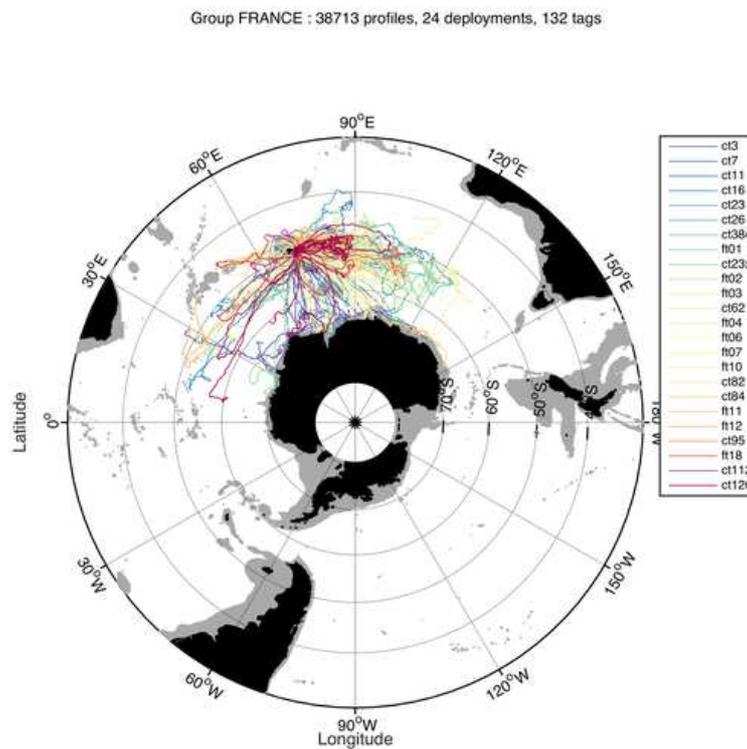


Figure 18 : Ensemble des données CTD-SRDL calibrées pour les données françaises. Chaque couleur représente un ensemble de déploiement de balises.

MEOP-TDR public dataset : 285014 profiles, 69 tags

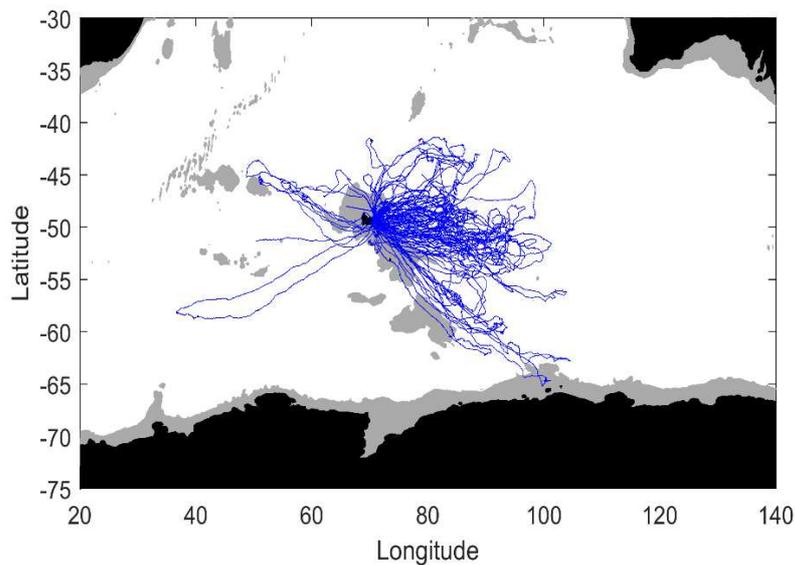


Figure 19 : Ensemble des données TDR calibrées depuis 2008.

3.3.2) Création du MEOP consortium

L'objectif du MEOP consortium (Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole) est de rassembler différents programmes de recherche utilisant le bio-logging sur les mammifères marins pour créer une base de données unifiée et corrigée.

Nous avons récupéré les données provenant de balises CTD-SRDV venant de 10 pays différents : Australie, Brésil, Canada, Chine, France, Allemagne, Norvège, Afrique du Sud, Royaume-Uni, Etats-Unis.

Pour le moment, seule la France a rendu public son jeu de données TDR. C'est pourquoi le jeu de données présenté précédemment a été intégré tel quel dans le projet MEOP.

Le traitement expliqué précédemment a été appliqué afin d'homogénéiser cette diversité de données. Dans ce cadre, une limitation importante est représentée par l'évolution technique constante des balises en termes de méthode d'enregistrement (nombre

de points par profil transmis) et de capacité de stockage (nombre de profils enregistrés), mais aussi en termes de paramètres enregistrés. Par exemple, certaines balises enregistrent maintenant la chlorophylle a. Même si aujourd'hui aucune correction n'est appliquée sur ce paramètre, nous voulons le stocker au format NetCDF normalisé pour qu'il soit disponible.

Un travail de généralisation a donc été nécessaire pour pouvoir créer un outil qui traite n'importe quelle balise CTD et fournit les données au même format. Il a donc fallu revoir les scripts pour qu'ils traitent chaque type de balise, quelles que soient leur méthode d'acquisition, leur résolution ou leurs données enregistrées.

Mon travail a donc été de calibrer ces nouvelles balises qui sont posées sur plusieurs espèces de prédateurs marins : éléphant de mer, phoque de Weddel, otarie...

Par la suite, une plateforme de distribution a été créée afin de faciliter l'accès aux données à l'ensemble de la communauté scientifique. Depuis le 1^{er} juin 2015, un site internet MEOP est en ligne et permet à toute personne intéressée de télécharger les données publiques (Roquet et Picard 2015).

Aujourd'hui, plus de 1100 balises ont été calibrées pour un ensemble de plus de 500 000 profils de température et salinité avec une précision de 0.03°C et 0.05 (Figure 20).

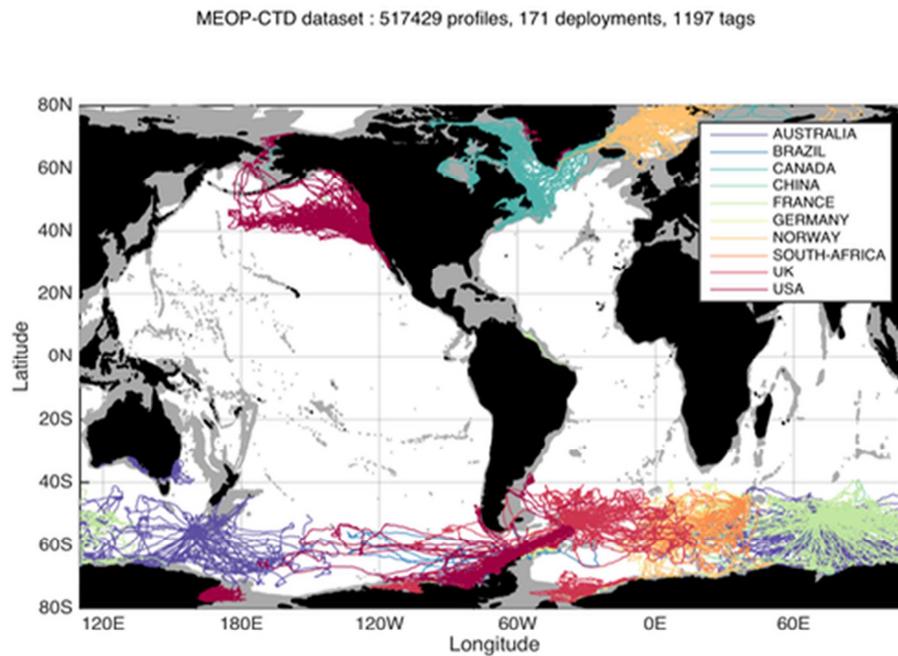


Figure 20 : Carte du monde représentant la répartition des profils CTD (température et salinité) actuellement disponibles dans la base de données MEOP –CTD.

Si l'on reprend la figure des profils WOD13 et que l'on compare avec les profils contenus dans MEOP (Figure 21), on observe une très bonne complémentarité pour l'échantillonnage des océans. C'est pour mettre en avant ce type de résultat et faire en sorte que ces données soient de plus en plus utilisées que MEOP a été créé. Un résumé des données calibrées est fourni dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

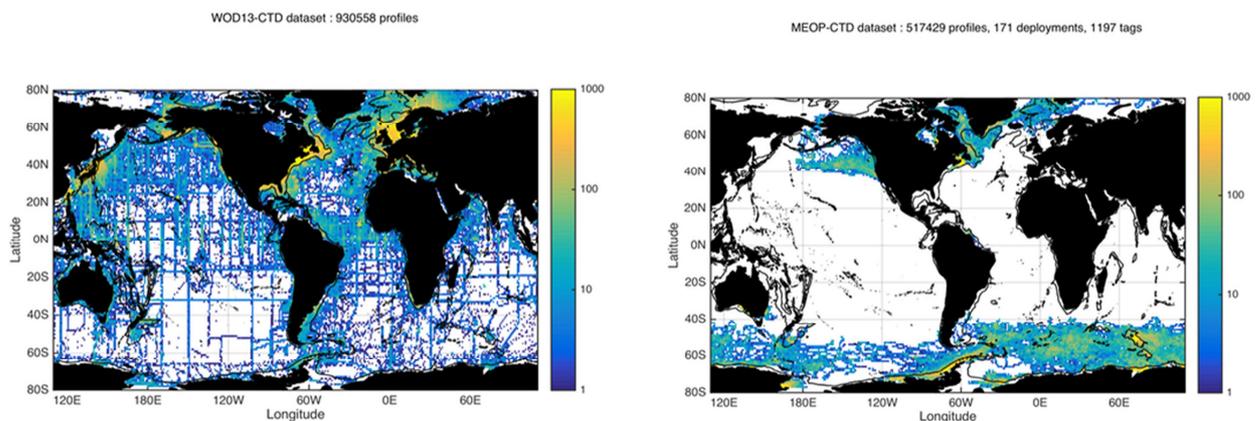


Figure 21 : Comparaison entre les CTD WOD13 et les balises calibrées dans MEOP. On peut voir que MEOP apporte un vrai plus dans le jeu de données mondiales dans l'océan Austral.

Pays	Nombre de balises CTD-SRDL	Nombre de balises TDR	Nombre de profils océanographiques calibrés
Australie	334	-	160 122
Brésil	28	-	15 503
Canada	149	-	70 953
Chine	4	-	1 429
France	132	69	323 727
Allemagne	57	-	16 678
Norvège	112	-	53 650
Afrique du Sud	21	-	9 067
Royaume-Uni	119	-	57 607
Etats-Unis	237	-	92 103

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des données calibrées au sein de MEOP

3.4) Discussion

3.4.1) Evolution de la méthodologie et bilan

Le travail effectué avait pour but de centraliser les données « éléphant de mer » dans un premier temps, puis d'élargir aux prédateurs marins équipés de balises. Le résultat a déjà permis de rassembler les connaissances de chacun des pays participants. En plus, cela donne beaucoup plus d'impact aux profils océanographiques récoltés par les prédateurs marins.

La méthode qu'ont développé (Roquet et al. 2011) a été améliorée puisqu'elle est maintenant automatisée et fonctionne pour plusieurs types de balises. Cela permet d'assurer une continuité du projet à l'avenir. Pour les futurs déploiements de balises, on est sûr que la température et la salinité seront calibrées par cette routine. L'adaptation de la routine est une réelle avancée puisqu'elle permet aujourd'hui d'intégrer des données qui ne sont pas récoltées uniquement par des éléphants de mer, mais par des animaux ayant un comportement de plongée équivalent. Par exemple, les données récoltées par les tortues en Guyane ont récemment été intégrées (Chambault et al. 2016) Annexe 3: The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle *Lepidochelys olivacea* along the Guiana coast). Le projet est donc en évolution permanente puisque les pays membres du projet continuent de récolter des données. Le type de balise, le type de données, les espèces équipées peuvent changer, évoluer ou apparaître.

Le partage des données et des connaissances est aussi très important (Hendriks 1999; Bock et al. 2005). C'était l'un des principaux aspects qui a motivé la création du projet MEOP. La calibration est faite par Fabien Roquet et moi-même dans le but de rendre ces données publiques et utilisables par toute personne intéressée. La collaboration permet l'écriture de publications, ce qui n'aurait pas été possible si chacun n'avait pas rendu ses données publiques. La publication de (Hindell et al. 2016) qui avec associe une quinzaine d'acteurs du projet MEOP le prouve.

Mon travail a permis de créer, maintenir et améliorer en permanence la passerelle entre les données récoltées par les prédateurs marins et les acteurs qui vont exploiter ces données. Il faut donc être à l'écoute de chacun des domaines concernés (biologie et

océanographie) et trouver un équilibre et une mise en forme des données qui puisse satisfaire le plus grand nombre.

3.4.2) Perspective

Le travail effectué a permis d'obtenir un jeu de données calibré. Toutefois à l'heure actuelle seules la salinité et la température sont corrigées. Même si les données de lumière, fluorescence et oxygène sont disponibles, elles sont brutes pour l'instant.

On pourrait mettre en place des calibrations sur ces différents capteurs en adaptant des méthodologies existantes sur l'oxygène (Benson et Krause 1984; Frederic Bailleul, Vacquie-Garcia, et Guinet 2015b) ou sur la lumière et la fluorescence (Green et Blough 1994; Guinet et al. 2013; Biermann et al. 2015) surtout dans le but de suivre les technologies et l'innovation des balises. Par exemple, le SMRU est en train de développer des balises CTD-SRDL qui pourront également enregistrer la lumière. Cela veut dire qu'il y aura de plus en plus de profils l'enregistrant.

L'utilisation des données haute résolution des balises CTD-SRDL a permis de mettre en évidence un certain nombre de problèmes. Tout d'abord au niveau du temps de réponse. : lorsqu'un prédateur marin change de masse d'eau, les capteurs n'enregistrent pas instantanément les changements, ce qui entraîne un décalage dans les profils (Millard, Toole, et Swartz 1980; Morison et al. 1994). Pour corriger ce problème, une collaboration avec Vigan Mensah qui travaille dans ce domaine vient d'être mise en place.

Ensuite, des problèmes au niveau des profils ont aussi été mis en évidence. Des inversions de densité (Gargett et Garner 2008), des profils plats ou « spike » (Figure 22).

Grâce à la comparaison de la haute et de la basse résolution, on peut détecter les profils aberrants. Par la suite, la création de routine pour les détecter de manière automatique permettrait de nettoyer plus en profondeur le jeu de données. Il pourrait aussi être intéressant de réfléchir à la possibilité d'une correction de ces problèmes en amont, avec par exemple une modification du logiciel interne des balises.

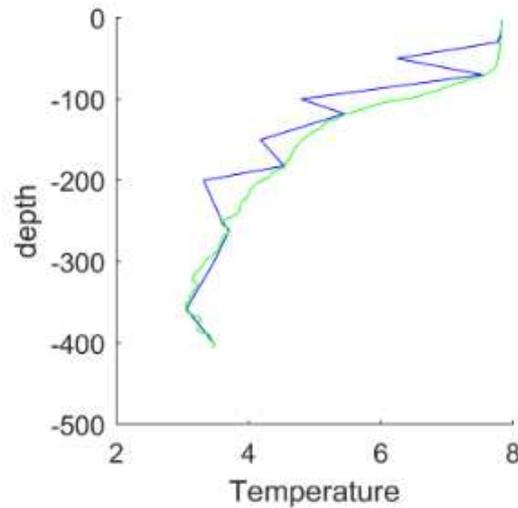


Figure 22 : Exemple de « spike ». La haute résolution (en vert) permet de mettre en évidence les points aberrants fournis par la basse résolution (en bleu).

Dans le but d'améliorer les balises CTD-SRDL des tests en bassins ont été effectués en 2015 par Roquet et moi-même au laboratoire du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine avec l'aide de Marc Le Menn (Annexe 2 : Etalonnage de la balise 13323 au SHOM). Les balises sont plongées dans un bassin dont la température et la salinité sont parfaitement contrôlées. On compare ensuite avec ce qu'ont enregistré les balises. Cela permet de calculer des coefficients de correction avant que les balises ne soient déployées sur le terrain. Les balises testées ont été récupérées en octobre 2016 à Kerguelen. En fonction des résultats, cela pourrait être une procédure mise en place plus régulièrement comme contrôle des capteurs pour une amélioration de la précision des mesures.

Chapitre IV

Ecologie : Etude comportementale de l'éléphant de mer grâce aux balises

4.1) Introduction

La bioluminescence est un phénomène biologique qui est défini par la production et l'émission de lumière par un organisme vivant. De nombreux organismes sont capables d'en produire : crustacés, poissons, calmars... (Haddock, Moline, et Case 2009). Dans la grande majorité des organismes marins bioluminescents, la plage spectrale de la bioluminescence est centrée sur des longueurs d'onde bleu-vert (470-500nm, (Haddock, Moline, et Case 2009).

La bioluminescence est connue pour avoir trois fonctions :

- Offensive : en créant un leurre par exemple, ce qui va attirer les proies du prédateur. C'est ce qu'utilisent certains calmars (Robison et al. 2003).
- Défensive : en créant un flash les proies peuvent effrayer leurs prédateurs ou en imitant la lumière ambiante pour tenter de devenir « invisible » pour le prédateur (Johnsen, Widder, et Mobley 2004),
- d'appariement qui va permettre à des individus de communiquer entre eux.

Dans tous les cas, les événements de bioluminescence sont détectables par des organismes extérieurs à ceux qui l'émettent. Comme expliqué dans le chapitre II, les éléphants de mer sont connus pour se nourrir de myctophidés (Daneri et Carlini, s. d.). Les myctophidés sont aussi appelés « poissons-lanternes », car ils sont capables de produire de la bioluminescence. Les myctophidés et les éléphants de mer sont capables de voir les lumières bleues. (Lythgoe et Dartnall 1970; Levenson et Schusterman 1997). Au vu des fonctions que peut avoir la bioluminescence chez les myctophidés (appariement par exemple, car il y a un dimorphisme entre les espèces et les sexes), on suppose que les éléphants de mer seraient capables de les détecter (Naito et al. 2013).

L'objectif de ce travail est d'essayer de comprendre si les éléphants de mer peuvent utiliser la bioluminescence pour se diriger vers leurs proies. En effet, (Vacquié-Garcia et al. 2012)) ont déjà montré qu'il existait un lien positif entre le comportement de recherche alimentaire des éléphants de mer et la bioluminescence. Cependant, rien à ce jour n'a encore

montré le sens de cette relation : la bioluminescence peut être une cause ou une conséquence de l'activité de l'éléphant de mer

Un seul capteur de lumière orienté vers l'arrière de l'animal était utilisé dans l'étude de Vacquié-Garcia et al. 2012. Ce travail s'appuie sur les données récoltées sur 11 femelles équipées entre 2012 et 2014 durant la période post-reproduction (voyage de deux mois entre octobre et janvier). Ces femelles ont été équipées de trois capteurs (MK10 accéléromètre, MK9 et MK10 fastloc) disposés d'une manière spécifique de manière à détecter la lumière à l'avant, au-dessus et à l'arrière de l'animal (Illustration 9).

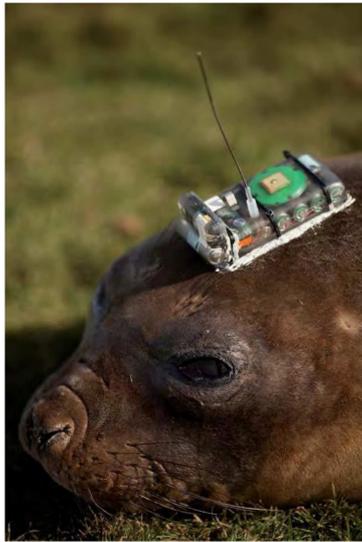


Illustration 9 : Femelle équipée de 3 balises : MK10 accéléromètre devant MK10 fast-loc au milieu et MK9 à l'arrière.

Les évènements de bioluminescence détectés autour des éléphants de mer (i.e par ces 3 balises) seront mis en relation avec le comportement de recherche alimentaire des éléphants de mer.

Plusieurs méthodes permettent aujourd'hui de détecter le comportement de recherche alimentaire des animaux. Cependant, en milieu marin, la certitude de savoir si un individu a vraiment capturé une proie est faible voire nulle.

La théorie de l'approvisionnement optimal explique que lorsqu'un individu va rencontrer un grand nombre de proies, il va augmenter sa sinuosité et diminuer sa vitesse (Cezilly et Benhamou 1996). Cette stratégie est appelée (« stratégie de recherche en zone

restreinte » (ARS, Area Restricted Search). Les changements de vitesse et de sinuosité sont associés à un changement de comportement des individus (Knoppien et Reddingius 1985).

Cette méthode peut être adaptée à des animaux plongeurs tels que les éléphants de mer (Dragon et al. 2012). En utilisant un environnement en trois dimensions, on peut estimer qu'un individu va essayer d'optimiser son temps de transit (vertical ou horizontal) pour consacrer plus de temps à la capture (Y. Ropert-Coudert et al. 2002; Fowler et al. 2006).

Une autre méthode pour détecter l'intensité de l'activité d'alimentation est l'utilisation des accéléromètres. Cette méthode permet de détecter les mouvements de tête d'un individu (Viviant et al. 2009; Gallon et al. 2013) et de cette manière, on peut estimer un nombre de tentatives de capture de proie. Cette méthode est, à l'heure actuelle, la plus précise pour la détection d'événements de tentatives de capture de proie sur les éléphants de mer et c'est celle que nous avons utilisé dans cette étude.

4.2) Méthodologie

Le travail réalisé ici a été effectué sous Matlab (« MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink » 2017).

4.2.1) Correction de la lumière

Chaque femelle de cette étude est équipée de trois balises (MK10 accéléromètre vers l'avant, MK10 Fast loc au milieu et MK9 à l'arrière). Pour pouvoir comparer entre elles les données de lumières récoltées par ces appareils, la première étape est de synchroniser les données. En effet, les balises d'un même individu vont toutes dériver dans le temps et des décalages de quelques secondes peuvent apparaître. Comme nous voulons travailler à l'échelle de la seconde, il faut donc corriger cette dérive.

J'utilise comme référence la balise accéléromètre placée à l'avant. Ensuite, pour chaque plongée, je recale la lumière du MK10 fast-loc et du MK9 en utilisant la profondeur comme unité de comparaison. On utilise des points de références, comme la profondeur maximale de la plongée, pour obtenir la lumière au même instant sur les trois axes. Enfin, en

interpolant linéairement les trois vecteurs de lumière, on obtient la lumière corrigée à un instant t sur 3 axes.

4.2.2) Les localisations

Les données de localisation présentent des erreurs de mesures. Pour les corriger, j'ai développé une fonction qui va filtrer ces données en utilisant la vitesse de déplacement maximum de l'éléphant de mer (Boeuf et al. 1992; Crocker et al. 1994). J'ai donc placé un filtre à 3m/s qui va permettre d'enlever les « spikes » présents sur les trajectoires. Dans le cas de notre étude, les 11 individus avaient la localisation de type GPS, la précision était donc déjà bonne, mais la fonction permet de l'affiner. Cependant, l'utilisation de cette méthode est indispensable dans le cas des localisations Argos.

4.2.3) Délimitation et caractérisation des plongées

La délimitation des plongées se fait en utilisant les données de la balise de référence, à savoir le MK10 accéléromètre. Dans un premier temps, je corrige un problème lié à la dérive du capteur de pression en fonction du temps. On sait que l'individu est obligé de remonter à la surface pour respirer, mais, au cours du temps, le capteur de pression va nous indiquer des profondeurs inférieures (de l'ordre de quelques mètres) aux profondeurs réelles, nous indiquant par exemple que l'animal est remonté respirer à la surface à une profondeur de 5 m au lieu de 0 m. Cette première étape consiste donc à remettre ce niveau à 0. Ensuite, on va détecter le début et la fin de chaque plongée. On considère qu'une plongée commence quand l'animal descend en dessous de 15 mètres et finit quand celui-ci remonte au-dessus. Ce seuil est arbitrairement choisi pour éviter la détection des mouvements de sub-surface comme des plongées (Vacquié-Garcia et al. 2012; Richard et al. 2014). De plus, on ne garde que les plongées qui durent plus de 300 secondes.

Pour chaque plongée, on va détecter chacune de ces phases : surface (profondeur inférieure à 15 m, descente, phase de fond et remontée. Pour cela on utilise la vitesse verticale calculée à chaque seconde de la plongée. Sur cette vitesse, on va faire passer un

polynôme de degré 4 pour la lisser. Les phases de descente et de remontée sont définies par une vitesse verticale lissée supérieure à 0.75 m/s tandis que la phase de fond est définie par une vitesse lissée inférieure à ce seuil. Ce seuil est fixé arbitrairement d'après les plongées d'éléphants de mer.

Chaque plongée est localisée de façon spatio-temporelle. Lorsque la plongée n'est pas directement associée à une localisation, une interpolation linéaire basée sur la date de la plongée et la date des points de localisation est réalisée. Suite à cela, on va associer chaque plongée à un moment de la journée (jour, nuit, aube, crépuscule). En utilisant le package « suncycle » de Matlab qui va nous donner l'angle solaire sur 24 heures en fonction d'une localisation, on définit à quel moment a lieu la plongée. Au-dessus d'un angle de 0° , on est en période de jour, en dessous de -6° , c'est la nuit et entre les deux, l'aube ou le crépuscule selon le moment de la journée.

4.2.4) Calcul des tentatives de capture

Les balises MK10 accéléromètres posées sur les éléphants de mer mesurent l'accélération sur les axes X, Y et Z à une fréquence de 16 Hz. L'axe X va enregistrer l'accélération horizontale, l'axe Y va enregistrer l'accélération latérale (droite-gauche) et l'axe Z va enregistrer l'accélération verticale (haut-bas). L'accélération se décompose en deux types : statique et dynamique. L'accélération statique représente l'accélération du centre de gravité de l'animal par rapport au vecteur gravité ; ce sont les faibles fréquences. L'accélération dynamique représente les mouvements brefs de tête et de queue de l'animal, ce sont les hautes fréquences. L'objectif est de détecter ces accélérations dynamiques, car elles représentent les tentatives de captures de proie.

Dans un premier temps, on va séparer l'accélération statique de la dynamique. On utilise un filtre passe-haut de fréquence 0.33 Hz qu'on fait passer sur les trois axes bruts. De cette manière, on ne garde que l'accélération dynamique (Figure 23).

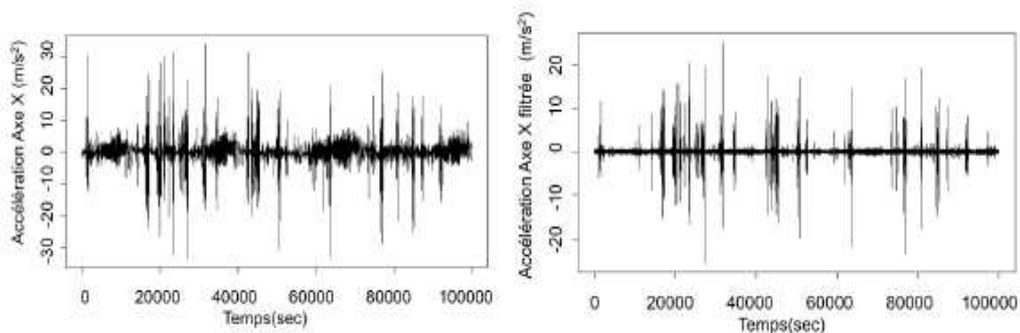


Figure 23 : Filtre de l'axe X d'accélération avec un filtre passe-haut à 0.33Hz. A gauche, les données brutes et à droite, l'accélération dynamique

Dans un deuxième temps, sur chacun des axes filtrés, nous calculons l'écart-type mobile sur 5 secondes. Cela permet de faire un lissage de l'accélération et chaque accélération importante restera toujours visible.

Enfin, nous utilisons la fonction « kmeans » de Matlab sur chacun des axes. Cette fonction va définir un seuil pour détecter les accélérations importantes et classer chaque point soit dans un groupe de faible ou de forte accélération. Elle renvoie une matrice de la taille du vecteur accélération en associant chaque point à un groupe (0 ou 1).

Une tentative de capture est détectée seulement si une accélération est trouvée sur chacun des 3 axes (Figure 24).

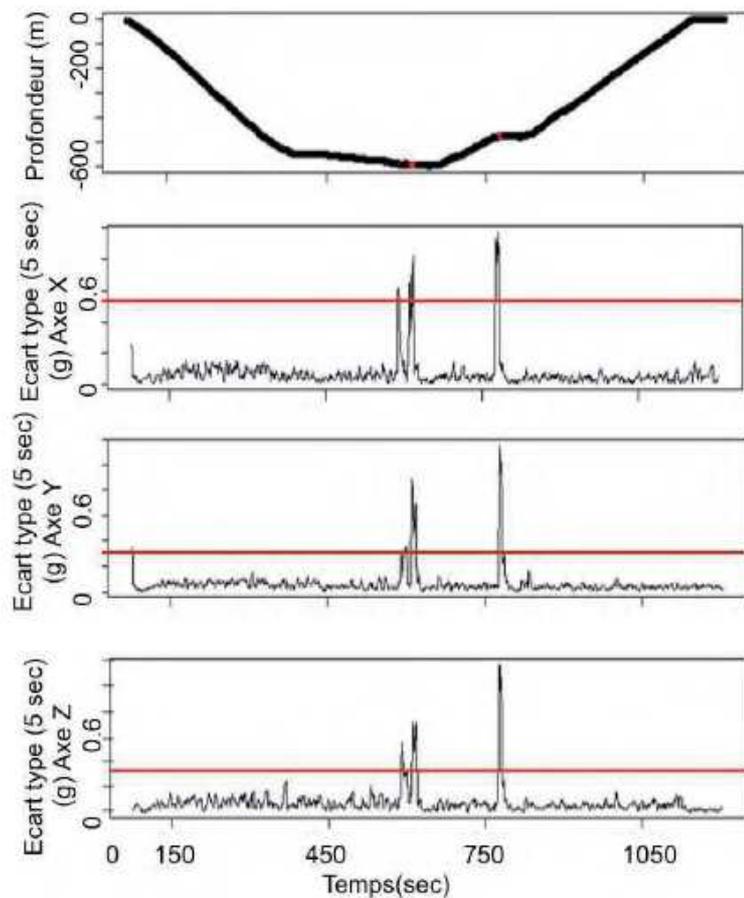


Figure 24 : Détection des tentatives de capture de proie sur les 3 axes. Le premier graphique représente la plongée de l'animal. Les trois suivants représentent les axes X, Y et Z. Les lignes rouges représentent les seuils calculés à l'aide de kmeans.

Chaque tentative de capture est donc datée à la seconde près et peut être localisée en profondeur.

4.2.5) Détection des événements de bioluminescence

Afin de comprendre comment les balises enregistrent la lumière, des tests ont été faits au laboratoire de biologie marine de l'université de Louvain-La-Neuve par Jade Vacquie-Garcia et Jérôme Mallefet en 2013. Ces tests avaient pour objectif de définir la sensibilité spectrale, l'angle de vision, la distance ainsi que la précision de mesure des capteurs de lumière.

En fonction des résultats obtenus lors de ces tests, il a été défini qu'un événement de bioluminescence pouvait être considéré comme une anomalie dans le signal de lumière de

plus de 3 en valeur brute, c'est-à-dire un écart d'intensité de 3 entre la valeur de lumière à l'instant t et à l'instant $t-1$ ou $t-2$. En utilisant ces résultats, la lumière corrigée provenant des 3 balises posées sur chaque éléphant de mer a été traitée. Sous Matlab, grâce à la fonction « findpeacks », tous les pics de lumière corrigée ont d'abord été détectés, puis seuls ceux dont l'intensité est supérieure ou égale à 3 ont été gardés.

Pour être sûr de ne pas détecter des événements dus à la lumière extérieure, une sélection des événements a été réalisée (Vacquié-Garcia et al. 2012). Les événements lumineux n'étaient conservés dans l'analyse que lorsqu'ils dépassaient les seuils de profondeur de 550 mètres de jour et de 250 mètres de nuit (Figure 25).

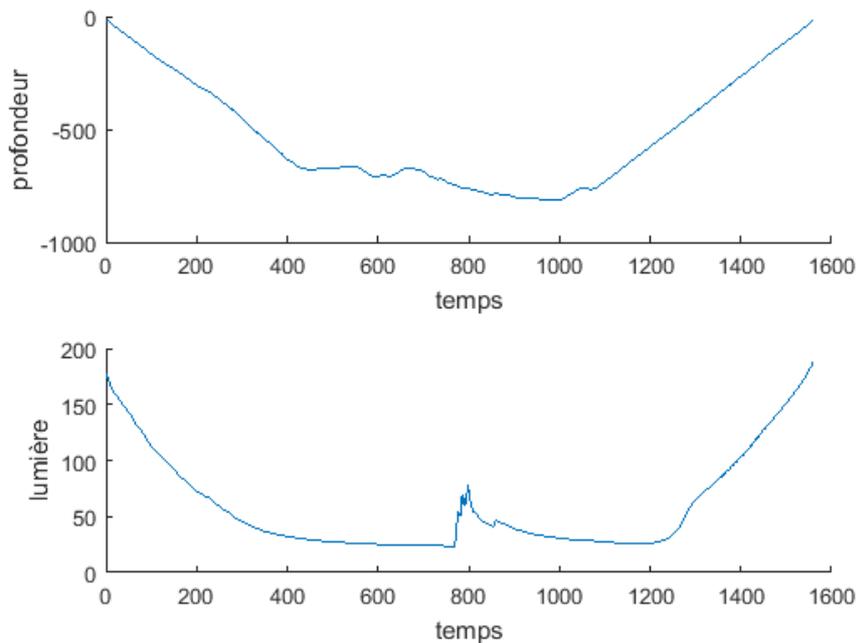


Figure 25 : Exemple de détection d'un événement de bioluminescence. La courbe du haut représente la profondeur à laquelle est l'éléphant de mer au cours du temps, celle du bas la lumière.. On constate un pic de lumière vers 800 mètres.

4.3) Résultats

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus en utilisant 10 des 11 individus de départ. Une des balises n'ayant pas fonctionné sur un éléphant de mer, j'ai choisi de la retirer. Pour le reste, j'ai utilisé une matrice globale sans faire la distinction entre les individus, ce qui représente un peu plus de 6 000 événements de bioluminescence. La répartition de détection sur les différentes orientations (devant, dessus, derrière) comme le montre la Figure 26.

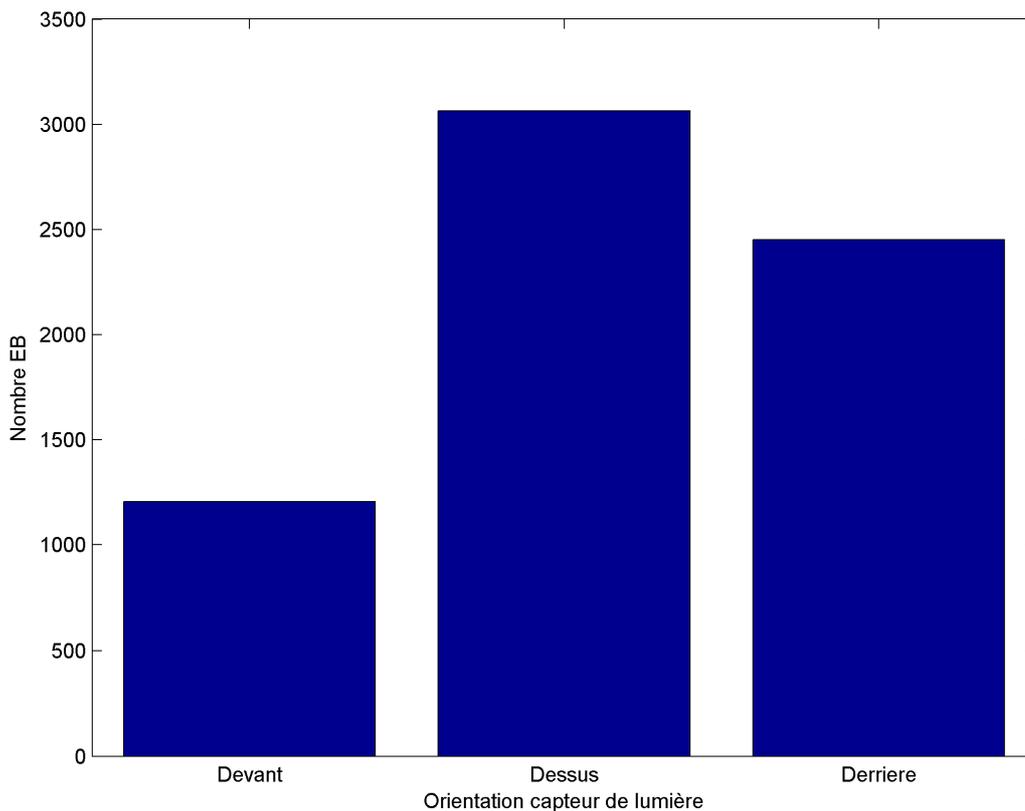


Figure 26 : Répartition des événements de bioluminescence en fonction de l'orientation du capteur.

Dans un premier temps, nous voulions voir si les évènements de bioluminescence étaient détectés par les trois balises, l'objectif étant d'explorer le jeu de données pour orienter la suite de l'étude et mettre en avant la véracité de la détection des événements de bioluminescence. Il est fréquent qu'on détecte un évènement sur les trois capteurs. Ce résultat met en évidence que l'animal traverse probablement des nuages de bioluminescence et à ce stade, rien ne laisse entendre que la bioluminescence serait une cause de l'activité de l'animal (Figure 27).

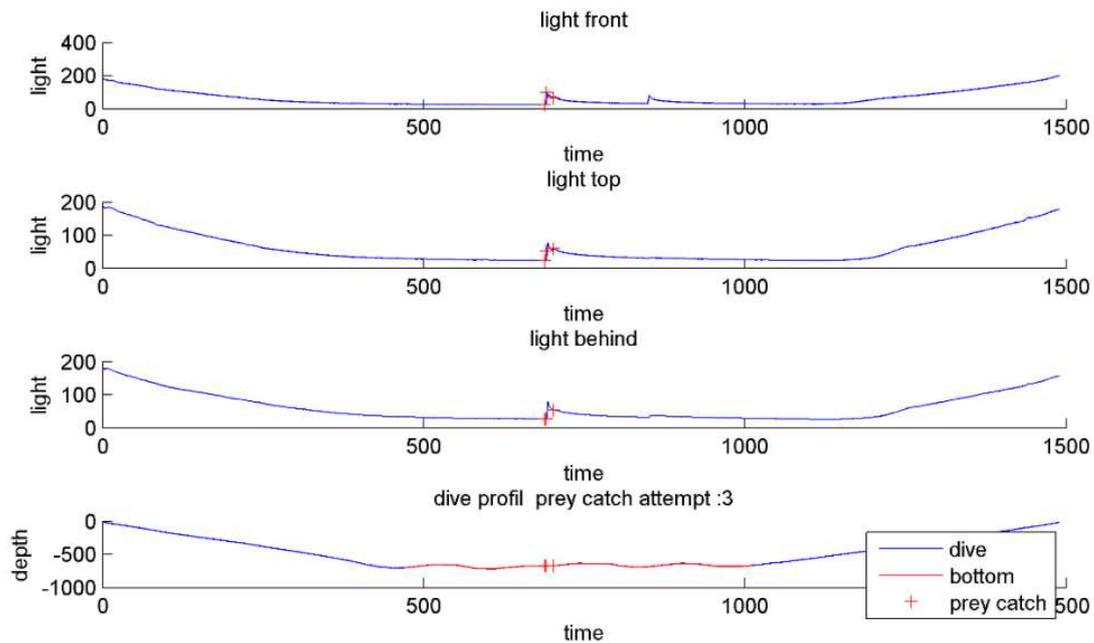


Figure 27 : Détection d'un événement de bioluminescence sur les 3 axes (de haut en bas, devant, dessus, derrière). Sur le dernier graphique, on voit la profondeur avec en rouge la phase de fond de la plongée. Chaque croix rouge représente une tentative de capture de proie.

Dans un deuxième temps, j'ai regardé s'il y avait des événements de tentatives de capture de proie au moment des événements de bioluminescence. Et en effet, on observe un lien entre les deux types d'évènements, surtout avec le capteur orienté vers l'avant. Ceci conforte la relation entre le comportement de recherche alimentaire de l'éléphant de mer et la bioluminescence (Figure 28).

Enfin, j'ai essayé de comprendre ce lien en réalisant un histogramme des écarts temporels (en seconde) entre une tentative de capture de proie et un événement de bioluminescence (Figure 28). On calcule le temps écoulé entre un événement de bioluminescence et la tentative de capture de proie la plus proche. J'observe que l'histogramme est centré sur 0 ce qui veut dire que les deux types d'évènements sont majoritairement simultanés. Au-delà de 10 secondes d'écart, le nombre d'évènements devient pratiquement nul.

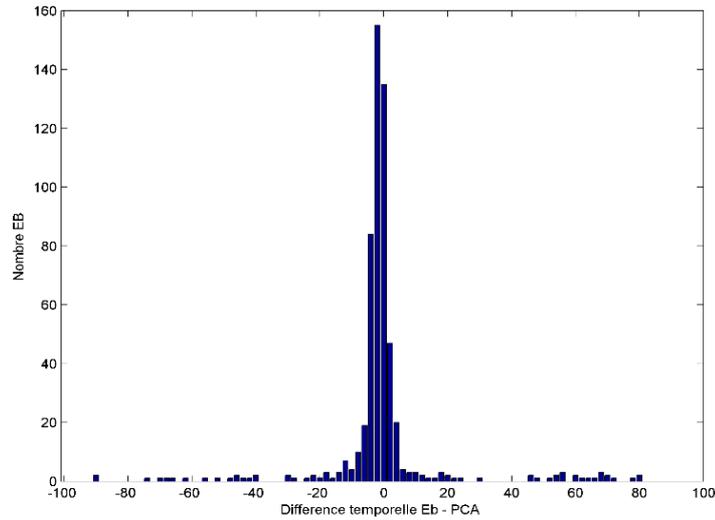


Figure 28 : Répartition des événements de bioluminescence sur le capteur orienté vers l'avant en fonction de la différence temporelle (en seconde) avec les tentatives de capture de proie.

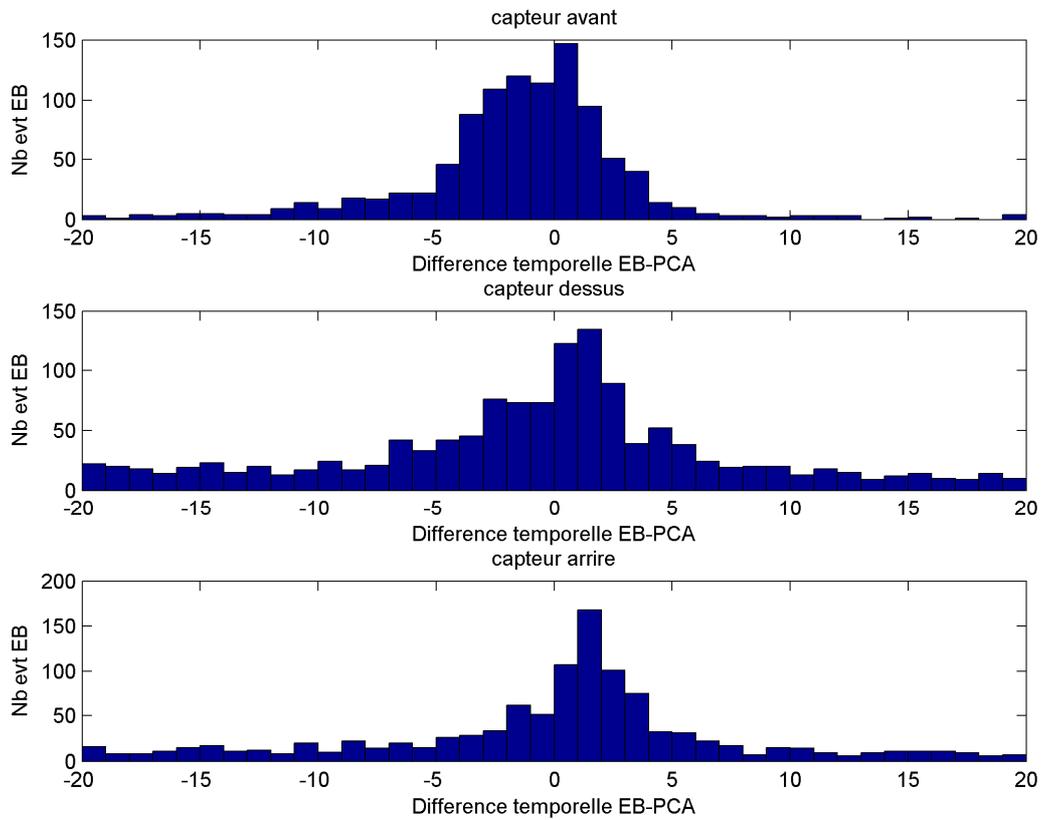


Figure 29 : Répartition du nombre d'événements de bioluminescence en fonction de la différence temporelle avec les tentatives de capture de proie (en seconde).

J'ai fait la même analyse sur les trois axes de lumière (Figure 29) et on observe un décalage selon l'orientation des capteurs. Sur celui orienté vers l'avant, les événements de bioluminescence ont lieu quelques secondes avant une tentative de capture. Tandis que sur les capteurs situés au-dessus et à l'arrière, ils ont lieu quelques secondes après. Ceci conforte l'idée que l'animal se dirige vers la bioluminescence et donc que la bioluminescence pourrait être une cause de son comportement.

La dernière étape a été de vérifier s'il existait une différence d'intensité entre les événements de bioluminescence lorsqu'ils sont plus ou moins près d'une tentative de capture. On s'attendrait à ce que l'intensité lumineuse augmente quand on se rapproche d'une tentative de capture.

Pour cela, j'ai regroupé les événements de bioluminescence détectés sur le capteur avant en fonction de leur écart temporel avec la tentative de capture de proie la plus proche (Figure 30).

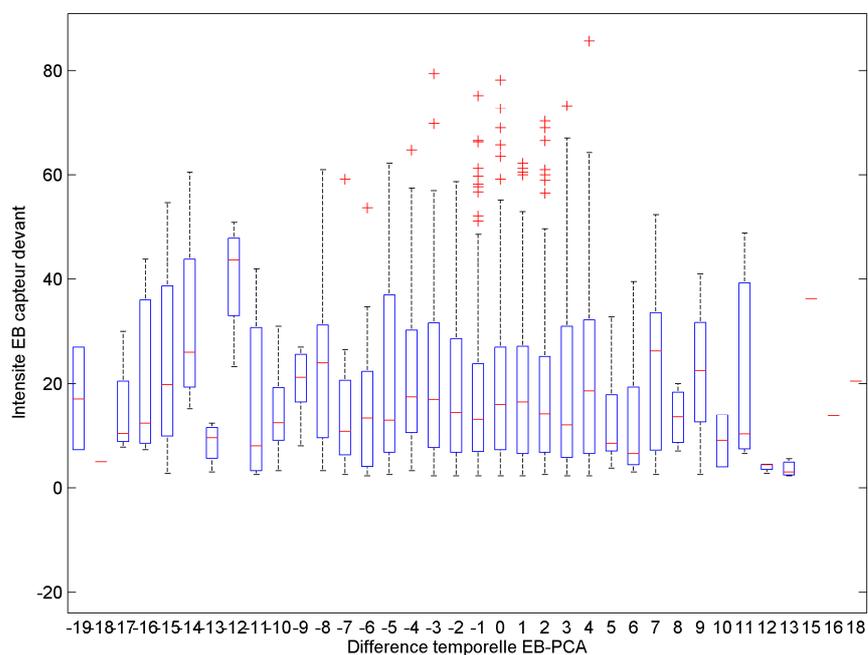


Figure 30 : Box plot représentant l'intensité des événements de bioluminescence en fonction de l'écart temporel en seconde à une tentative de capture.

La figure 30 ne montre pas de différence significative entre les intensités des pulses. On ne peut donc pas lier une intensité d'événement de bioluminescence (« pulse » de lumière) à un événement de capture de proie.

4.4) Discussion

4.4.1) Le capteur de lumière

L'utilisation de trois capteurs de lumière sur les individus a permis de confirmer le lien entre les événements de tentative de capture de proie et ceux de bioluminescence. Les myctophidés ne sont pas les seuls êtres vivants à produire de la lumière et rien ne nous permet d'associer le pulse détecté à un type de proie. Un travail de ce type a été effectué sur les éléphants de mer boréaux (Naito et al. 2013). En déployant des appareils très sensibles capables de prendre des photos dans un environnement sombre sur la tête des individus, les chercheurs ont pu identifier deux myctophidés. De cette manière, on pourrait identifier et qualifier un « pulse » de myctophidé. Cela permettrait d'ajouter un filtre sur les capteurs de lumière pour reconnaître les « pulses » émis par les proies des éléphants de mer. On pourrait ainsi faire la distinction entre les pulses proches d'événement de capture, qui pourraient être émis par les proies, et les pulses plus éloignés, qui pourraient être émis par d'autres êtres vivants.

Il doit aussi être pris en compte que les capteurs de lumière ne détectent rien à plus de trois mètres. Si l'angle de détection a pu être élargi en posant trois balises, la distance ne peut pas être augmentée à l'heure actuelle. Il est probable que les éléphants de mer voient plus loin que ces trois mètres et détectent donc des événements non enregistrés par les capteurs. L'amélioration des capteurs pourrait donc aussi permettre de continuer cette étude. Dans cette optique, une collaboration avec le SMRU pour créer des nouvelles balises avec des capteurs de lumière plus sensible a été mise en place. Les premières balises SMRU possédant ce nouveau type de capteur de lumière ont été déployées prochainement sur des femelles pour être testées.

4.4.2) Comportement des éléphants de mer

L'utilisation de trois capteurs nous a permis de voir que les événements de bioluminescences associés à une capture de proie sont majoritairement détectés par le capteur en direction de l'avant. Ceci semble indiquer que l'éléphant de mer utiliserait la bioluminescence pour détecter ces proies. Cependant, il faut relativiser l'importance de la bioluminescence, car un très grand nombre d'événements de tentative de capture n'est pas relié à un événement de bioluminescence. Ceci peut être dû à la qualité de nos capteurs de lumière que nous utilisons actuellement. En effet, il est hautement probable que les capteurs n'enregistrent pas tous les événements de bioluminescence à cause de la distance ou de l'orientation de l'animal par rapport à la source lumineuse.

Il est possible que les éléphants de mer n'utilisent pas que la bioluminescence pour repérer leurs proies. Ils pourraient aussi utiliser leurs vibrisses comme cela a été montré chez les phoques (Schulte-Pelkum et al. 2007). Cela expliquerait que les tentatives de captures de proies ne sont pas toujours associées à des événements de bioluminescence.

Pour confirmer l'utilisation de la bioluminescence par les individus, il pourrait être intéressant par la suite d'utiliser l'accéléromètre. L'accéléromètre nous a permis de détecter les tentatives de capture, mais il peut aussi nous permettre de reconstruire les trajectoires des individus (Tracey et al. 2014; Adachi et al. 2016). Nous pouvons donc connaître les changements de trajectoire des individus et il serait intéressant de regarder si un changement de trajectoire peut être associé à un pulse de bioluminescence. Même si, à l'heure actuelle, le capteur ne va pas au-delà de trois mètres, si l'animal change de direction lorsqu'un « pulse » est détecté vers l'avant, cela montrerait que les éléphants de mer s'aident de la bioluminescence pour détecter leur proie.

L'accéléromètre nous permet aussi de calculer l'effort de nage des individus (Richard et al. 2014), il pourrait donc être intéressant d'associer l'effort produit par les éléphants lors des pulses de bioluminescence. L'hypothèse étant qu'un individu produit un effort plus important lorsqu'il repère un événement pour se diriger dessus, ce qui pourrait être associé à un comportement de chasse.

L'utilisation de la lumière pour les événements de bioluminescence en est encore à ses débuts et cette étude s'est inscrite dans la suite du travail de thèse de Jade Vacquié-

Garcia (Vacquié Garcia 2014). Cela a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation de la lumière pour continuer à développer les capteurs en les combinant avec les tentatives de capture de proie. Une publication est en cours (Annexe 9 : Marine bioluminescence: record by a light-sensor and related foraging behaviour of a diving predator.

V) Conclusion générale

4.1) Synthèse des résultats

4.1.1) Rappel des objectifs

Les balises posées sur les éléphants de mer fournissent un jeu de données important qui va nous permettre d'apporter des connaissances aussi bien en océanographie, grâce aux données environnementales, qu'en écologie, grâce aux données comportementales.

Dans ce contexte, l'objectif de mon travail a été de faire en sorte que ces données soit « propres » et facilement utilisables. Pour obtenir ce jeu de donnée optimal, il est nécessaire de comprendre les enjeux et les objectifs des recherches menées par la suite. C'est pourquoi il fallait donc comprendre comment se comportent les éléphants de mer en plongée, et comment ils interagissent avec leur environnement pour savoir quelles informations extraire à partir des données brutes.

Dans la deuxième partie, l'objectif était d'utiliser ces données pour faire le lien entre les événements de bioluminescence détectés par les capteurs de lumière et le comportement des éléphants de mer. Les questions auxquelles j'ai essayé de répondre sont les suivantes :

1. Est-on certain que les événements de bioluminescence détectés par les capteurs ne sont pas des artefacts ?
2. Est-ce que les tentatives de capture sont liées aux événements de bioluminescence ?
3. Si oui, la bioluminescence est-elle une conséquence ou une cause des tentatives de capture ?
4. Peut-on caractériser les événements de bioluminescence en fonction de leur intensité ?

4.1.2) Mise en place d'une routine de correction des données environnementales

Pour corriger les données environnementales récoltées par les balises et les distribuer aux utilisateurs rapidement, une routine sous Matlab a été développée. Cette routine utilise les connaissances sur les océans pour corriger les données de température et de salinité et signaler des profils aberrants. De plus, elle permet de proposer les données dans un format standardisé, ce qui assure une stabilité et une facilité d'utilisation.

A l'heure actuelle, 10 pays se sont associés pour fournir un jeu de données contenant plus de 500 000 profils océanographiques provenant de plus de 1200 balises. A cela, il faut rajouter le jeu de données haute résolution fourni par notre équipe qui contient plus de 285 000 profils de température et de lumière provenant de plus de 70 balises. Toutes ces données sont calibrées et téléchargeables depuis le site internet MEOP : <http://www.meop.net/database/data-access.html>.

4.1.3) La bioluminescence

La bioluminescence est un phénomène très fréquent dans l'environnement marin, et, grâce à l'utilisation de capteurs de lumière fixés sur le crâne des éléphants de mer, nous avons pu la mesurer pour tenter de la relier au comportement de l'animal. La pose simultanée de 3 capteurs de lumières sur des femelles a confirmé que les événements de bioluminescence détectés par les capteurs étaient bien réels puisqu'ils étaient souvent détectés par les 3 capteurs en même temps.

Nous avons pu mettre en évidence que les tentatives de captures sont fortement liées aux pulses de bioluminescence. En calculant le décalage temporel qu'il existe entre une tentative de capture et un pulse sur les trois capteurs de lumière, on a pu montrer que les pulses sont souvent identifiés quelques secondes avant la tentative sur le capteur orienté vers l'avant, alors qu'ils sont identifiés après la tentative pour les capteurs orientés au-dessus et à l'arrière. Ceci suggère que la bioluminescence serait une cause des événements de tentative de capture.

Cependant, il n'a pas été possible d'identifier, ni de caractériser un « pulse » qui serait associé à un événement de tentative de capture d'une proie. On ne peut donc pas relier l'intensité d'un pulse à une proie des éléphants de mer.

4.2) Perspective

4.2.1) Le projet MEOP

Le projet MEOP a abouti à la création d'un jeu de données calibrées qui couvre une grande partie des océans en enregistrant plusieurs paramètres environnementaux. Il est en évolution permanente et un travail d'intégration de nouvelles données doit être fait de manière continue. Une des premières perspectives serait de pouvoir automatiser l'intégration des nouvelles données enregistrées par les balises. En collaboration avec le SMRU, les données pourraient être téléchargées pour ensuite être calibrées et intégrées à la base de données. Il s'agit donc d'améliorer la routine en matière de programmation pour minimiser le temps à investir pour intégrer les données afin d'assurer une pérennité du projet dans le temps.

Pour l'instant, les données calibrées sont la température et la salinité, mais les balises enregistrent également la lumière, la fluorescence et l'oxygène... Ces paramètres peuvent aussi être calibrés et des méthodes sont déjà utilisées, par exemple avec la lumière et la fluorescence (Green et Blough 1994; Guinet et al. 2013; Biermann et al. 2015). Pareillement à la méthode développée par Roquet et al. (2014) qui a été intégrée dans cette routine, ces méthodes sur les autres variables devront être intégrées afin de fournir un jeu de données le plus complet et propre possible.

Le développement des technologies d'enregistrement nous permet aujourd'hui d'avoir accès à des capteurs « haute résolution ». En plus de fournir des données à un intervalle de temps plus faible, cela va nous permettre de mettre en évidence des erreurs dues à la transmission des profils via Argos. Grâce à cela, nous pourrions donc identifier d'anciens profils ayant des erreurs, mais aussi améliorer la technologie d'acquisition qui servira pour les futures balises.

De manière générale, ce projet doit suivre les avancées technologiques du bio-logging afin de les intégrer, de façon à pouvoir les améliorer par la suite. Il ne faut cependant pas oublier l'objectif premier qui est de servir de plateforme de centralisation et de distribution d'un jeu de données calibré.

4.2.2) Bioluminescence et comportement de nage

Grâce aux 11 femelles équipées simultanément de 3 capteurs de lumière, on sait que l'on peut utiliser les « pulses » de bioluminescence détectés vers l'avant pour les associés aux tentatives de captures. Nous allons donc pouvoir utiliser un jeu de données beaucoup plus important, car il y a plus de 40 femelles qui ont été équipées avec un capteur orienté vers l'avant.

En utilisant l'accéléromètre, en plus d'utiliser les tentatives de captures, on pourrait associer l'effort de nage (Richard et al. 2014) et les changements de cap. J'ai commencé ce travail en associant le « pitch » (rotation de l'animal sur l'axe Y) et le « roll » (rotation de l'animal sur l'axe X) à chaque événement de bioluminescence (Figure 31).

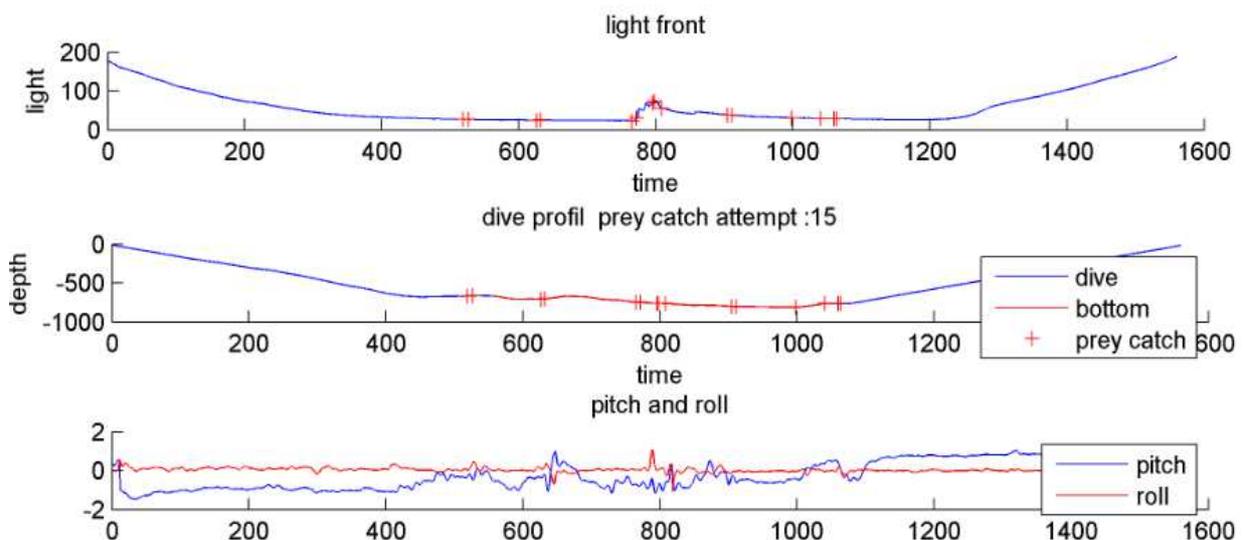


Figure 31 : Calcul du « pitch » et du « roll » (3e graphique) au moment des événements de bioluminescence (1er graphique). Le deuxième graphique représente la plongée avec sa phase de fond (en rouge).

Le « pitch » et le « roll » vont nous permettre d'identifier les changements de cap (Mitani et al. 2010; Sala et al. 2011). En calculant un changement de cap en fonction des pulses de bioluminescence, on pourrait identifier un comportement de plongée chez les éléphants de mer qui montrerait l'utilisation de la bioluminescence chez ces animaux. Ce travail pourra être mis en relation avec celui effectué par Yves Le Bras durant sa thèse sur le comportement à fine échelle de plongées des éléphants de mer (Le Bras et al. 2016) (Annexe 10).

4.3) Bilan

Ces deux années de travail m'ont permis de suivre tout le processus d'utilisation des données récoltées grâce aux éléphants de mer, de la pose des balises sur les animaux à Kerguelen jusqu'à l'analyse des données récoltées en passant par leur correction. Cela m'a permis d'acquérir des compétences et des connaissances dans différents domaines (écologie et océanographie) de pouvoir faire le lien avec celles acquises lors de mes études précédentes en informatique.

Le fait d'avoir pu travailler sur chaque étape du processus est un vrai plus, car cela permet de comprendre les attentes dans chacun des domaines et de pouvoir apporter une réelle plus-value dans mon travail par la suite. Cela va me permettre de continuer les collaborations avec Fabien Roquet concernant le développement du projet MEOP, mais aussi avec Jade Vacquié-Garcia pour poursuivre les analyses sur la bioluminescence.

VI) Bibliographie

- ARGOS, C. L. S. User's manual, Manual de l'utilisateur. *Argos, Toulouse*, 1996.
- Adachi, Taiki, Daniel P. Costa, Patrick W. Robinson, Sarah H. Peterson, Masato Yamamichi, Yasuhiko Naito, et Akinori Takahashi. 2016. « Searching for Prey in a Three-Dimensional Environment: Hierarchical Movements Enhance Foraging Success in Northern Elephant Seals ». *Functional Ecology*, mai. doi:10.1111/1365-2435.12686.
- Authier, Matthieu, Anne-Cécile Dragon, Pierre Richard, Yves Cherel, et Christophe Guinet. 2012. « O' Mother Where Wert Thou? Maternal Strategies in the Southern Elephant Seal: A Stable Isotope Investigation ». *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 279 (1738): 2681-90. doi:10.1098/rspb.2012.0199.
- Bailleul, Frédéric, Matthieu Authier, Simon Ducatez, Fabien Roquet, Jean-Benoît Charrassin, Yves Cherel, et Christophe Guinet. 2010. « Looking at the Unseen: Combining Animal Bio-Logging and Stable Isotopes to Reveal a Shift in the Ecological Niche of a Deep Diving Predator ». *Ecography* 33 (4): 709-19. doi:10.1111/j.1600-0587.2009.06034.x.
- Bailleul, Frederic, Cédric Cotté, et Christophe Guinet. 2010. « Mesoscale eddies as foraging area of a deep-diving predator, the southern elephant seal ». *Marine Ecology Progress Series* 408 (juin): 251-64. doi:10.3354/meps08560.
- Bailleul, Frederic, Jade Vacquie-Garcia, et Christophe Guinet. 2015a. « Dissolved Oxygen Sensor in Animal-Borne Instruments: An Innovation for Monitoring the Health of Oceans and Investigating the Functioning of Marine Ecosystems ». *PLOS ONE* 10 (7): e0132681. doi:10.1371/journal.pone.0132681.
- . 2015b. « Dissolved Oxygen Sensor in Animal-Borne Instruments: An Innovation for Monitoring the Health of Oceans and Investigating the Functioning of Marine Ecosystems ». *PLoS ONE* 10 (7): e0132681. doi:10.1371/journal.pone.0132681.
- Belkin, Igor M., et Arnold L. Gordon. 1996. « Southern Ocean Fronts from the Greenwich Meridian to Tasmania ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101 (C2): 3675-96. doi:10.1029/95JC02750.
- Benson, Bruce B., et Daniel Krause. 1984. « The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere ». *Limnology and oceanography* 29 (3): 620-32.
- Biermann, Lauren, Christophe Guinet, Marthan Nieuwoudt Bester, A. Brierley, et Lars Boehme. 2015. « An alternative method for correcting fluorescence quenching ».
- Bock, Gee-Woo, Robert W. Zmud, Young-Gul Kim, et Jae-Nam Lee. 2005. « Behavioral intention formation in knowledge sharing: Examining the roles of extrinsic motivators, social-psychological forces, and organizational climate ». *MIS quarterly*, 87-111.
- Boehlert, George W., Daniel P. Costa, Daniel E. Crocker, Phaedra Green, Todd O'Brien, Syd Levitus, et Burney J. Le Boeuf. 2001. « Autonomous Pinniped Environmental Samplers: Using Instrumented Animals as Oceanographic Data Collectors ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18 (11): 1882-93. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<1882:APESUI>2.0.CO;2.
- Boehme, L., P. Lovell, M. Biuw, F. Roquet, J. Nicholson, S. E. Thorpe, M. P. Meredith, et M. Fedak. 2009. « Technical Note: Animal-borne CTD-Satellite Relay Data Loggers for real-time oceanographic data collection ». *Ocean Sci.* 5 (4): 685-95. doi:10.5194/os-5-685-2009.
- Boeuf, Burney J. Le, Yasuhiko Naito, Tomohiro Asaga, Daniel Crocker, et Daniel P. Costa. 1992. « Swim Speed in a Female Northern Elephant Seal: Metabolic and Foraging Implications ». *Canadian Journal of Zoology* 70 (4): 786-95. doi:10.1139/z92-111.
- Boyd, Ian L., Akiko Kato, et Yan Ropert-Coudert. 2004. « Bio-logging science: sensing beyond the boundaries ». *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special issue* 58: 1-14.
- Bras, Yves Le, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, et Christophe Guinet. 2016. « How Elephant Seals (*Mirounga leonina*) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate ». *PLOS ONE* 11 (12): e0167226. doi:10.1371/journal.pone.0167226.

- Case, J. F., J. Warner, A. T. Barnes, et M. Lowenstine. 1977. « Bioluminescence of Lantern Fish (Myctophidae) in Response to Changes in Light Intensity ». *Nature* 265 (5590): 179-81. doi:10.1038/265179a0.
- Cezilly, F., et S. Benhamou. 1996. « Optimal foraging strategies: a review ». *Revue D Ecologie-La Terre Et La Vie* 51 (1): 43-86.
- Chaigne, Adrien, Matthieu Authier, Pierre Richard, Yves Cherel, et Christophe Guinet. 2013. « Shift in Foraging Grounds and Diet Broadening during Ontogeny in Southern Elephant Seals from Kerguelen Islands ». *Marine Biology* 160 (4): 977-86. doi:10.1007/s00227-012-2149-5.
- Chambault, Philippine, Benoît de Thoisy, Karine Heerah, Anna Conchon, Sébastien Barrioz, Virginie Dos Reis, Rachel Berzins, et al. 2016. « The Influence of Oceanographic Features on the Foraging Behavior of the Olive Ridley Sea Turtle *Lepidochelys olivacea* along the Guiana Coast ». *Progress in Oceanography* 142 (mars): 58-71. doi:10.1016/j.pocean.2016.01.006.
- Charrassin, J. B., F. Roquet, Y. H. Park, F. Bailleul, C. Guinet, M. Meredith, K. Nicholls, et al. 2010. « New insights into Southern Ocean physical and biological processes revealed by instrumented elephant seals ». *Proceedings of OceanObs 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison D.E. & Stammer, D., Eds., ESA Publication WPP-306*. <http://epic.awi.de/21346/>.
- Cook, James. 1842. *The Voyages of Captain James Cook*. Vol. 2. William Smith.
- Crocker, Daniel E., Burney J. Le Boeuf, Yasuhiko Naito, Tomohiro Asaga, et Daniel P. Costa. 1994. « Swim speed and dive function in a female northern elephant seal ». *Elephant seals: Population ecology, behavior, and physiology*, 328-42.
- Daneri, G., et A. Carlini. s. d. « Fish Prey of Southern Elephant Seals, *Mirounga leonina*, at King George Island ». *Polar Biology* 25 (10): 739-43. doi:10.1007/s00300-002-0408-5.
- Deacon, George Edward Raven. 1937. *The hydrology of the Southern Ocean*. Cambridge University Press.
- Dobricic. 2010. « Impact of data assimilation of glider observations in the Ionian Sea (Eastern Mediterranean) ». *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 50: 78-92. doi:10.1016/j.dynatmoce.2010.01.001.
- Dragon, Anne-Cécile, Avner Bar-Hen, Pascal P. Monestiez, et Christophe Guinet. 2012. « Horizontal and vertical movements as predictors of foraging success in a marine predator ». *Marine Ecology Progress Series* 447: 243-57. doi:10.3354/meps09498.
- Durand, Fabien, et Gilles Reverdin. 2005. « A Statistical Method for Correcting Salinity Observations from Autonomous Profiling Floats: An ARGO Perspective ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22 (3): 292-301. doi:10.1175/JTECH1693.1.
- Eckert, Scott A., David W. Nellis, Karen L. Eckert, et Gerald L. Kooyman. 1986. « Diving Patterns of Two Leatherback Sea Turtles (*Dermochelys coriacea*) during Internesting Intervals at Sandy Point, St. Croix, U.S. Virgin Islands ». *Herpetologica* 42 (3): 381-88.
- Fedak, Mike. 2004. « Marine animals as platforms for oceanographic sampling: a ». *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special issue* 58 (mars): 133-47.
- Fedak, Mike, Phil Lovell, Bernie McConnell, et Colin Hunter. 2002. « Overcoming the Constraints of Long Range Radio Telemetry from Animals: Getting More Useful Data from Smaller Packages ». *Integrative and Comparative Biology* 42 (1): 3-10. doi:10.1093/icb/42.1.3.
- Fowler, Shannon L., Daniel P. Costa, John P. Y. Arnould, Nicholas J. Gales, et Carey E. Kuhn. 2006. « Ontogeny of Diving Behaviour in the Australian Sea Lion: Trials of Adolescence in a Late Bloomer: Ontogeny of Diving in Australian Sea Lions ». *Journal of Animal Ecology* 75 (2): 358-67. doi:10.1111/j.1365-2656.2006.01055.x.
- Gallon, S., F. Bailleul, J. -B. Charrassin, C. Guinet, C. -A. Bost, Y. Handrich, et M. Hindell. 2013. « Identifying foraging events in deep diving southern elephant seals, *Mirounga leonina*, using acceleration data loggers ». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Fourth International Symposium on Bio-logging Science, 88-89 (avril): 14-22. doi:10.1016/j.dsr2.2012.09.002.

- Gargett, Ann, et Teresa Garner. 2008. « Determining Thorpe Scales from Ship-Lowered CTD Density Profiles ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (9): 1657-70. doi:10.1175/2008JTECHO541.1.
- Gjøsaeter, J., et K. Kawaguchi. 1980. *A Review of the World Resources of Mesopelagic Fish*. Food & Agriculture Org.
- Green, Sarah A., et Neil V. Blough. 1994. « Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters ». *Limnology and Oceanography* 39 (8): 1903-16.
- Guinet, C., P. Jouventin, et H. Weimerskirch. 1992. « Population Changes, Movements of Southern Elephant Seals on Crozet and Kerguelen Archipelagos in the Last Decades ». *Polar Biology* 12 (3-4): 349-56. doi:10.1007/BF00243106.
- Guinet, C., J. Vacqu  -Garcia, B. Picard, G. Bessigneul, Y. Lebras, Ac. Dragon, M. Viviant, Jpy. Arnould, et F. Bailleul. 2014. « Southern Elephant Seal Foraging Success in Relation to Temperature and Light Conditions: Insight into Prey Distribution ». *Marine Ecology Progress Series* 499 (mars): 285-301. doi:10.3354/meps10660.
- Guinet, C., X. Xing, E. Walker, P. Monestiez, S. Marchand, B. Picard, T. Jaud, et al. 2013. « Calibration Procedures and First Dataset of Southern Ocean Chlorophyll *a* Profiles Collected by Elephant Seals Equipped with a Newly Developed CTD-Fluorescence Tags ». *Earth System Science Data* 5 (1): 15-29. doi:10.5194/essd-5-15-2013.
- Haddock, Steven H. D., Mark A. Moline, et James F. Case. 2009. « Bioluminescence in the Sea ». Review-article. <http://Dx.doi.org/10.1146/Annurev-Marine-120308-081028>. d  cembre 14. <http://www.annualreviews.org/eprint/pbWcm4DyqvQGJ7F2qGkc/full/10.1146/annurev-marine-120308-081028>.
- Hendriks, Paul. 1999. « Why share knowledge? The influence of ICT on the motivation for knowledge sharing ». *Knowledge and process management* 6 (2): 91.
- Hindell, Mark A., Clive R. McMahon, Marth  n N. Bester, Lars Boehme, Daniel Costa, Mike A. Fedak, Christophe Guinet, Laura Herraiz-Borreguero, Robert G. Harcourt, et Luis Huckstadt. 2016. « Circumpolar habitat use in the southern elephant seal: implications for foraging success and population trajectories ». *Ecosphere* 7 (5).
- Hulley, P. Alexander. 1998. « Preliminary Investigations on the Evolution of the Tribe Electronini (Myctophiformes, Myctophidae) ». In *Fishes of Antarctica*, 75-85. Springer Milan. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-88-470-2157-0_6.
- Johnsen, S  nke, Edith A. Widder, et Curtis D. Mobley. 2004. « Propagation and Perception of Bioluminescence: Factors Affecting Counterillumination as a Cryptic Strategy ». *The Biological Bulletin* 207 (1): 1-16.
- Knoppien, P., et J. Reddingius. 1985. « Predators with Two Modes of Searching: A Mathematical Model ». *Journal of Theoretical Biology* 114 (2): 273-301. doi:10.1016/S0022-5193(85)80107-7.
- Kooyman, Gerald L. 1965. « Techniques used in measuring diving capacities of Weddell Seals ». *Polar Record* 12 (79): 391-394. doi:10.1017/S003224740005484X.
- Laws, Richard M. 1985. « The ecology of the Southern Ocean ». *American Scientist* 73: 26-40.
- Leboeuf, B. J., D. P. Costa, A. C. Huntley, G. L. Kooyman, et R. W. Davis. 1986. « Pattern and Depth of Dives in Northern Elephant Seals, *Mirounga angustirostris* ». *Journal of Zoology* 208 (1): 1-7. doi:10.1111/j.1469-7998.1986.tb04705.x.
- Levenson, David Hendrik, et Ronald J. Schusterman. 1997. « Pupillometry in seals and sea lions: ecological implications ». *Canadian Journal of Zoology* 75 (12): 2050-57. doi:10.1139/z97-838.
- Lewis, E. 1980. « The practical salinity scale 1978 and its antecedents ». *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 5 (1): 3-8. doi:10.1109/JOE.1980.1145448.
- Lydersen, Christian, Ole Anders N  st, Phil Lovell, Bernie J. McConnell, Tor Gammelsr  d, Colin Hunter, Michael A. Fedak, et Kit M. Kovacs. 2002. « Salinity and Temperature Structure of a Freezing

- Arctic Fjord—monitored by White Whales (*Delphinapterus leucas*) ». *Geophysical Research Letters* 29 (23): 2119. doi:10.1029/2002GL015462.
- Lythgoe, J. N., et H. J. A. Dartnall. 1970. « A “Deep Sea Rhodopsin” in a Mammal ». *Nature* 227 (5261): 955-56. doi:10.1038/227955a0.
- « Marine-Mammals NetCDF Formats and Conventions ». 2014, décembre. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00255/36622/>.
- Martin, Céline, Ilham Bentaleb, Stéphanie Steelandt, et Christophe Guinet. 2011. « Stable carbon and nitrogen isotope variations in canine dentine growth layers of Kerguelen southern elephant seals ». *Marine Ecology Progress Series* 439 (octobre): 295-305. doi:10.3354/meps09331.
- « MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink ». 2017. Consulté le février 1. <https://fr.mathworks.com/>.
- McIntyre, T., P. J. N. de Bruyn, I. J. Ansorge, M. N. Bester, H. Bornemann, J. Plötz, et C. A. Tosh. 2010. « A Lifetime at Depth: Vertical Distribution of Southern Elephant Seals in the Water Column ». *Polar Biology* 33 (8): 1037-48. doi:10.1007/s00300-010-0782-3.
- McMahon, Clive R., Marthan N. Bester, Harry R. Burton, Mark A. Hindell, et Corey J. A. Bradshaw. 2005. « Population Status, Trends and a Re-Examination of the Hypotheses Explaining the Recent Declines of the Southern Elephant Seal *Mirounga leonina* ». *Mammal Review* 35 (1): 82-100. doi:10.1111/j.1365-2907.2005.00055.x.
- McMahon, Cr, Ma Hindell, Hr Burton, et Mn Bester. 2005. « Comparison of Southern Elephant Seal Populations, and Observations of a Population on a Demographic Knife-Edge ». *Marine Ecology Progress Series* 288: 273-83. doi:10.3354/meps288273.
- Mensah, Vigan, Sen Jan, Ming-Huei Chang, et Yiing-Jang Yang. 2015. « Intraseasonal to Seasonal Variability of the Intermediate Waters along the Kuroshio Path East of Taiwan: KUROSHIO INTERMEDIATE WATERS VARIABILITY ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120 (8): 5473-89. doi:10.1002/2015JC010768.
- Mensah, Vigan, Sen Jan, Ming-Da Chiou, Tien Hsia Kuo, et Ren-Chieh Lien. 2014. « Evolution of the Kuroshio Tropical Water from the Luzon Strait to the East of Taiwan ». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 86 (avril): 68-81. doi:10.1016/j.dsr.2014.01.005.
- Meredith, Michael P., Keith W. Nicholls, Ian A. Renfrew, Lars Boehme, Martin Biuw, et Mike Fedak. 2011. « Seasonal evolution of the upper-ocean adjacent to the South Orkney Islands, Southern Ocean: Results from a “lazy biological mooring” ». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 58 (13-16): 1569-79. doi:10.1016/j.dsr2.2009.07.008.
- Millard, R., J. Toole, et M. Swartz. 1980. « A Fast Responding Temperature Measurement System for CTD Applications ». *Ocean Engineering* 7 (3): 413-27. doi:10.1016/0029-8018(80)90007-4.
- Mitani, Y., R. D. Andrews, K. Sato, A. Kato, Y. Naito, et D. P. Costa. 2010. « Three-Dimensional Resting Behaviour of Northern Elephant Seals: Drifting like a Falling Leaf ». *Biology Letters* 6 (2): 163-66. doi:10.1098/rsbl.2009.0719.
- Morgan, P., et L. Pender. s. d. « CSIRO Marine Research MATLAB Seawater Software Library (2006) ». <http://www.csiro.au/marine-research/matlab-seawater-software-library>.
- Morison, James, Roger Andersen, Nordeen Larson, Eric D’Asaro, et Tim Boyd. 1994. « The Correction for Thermal-Lag Effects in Sea-Bird CTD Data ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 11 (4): 1151-64. doi:10.1175/1520-0426(1994)011<1151:TCFTLE>2.0.CO;2.
- Naito, Yasuhiko, Daniel P. Costa, Taiki Adachi, Patrick W. Robinson, Melinda Fowler, et Akinori Takahashi. 2013. « Unravelling the Mysteries of a Mesopelagic Diet: A Large Apex Predator Specializes on Small Prey ». *Functional Ecology* 27 (3): 710-17. doi:10.1111/1365-2435.12083.
- Nowlin, Worth D., et John M. Klinck. 1986. « The Physics of the Antarctic Circumpolar Current ». *Reviews of Geophysics* 24 (3): 469-91. doi:10.1029/RG024i003p00469.
- Orsi, Alejandro H., Thomas Whitworth, et Worth D. Nowlin. 1995. « On the Meridional Extent and Fronts of the Antarctic Circumpolar Current ». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 42 (5): 641-73. doi:10.1016/0967-0637(95)00021-W.

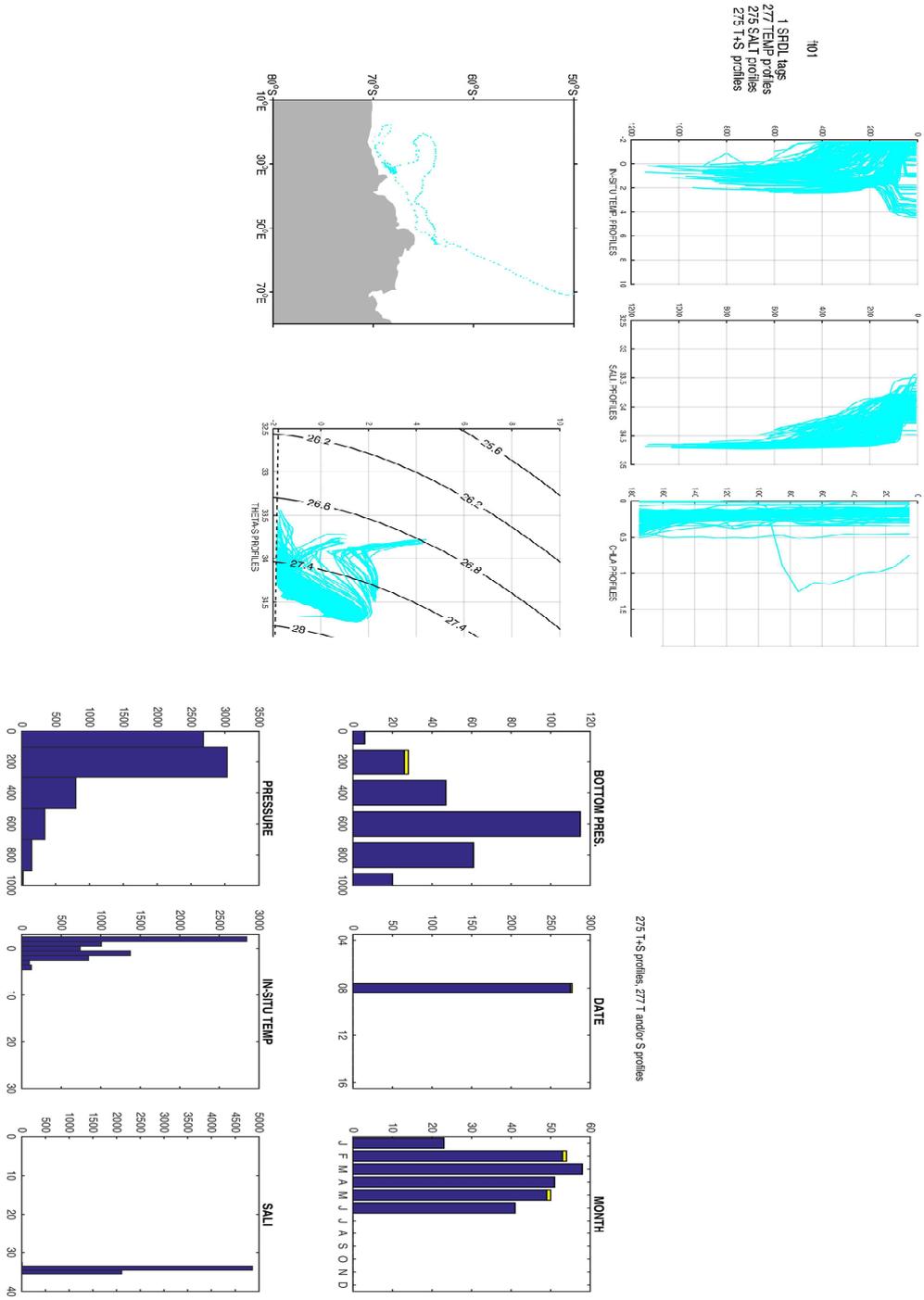
- Park, Young-Hyang, Fabien Roquet, Isabelle Durand, et Jean-Luc Fuda. 2008. « Large-scale circulation over and around the Northern Kerguelen Plateau ». *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55 (5–7): 566–81. doi:10.1016/j.dsr2.2007.12.030.
- Park, Young-Hyang, Frédéric Vivier, Fabien Roquet, et Elodie Kestenare. 2009. « Direct Observations of the ACC Transport across the Kerguelen Plateau ». *Geophysical Research Letters* 36 (18). doi:10.1029/2009GL039617.
- Pawlowicz, Rich. 2000. « M_Map: A mapping package for Matlab ». *University of British Columbia Earth and Ocean Sciences*. [Online]. Available: <http://www.eos.ubc.ca/rich/map.html>.
- Poisson, A. 1980. « Conductivity/salinity/temperature relationship of diluted and concentrated standard seawater ». *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 5 (1): 41–50. doi:10.1109/JOE.1980.1145442.
- Reverdin, G., S. Morisset, J. Boutin, et N. Martin. 2012. « Rain-Induced Variability of near Sea-Surface T and S from Drifter Data ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117 (C2): C02032. doi:10.1029/2011JC007549.
- Richard, Gaëtan, Jade Vacquie-Garcia, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, Alexandre Génin, John P. Y. Arnould, Frédéric Bailleul, et Christophe Guinet. 2014. « Variation in Body Condition during the Post-Moult Foraging Trip of Southern Elephant Seals and Its Consequences on Diving Behaviour ». *The Journal of Experimental Biology* 217 (14): 2609–19. doi:10.1242/jeb.088542.
- Robison, Bruce H., Kim R. Reisenbichler, James C. Hunt, et Steven H. D. Haddock. 2003. « Light Production by the Arm Tips of the Deep-Sea Cephalopod *Vampyroteuthis Infernalis* ». *The Biological Bulletin* 205 (2): 102–9.
- Ropert-Coudert, Y., A. Kato, K. Sato, Y. Naito, J. Baudat, A. Bost, et Y. Le Maho. 2002. « Swim Speed of Free-Ranging Adélie Penguins *Pygoscelis Adeliae* and Its Relation to the Maximum Depth of Dives ». *Journal of Avian Biology* 33 (1): 94–99. doi:10.1034/j.1600-048X.2002.330115.x.
- Ropert-Coudert, Yan, et Rory P. Wilson. 2005. « Trends and Perspectives in Animal-Attached Remote Sensing ». *Frontiers in Ecology and the Environment* 3 (8): 437–44. doi:10.2307/3868660.
- Roquet, Fabien, Jean-Benoit Charrassin, Stephane Marchand, Lars Boehme, Mike Fedak, Gilles Reverdin, et Christophe Guinet. 2011. « Delayed-Mode Calibration of Hydrographic Data Obtained from Animal-Borne Satellite Relay Data Loggers ». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 28 (6): 787–801. doi:10.1175/2010JTECHO801.1.
- Roquet, Fabien, et Baptiste Picard. 2015. « MEOP - Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole ». juin 29. <http://www.meop.net/>.
- Roquet, Fabien, Guy Williams, Mark A. Hindell, Rob Harcourt, Clive McMahon, Christophe Guinet, Jean-Benoit Charrassin, et al. 2014. « A Southern Indian Ocean database of hydrographic profiles obtained with instrumented elephant seals ». *Scientific Data* 1 (septembre). doi:10.1038/sdata.2014.28.
- Rutz, Christian, et Graeme C. Hays. 2009. « New Frontiers in Biologging Science ». *Biology Letters* 5 (3): 289–92. doi:10.1098/rsbl.2009.0089.
- Sala, Juan Emilio, Flavio Quintana, Rory P. Wilson, Jorge Dignani, Mirtha N. Lewis, et Claudio Campagna. 2011. « Pitching a New Angle on Elephant Seal Dive Patterns ». *Polar Biology* 34 (8): 1197–1209. doi:10.1007/s00300-011-0981-6.
- Sato, K., K. Shiomi, Y. Watanabe, Y. Watanuki, A. Takahashi, et P. J. Ponganis. 2010. « Scaling of Swim Speed and Stroke Frequency in Geometrically Similar Penguins: They Swim Optimally to Minimize Cost of Transport ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277 (1682): 707–14. doi:10.1098/rspb.2009.1515.
- Schulte-Pelkum, N., S. Wieskotten, W. Hanke, G. Dehnhardt, et B. Mauck. 2007. « Tracking of Biogenic Hydrodynamic Trails in Harbour Seals (*Phoca Vitulina*) ». *Journal of Experimental Biology* 210 (5): 781–87. doi:10.1242/jeb.02708.
- Slip, David J., Mark A. Hindell, et Harry R. Burton. 1994. « Diving behavior of southern elephant seals from Macquarie Island: an overview ». *Elephant seals: population ecology, behavior, and physiology*. University of California Press, Berkeley, 253–70.

- Suzuki, Ippei, Yasuhiko Naito, Lars P. Folkow, Nobuyuki Miyazaki, et Arnoldus S. Blix. 2009. « Validation of a device for accurate timing of feeding events in marine animals ». *Polar Biology* 32 (4): 667-71.
- Talley, Lynne D. 2011. *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. Academic Press.
- Tracey, Jeff A., James Sheppard, Jun Zhu, Fuwen Wei, Ronald R. Swaisgood, et Robert N. Fisher. 2014. « Movement-Based Estimation and Visualization of Space Use in 3D for Wildlife Ecology and Conservation ». Édité par Cédric Sueur. *PLoS ONE* 9 (7): e101205. doi:10.1371/journal.pone.0101205.
- Turner, J. R., E. M. White, M. A. Collins, J. C. Partridge, et R. H. Douglas. 2009. « Vision in lanternfish (Myctophidae): Adaptations for viewing bioluminescence in the deep-sea ». *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 56 (6): 1003-17. doi:10.1016/j.dsr.2009.01.007.
- Vacquié Garcia, Jade. 2014. « Variation spatio-temporelle de l'activité d'alimentation des éléphants de mer en relation avec les paramètres physiques et biologiques de l'environnement ». Phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <http://thesesups.ups-tlse.fr/2433/>.
- Vacquié-Garcia, Jade, François Royer, Anne-Cécile Dragon, Morgane Viviant, Frédéric Bailleul, et Christophe Guinet. 2012. « Foraging in the Darkness of the Southern Ocean: Influence of Bioluminescence on a Deep Diving Predator ». *PLoS ONE* 7 (8): e43565. doi:10.1371/journal.pone.0043565.
- Vanderklift, Mathew A., et Sergine Ponsard. 2003. « Sources of variation in consumer-diet $\delta^{15}N$ enrichment: a meta-analysis ». *Oecologia* 136 (2): 169-82. doi:10.1007/s00442-003-1270-z.
- Vincent, Cécile, Bernie J. McConnell, Vincent Ridoux, et Michael A. Fedak. 2002. « Assessment of Argos Location Accuracy from Satellite Tags Deployed on Captive Gray Seals ». *Marine Mammal Science* 18 (1): 156-66. doi:10.1111/j.1748-7692.2002.tb01025.x.
- Viviant, Morgane, Andrew W. Trites, David A. S. Rosen, Pascal Monestiez, et Christophe Guinet. 2009. « Prey Capture Attempts Can Be Detected in Steller Sea Lions and Other Marine Predators Using Accelerometers ». *Polar Biology* 33 (5): 713-19. doi:10.1007/s00300-009-0750-y.
- Watanuki, Y., Y. Niizuma, W. G. Geir, K. Sato, et Y. Naito. 2003. « Stroke and Glide of Wing-Propelled Divers: Deep Diving Seabirds Adjust Surge Frequency to Buoyancy Change with Depth ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 270 (1514): 483-88. doi:10.1098/rspb.2002.2252.
- Wilson, Rory P., et Cairns A. R. Bain. 1984. « An Inexpensive Depth Gauge for Penguins ». *The Journal of Wildlife Management* 48 (4): 1077-84. doi:10.2307/3801769.

ANNEXES

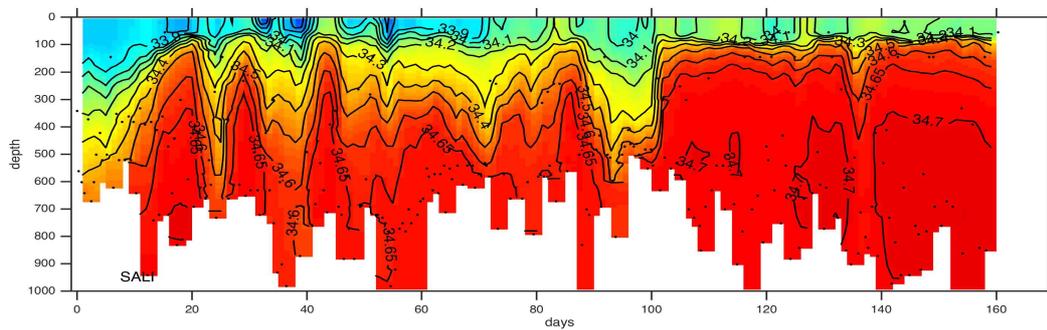
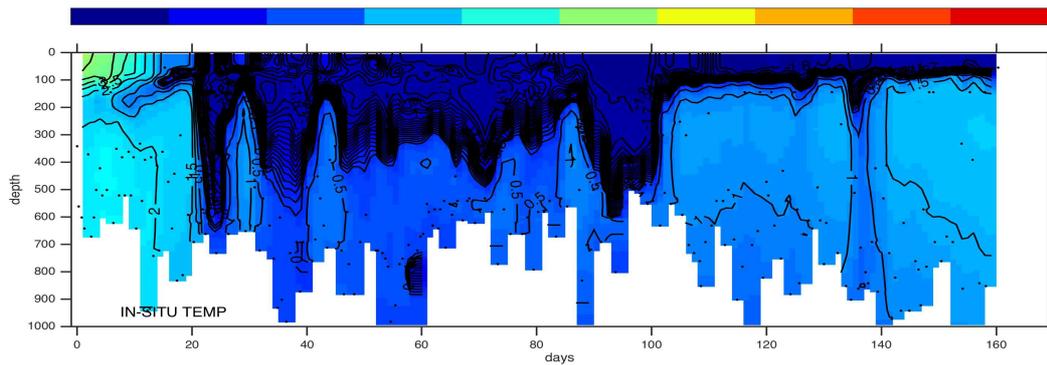
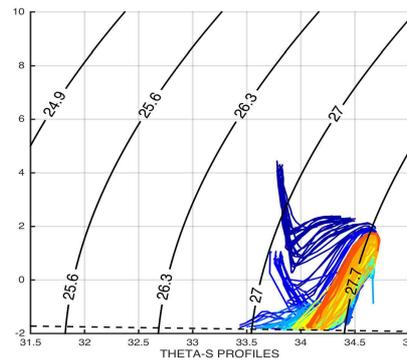
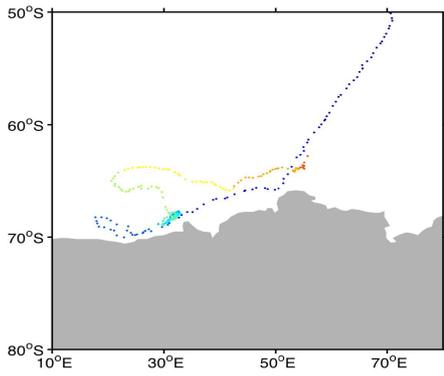
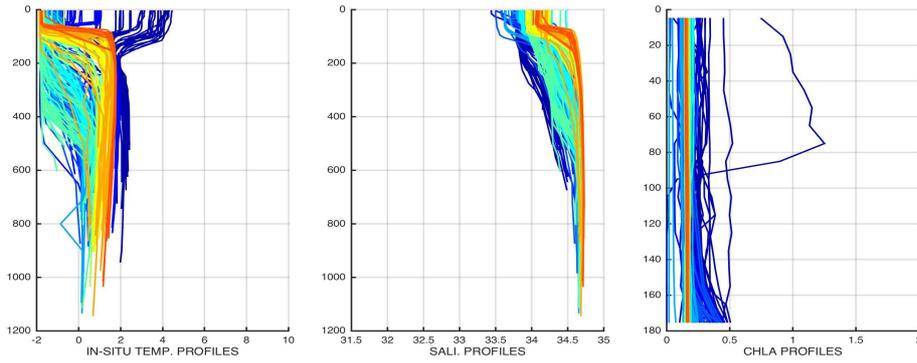
<u>Annexe 1 : Exemple de création d'un fichier de visualisation PDF pour le déploiement FT01 (1 balise)</u>	<u>88</u>
<u>Annexe 2 : Etalonnage de la balise 13323 au SHOM</u>	<u>90</u>
<u>Annexe 3: The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle <i>Lepidochelys olivacea</i> along the Guiana coast</u>	<u>92</u>
<u>Annexe 4: Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour</u>	<u>93</u>
<u>Annexe 5: Characterization of Postdive Recovery Using Sound Recordings and Its Relationship to Dive Duration, Exertion and Foraging Effort of Southern Elephant Seals (<i>Mirounga Leonina</i>).....</u>	<u>94</u>
<u>Annexe 6: Adjustment of Diving Behaviour with Prey Encounters and Body Condition in a Deep Diving Predator: The Southern Elephant Seal.....</u>	<u>95</u>
<u>Annexe 7: Calibration Procedures and First Dataset of Southern Ocean Chlorophyll a Profiles Collected by Elephant Seals Equipped with a Newly Developed CTD-Fluorescence Tags.</u>	<u>96</u>
<u>Annexe 8: Winter use of sea ice and ocean water mass habitat by southern elephant seals: The length and breadth of the mystery</u>	<u>97</u>
<u>Annexe 9 : Marine bioluminescence: record by a light-sensor and related foraging behaviour of a diving predator</u>	<u>98</u>
<u>Annexe 10: How Elephant Seals (<i>Mirounga leonina</i>) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate</u>	<u>99</u>
<u>Annexe 11: Southern Elephant Seal foraging success in relation to temperature and light conditions: insight on their prey distribution.</u>	<u>100</u>

Annexe 1 : Exemple de création d'un fichier de visualisation PDF pour le déploiement FT01 (1 balise)



ft01-Fluoro2-07
cal data
277 TEMP profiles
275 SALT profiles
160 days

T1= 0.00 degC/km
T0=-0.03 degC
S1= 0.05 psu/km
S0= 0.10 psu
SigmaT= 0.05
SigmaS= 0.05



Annexe 2 : Etalonnage de la balise 13323 au SHOM

RAPPORT D'ETALONNAGE

Conditions de réalisation de l'étalonnage :

il a été réalisé selon les spécifications demandées dans le mail cité en référence, sur huit points de température répartis entre $-1,5\text{ °C}$ et $+20\text{ °C}$, dans une eau de salinité moyenne 34,2. Les émetteurs Argos CTD (tags) ont été suspendus par colonnes de deux à l'aide d'une ficelle fixée sur le dessous de chaque instrument, de façon à limiter au maximum l'influence de cet élément sur le champ électrique des cellules (voir schéma annexe I). Ces lignes ont été maintenues en position fixe par un lest, posé sur le fond de la cuve. La sonde de température de référence a été placée au centre du bain. Les tags ont été programmés pour acquérir à la cadence de 10 s et ils ont été mis à l'heure du PC d'acquisition SHOM.

Les données ont été exploitées à l'issue du dernier palier de température. Des coefficients de correction ont été calculés à partir des données brutes issues des tags. Ces coefficients ont été programmés dans les tags et vérifiés sur un point.

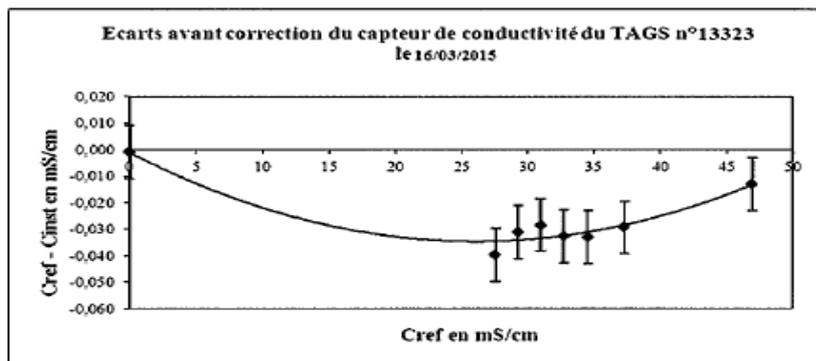
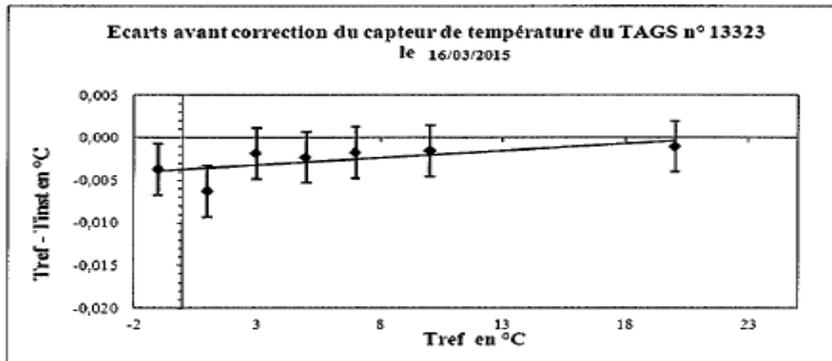
Durant les mesures, la stabilité thermique du bain était supérieure à $0,001\text{ °C}$ crête – crête. La sonde de référence SBE 35 n° 39 du laboratoire, a été utilisée. Elle a été contrôlée aux points de référence de l'EIT-90, le 08/04/2014. L'incertitude élargie (à 2σ) sur les températures de référence est de $\pm 0,002\text{ °C}$ de -1 °C à $+22\text{ °C}$ et ces températures sont référencées à l'EIT-90. Des prélèvements d'eau ont été analysés avec les salinomètres Portasal n° 3 et Autosal, préalablement étalonnés avec des ampoules d'eau standard, afin de déterminer des valeurs de conductivité de référence par inversion des relations de la Practical Salinity Scale de 1978 (PSS-78). L'incertitude élargie (à 2σ) sur ces valeurs de conductivité de référence est de $\pm 0,0045\text{ mS/cm}$.

La balise n° 13323 présente une réponse linéaire et des décalages assez faibles ($< -0,004\text{ °C}$) en température. Des coefficients de correction ont été calculés et programmés dans l'instrument. Ils permettent d'obtenir des données qui entrent dans l'incertitude $\pm 3,0\text{ mK}$, sous réserve d'une utilisation de la balise dans des conditions de mesure, proches de celles de l'étalonnage.

En conductivité, la réponse de la cellule n'est pas linéaire, mais elle peut être corrigée avec un polynôme du second ordre. Les écarts obtenus avant correction, sont inférieurs à $-0,0396\text{ mS/cm}$. Des coefficients de correction ont été calculés et programmés dans l'instrument. Ils permettent d'obtenir des données qui entrent dans l'incertitude $\pm 8,7\text{ }\mu\text{S/cm}$, sous réserve d'une utilisation de la balise dans des conditions de mesure, proches de celles de l'étalonnage.

Résultats de l'étalonnage de la balise n° 13323

Réalisé par : L. Pacaud le 16/03/2015
 Sonde de température de référence : SBE35 V2.0a SERIAL NO. 0039 15 Mar 2015 23:05:09
 number of measurement cycles to average = 1
 03-dec-10
 Contrôlée au SHOM le 08/04/2014
 Salinités mesurées avec salinomètres Portasal n° 3 et Autosal n° 69858.
 Batch n° 157



Coefficients à programmer pour le n° 13323 :

En température	a0	a1	a2
Anciens coef:	-	-	-
Nouveaux coef.	-1,0273E+01	7,5094E-04	9,26736E-11

En conductivité	a0	a1	a2
Anciens coef:	-	-	-
Nouveaux coef.	-9,5361E-01	1,2869E-03	8,32156E-11

Vérif. de la validité des relations de correction des données :

Tref	T balise	Tbalise cor	Tref - Tbalise cor
-0,9987	-0,9950	-0,9997	0,0010
20,0012	20,0022	20,0012	0,0000

Cref	c balise	C balise cor	Cref - C balise cor
27,6015	27,6411	27,6063	-0,0048
46,9587	46,9716	46,9580	0,0007

Vérification des coefficients programmés :

Tref	T balise	Tref - Tbalise cor
10,0015	10,0021	-0,0006

Cref	C balise	Cref - C balise cor
37,3234	37,3177	0,0057

Annexe 3: The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle *Lepidochelys olivacea* along the Guiana coast

Philippine Chambault, Benoît de Thoisy, Karine Heerah, Anna Conchon, Sébastien Barrioz, Virginie Dos Reis, Rachel Berzins, Laurent Kelle, Baptiste Picard, Fabien Roquet, Yvon Le Maho, Damien Chevallier

Progress in Oceanography. doi: 10.1016/j.pocean.2016.01.006



The influence of oceanographic features on the foraging behavior of the olive ridley sea turtle *Lepidochelys olivacea* along the Guiana coast



Philippine Chambault^{a,*}, Benoît de Thoisy^b, Karine Heerah^c, Anna Conchon^d, Sébastien Barrioz^b, Virginie Dos Reis^b, Rachel Berzins^c, Laurent Kelle^f, Baptiste Picard^g, Fabien Roquet^h, Yvon Le Maho^a, Damien Chevallier^a

^a DEPE-IPHC, UMR 7178, CNRS-Uds, 23 rue Becquerel, F-67087 Strasbourg cedex 2, France

^b Association Kwata, 16 avenue Pasteur, BP 672, F-97335 Cayenne cedex, France

^c LOCEAN-UMR 7159, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^d Collecte Localisation Satellites, Direction Océanographie Spatiale, 8-10 rue Hermès, 31520 Ramonville, France

^e Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage – Cellule technique Guyane, Campus agronomique, BP 316, 97379 Kourou cedex, France

^f WWF Guyane, N°5 Lotissement Katoury, F-97300 Cayenne, France

^g Centre d'Études Biologiques de Chizé, UMR 7372 CNRS – Université de La Rochelle, 79360 Villiers-en-Bois, France

^h Stockholm University, Department of Meteorology (MISU), Sweden

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 August 2015

Received in revised form 28 January 2016

Accepted 28 January 2016

Available online 4 February 2016

ABSTRACT

The circulation in the Western Equatorial Atlantic is characterized by a highly dynamic mesoscale activity that shapes the Guiana continental shelf. Olive ridley sea turtles (*Lepidochelys olivacea*) nesting in French Guiana cross this turbulent environment during their post-nesting migration. We studied how oceanographic and biological conditions drove the foraging behavior of 18 adult females, using satellite telemetry, remote sensing data (sea surface temperature, sea surface height, current velocity and euphotic depth), simulations of micronekton biomass (pelagic organisms) and *in situ* records (water temperature and salinity). The occurrence of foraging events throughout migration was located using Residence Time analysis, while an innovative proxy of the hunting time within a dive was used to identify and quantify foraging events during dives. Olive ridleys migrated northwestwards using the Guiana current and remained on the continental shelf at the edge of eddies formed by the North Brazil retroflection, an area characterized by low turbulence and high micronekton biomass. They performed mainly pelagic dives, hunting for an average 77% of their time. Hunting time within a dive increased with shallower euphotic depth and with lower water temperatures, and mean hunting depth increased with deeper thermocline. This is the first study to quantify foraging activity within dives in olive ridleys, and reveals the crucial role played by the thermocline on the foraging behavior of this carnivorous species. This study also provides novel and detailed data describing how turtles actively use oceanographic structures during post-nesting migration.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Annexe 4: Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour

Gaëtan Richard, Jade Vacquie-Garcia, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, Alexandre Génin, John P. Y. Arnould, Frédéric Bailleul and Christophe Guinet

Journal of experimental Biology. doi: 10.1242/jeb.088542

© 2014. Published by The Company of Biologists Ltd | The Journal of Experimental Biology (2014) 217, 2609–2619 doi:10.1242/jeb.088542



RESEARCH ARTICLE

Variation in body condition during the post-moult foraging trip of southern elephant seals and its consequences on diving behaviour

Gaëtan Richard¹, Jade Vacquie-Garcia¹, Joffrey Jouma'a¹, Baptiste Picard¹, Alexandre Génin¹, John P. Y. Arnould², Frédéric Bailleul¹ and Christophe Guinet^{1,*}

ABSTRACT

Mature female southern elephant seals (*Mirounga leonina*) come ashore only in October to breed and in January to moult, spending the rest of the year foraging at sea. Mature females may lose as much as 50% of their body mass, mostly in lipid stores, during the breeding season due to fasting and lactation. When departing to sea, post-breeding females are negatively buoyant, and the relative change in body condition (i.e. density) during the foraging trip has previously been assessed by monitoring the descent rate during drift dives. However, relatively few drift dives are performed, resulting in low resolution of the temporal reconstruction of body condition change. In this study, six post-breeding females were equipped with time–depth recorders and accelerometers to investigate whether changes in active swimming effort and speed could be used as an alternative method of monitoring density variations throughout the foraging trip. In addition, we assessed the consequences of density change on the swimming efforts of individuals while diving and investigated the effects on dive duration. Both descent swimming speed and ascent swimming effort were found to be strongly correlated to descent rate during drift dives, enabling the fine-scale monitoring of seal density change over the whole trip. Negatively buoyant seals minimized swimming effort during descents, gliding down at slower speeds, and reduced their ascent swimming effort to maintain a nearly constant swimming speed as their buoyancy increased. One per cent of seal density variation over time was found to induce a 20% variation in swimming effort during dives with direct consequences on dive duration.

KEY WORDS: Body condition, Buoyancy, Speed, Swimming effort, *Mirounga leonina*

INTRODUCTION

The investigation of the temporal change in foraging success of top predators provides essential information on their ecology, as well as on the distribution of their prey. Such information is inherently difficult to obtain in marine ecosystems because of logistical constraints. However, since the development of the first time–depth recorders (TDRs) (Kooyman, 1965), a broad range of bio-logging

tools has become available to researchers. These instruments have enabled our understanding of foraging behaviour and its relationships to environmental and physiological variables to be refined in an increasing number of seabird and marine mammal species (Kooyman, 1965; Wilson, 1992; Pütz and Bost, 1994; Handrich et al., 1997; Pütz et al., 1998).

Recently, head-mounted accelerometers have been shown to provide reliable information on the occurrence of prey capture events in seals during extended foraging trips (Naito et al., 2010; Suzuki et al., 2009; Viviant et al., 2010; Gallon et al., 2013). This approach, however, does not provide information on the size and energy content (i.e. quality) of either the prey or the associated foraging costs, such that the energy gain by the individual cannot be assessed. In addition to the number of prey-catch events, data on energy expenditure, as well as the related change in body condition, are required to assess the type and quality of prey consumed. Indeed, the change in body condition reflects the ability of the animal to allocate excess assimilated food resources towards lipid stores when maintenance and foraging costs have been covered. Therefore, to assess prey quality, there is a need to estimate fine temporal changes in the condition of the seal, as well as the foraging costs.

In deep-diving phocid seals, such as the elephant seals (*Mirounga* spp.), the buoyancy of an individual is determined primarily by its body composition, in particular, by the ratio of lipid to lean tissue (Crocker et al., 1997; Webb et al., 1998). Lean tissue is denser than seawater, whereas adipose tissue is less dense and, therefore, animals with a large proportion of lipid will be more buoyant (Beck et al., 2000; Lovvorn and Jones, 1991a; Lovvorn and Jones, 1991b; Nowacek et al., 2001; Webb et al., 1998). Elephant seals regularly perform dives during which they spend a large proportion of time descending passively through the water column ('drift dives'). Monitoring of the descent rate during these dives has already been used to track density (i.e. lipid content) changes in elephant seals during their foraging trips (Crocker et al., 1997; Biuw et al., 2003). The vertical speed of elephant seals when descending passively is directly related to buoyancy, with more buoyant seals (i.e. with a higher lipid proportion) sinking at a slower rate, or even becoming positively buoyant, compared with leaner ones (Crocker et al., 1997; Biuw et al., 2003; Miller et al., 2012). However, such 'drift rate' data obtained from TDRs can only provide a general temporal trend in body composition change as few drift dives are detected daily (Dragon et al., 2012).

As the buoyancy of a seal is directly related to its density (ρ_{animal}), variations in speed and effort during active swimming must be related to variation in its lipid and muscle proportions (Miller et al., 2012). Miller et al. (Miller et al., 2004) and Watanabe et al. (Watanabe et al., 2006) working on sperm whales (*Physeter macrocephalus*) and Baikal seals (*Phoca sibirica*), respectively,

¹CEBC, UMR 7273 ULR-CNRS, 79360 Villiers en Bois, France. ²School of Life and Environmental Sciences, Deakin University, 221 Burwood Highway, Burwood, VIC 3125, Australia.

*Author for correspondence (guinet@cebc.cnrs.fr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium provided that the original work is properly attributed.

Received 21 March 2013; Accepted 16 April 2014

Annexe 5: Characterization of Postdive Recovery Using Sound Recordings and Its Relationship to Dive Duration, Exertion and Foraging Effort of Southern Elephant Seals (*Mirounga Leonina*)

Génin, Alexandre, Gaëtan Richard, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, Nory El Ksabi, Jade Vacquié Garcia, et Christophe Guinet. 2015.

Mar. Mamm. Sci. doi: 10.1111/mms.12235

Marine Mammal Science



MARINE MAMMAL SCIENCE, **(*) : ***_*** (***) 2015
 © 2015 Society for Marine Mammalogy
 DOI: 10.1111/mms.12235

Characterization of postdive recovery using sound recordings and its relationship to dive duration, exertion and foraging effort of southern elephant seals (*Mirounga leonina*)

ALEXANDRE GÉNIN, Centre d'Études Biologiques de Chizé-Centre National de la Recherche Scientifique (CEBC-CNRS), 79360 Villiers-en-bois, France and Département de Biologie, École Normale Supérieure de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007 Lyon, France; GAËTAN RICHARD, JOFFREY JOUMA'A, BAPTISTE PICARD, NORY EL KSABI, JADE VACQUIÉ GARCIA, CHRISTOPHE GUINET,¹ Centre d'Études Biologiques de Chizé-Centre National de la Recherche Scientifique (CEBC-CNRS), 79360 Villiers-en-bois, France.

ABSTRACT

It is notoriously difficult to measure physiological parameters in cryptic free-ranging marine mammals. However, it is critical to understand how marine mammals manage their energy expenditure and their diving behavior in environments where the predation risks are low and where survival is mainly linked to capacities to maintain physiological homeostasis and energy budget balance. Elephant seals are top marine predators that dive deeply and continuously when at sea. Using acoustic recorders deployed on two postbreeding southern elephant seals (SES) females, we developed methods to automatically estimate breathing frequency at the surface. Using this method, we found that seals took successive identical breaths at high frequency (0.29 Hz) when recovering at the surface and that breath count was strongly related to postdive surfacing time. In addition, dive depth was the main factor explaining surfacing time through the effects of dive duration and total underwater swimming effort exerted. Finally, we found that recovery does not only occur over one dive timescale, but over a multidive time scale for one individual. The way these predators manage their recovery will determine how they respond to the change in oceanic water column structure in the future.

Key words: southern elephant seal, *Mirounga leonina*, bio-logging, acoustics, eco-physiology, diving behavior, dive recovery.

Annexe 6: Adjustment of Diving Behaviour with Prey Encounters and Body Condition in a Deep Diving Predator: The Southern Elephant Seal

Jouma'a, Joffrey, Yves Le Bras, Gaëtan Richard, Jade Vacquié-Garcia, Baptiste Picard, Nory El Ksabi, et Christophe Guinet. 2015.

Functional Ecology. 30:636-648. doi: 10.1111/1365-2435.12514

Functional Ecology



Functional Ecology 2015

doi: 10.1111/1365-2435.12514

Adjustment of diving behaviour with prey encounters and body condition in a deep diving predator: the Southern Elephant Seal

Joffrey Jouma'a*, Yves Le Bras, Gaëtan Richard, Jade Vacquié-Garcia, Baptiste Picard, Nory El Ksabi and Christophe Guinet*

CEBC, UMR 7372 ULR-CNRS, 79360 Villiers en Bois, France

Summary

1. Optimal diving models have been developed to investigate how air-breathing predators should adjust their diving behaviour to optimize their foraging efficiency. Using time-depth recorders and 3D accelerometers, we addressed this question on six free-ranging Southern Elephant Seal (SES) females equipped on Kerguelen Island.

2. We hypothesize that seals would initially increase their foraging time with distance to the foraging patches before reducing it for physiological reasons, regardless of the prey encountered. We expect that SES spends more time at depths where more Prey Catch Attempts (PCA) occur, that is at the bottom. We also hypothesize that bottom time should be related to both the seal body density and the swimming effort dedicated to catching prey, as we expect seals to be more active when catching prey. Finally, because oxygen is acquired at the surface only, we expect that recovery times increase with the duration of the previous dives.

3. A total of 72.6% of PCA detected by accelerometer occurred at the bottom of the dive. At shallow depths (< 300 m), seals spent more time at the bottom in dives where PCA occurred compared to non-PCA dives. At deeper depths, SES had shorter bottom times in PCA dives due to higher swimming effort. When only dives associated with PCA were considered, the time spent at the bottom increased with the number of PCA. In addition, the closer the seal was to neutral buoyancy, the longer was the bottom duration. Body density, that is buoyancy, was found to be a critical factor in controlling variations in the dive duration through the swimming effort to access the prey at the bottom of the dive. Finally, post-dive surface intervals were related to the duration and swimming effort of the previous dive.

4. This study reveals how a marine top predator adjusts the time spent at the bottom depending on its body density, prey encounter rate and prey accessibility. It also highlights that using the duration of the foraging phase as a proxy of foraging success can be seriously misleading in SES. Finally, the need to use an energetic approach with bio-logging technology to study behavioural ecology is emphasized.

Key-words: bio-logging, buoyancy, foraging behaviour, marine mammal, optimal diving theory

Annexe 7: Calibration Procedures and First Dataset of Southern Ocean Chlorophyll *a* Profiles Collected by Elephant Seals Equipped with a Newly Developed CTD-Fluorescence Tags.

C. Guinet, X. Xing, E. Walker, P. Monestiez, S. Marchand, B. Picard, T. Jaud, M. Authier, C. Cotte, A. C. Dragon, E. Diamond, D. Antoine, P. Lovell, S. Blain, F. D'Ortenzio and H. Claustre
 Earth System Science Data, 5:15-29.

Earth Syst. Sci. Data, 5, 15–29, 2013
 www.earth-syst-sci-data.net/5/15/2013/
 doi:10.5194/essd-5-15-2013
 © Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.



Open Access
 Earth System
 Science
 Data

Calibration procedures and first dataset of Southern Ocean chlorophyll *a* profiles collected by elephant seals equipped with a newly developed CTD-fluorescence tags

C. Guinet¹, X. Xing^{2,3,4}, E. Walker⁵, P. Monestiez⁵, S. Marchand⁶, B. Picard¹, T. Jaud¹, M. Authier¹, C. Cotté^{1,7}, A. C. Dragon¹, E. Diamond^{2,3}, D. Antoine^{2,3}, P. Lovell⁸, S. Blain^{9,10}, F. D'Ortenzio^{2,3}, and H. Claustre^{2,3}

¹Centre d'Etudes Biologiques de Chizé-CNRS, Villiers en Bois, France

²Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, Villefranche-sur-Mer, France

³Université Pierre et Marie Curie (Paris-6), Unité Mixte de Recherche 7093, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, Villefranche-sur-Mer, France

⁴Ocean University of China, Qingdao, China

⁵Unité Biostatistique et Processus Spatiaux-INRA, Avignon, France

⁶Muséum national d'histoire naturelle, DMPA USM 402/LOCEAN, Paris, France

⁷Université Pierre et Marie Curie (Paris-6), DMPA USM 402/LOCEAN, Paris, France

⁸Sea Mammal Research Unit, University of St. Andrews, St. Andrews, Scotland

⁹Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Université Paris VI, Banyuls sur mer, France

¹⁰Université Pierre et Marie Curie (Paris-6), Unité Mixte de Recherche 7621, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Banyuls-sur-Mer, France

Correspondence to: C. Guinet (guinet@cebc.cnrs.fr)

Received: 21 June 2012 – Published in Earth Syst. Sci. Data Discuss.: 23 August 2012

Revised: 11 December 2012 – Accepted: 11 December 2012 – Published: 4 February 2013

Abstract. In situ observation of the marine environment has traditionally relied on ship-based platforms. The obvious consequence is that physical and biogeochemical properties have been dramatically undersampled, especially in the remote Southern Ocean (SO). The difficulty in obtaining in situ data represents the major limitations to our understanding, and interpretation of the coupling between physical forcing and the biogeochemical response. Southern elephant seals (*Mirounga leonina*) equipped with a new generation of oceanographic sensors can measure ocean structure in regions and seasons rarely observed with traditional oceanographic platforms. Over the last few years, seals have allowed for a considerable increase in temperature and salinity profiles from the SO, but we were still lacking information on the spatiotemporal variation of phytoplankton concentration. This information is critical to assess how the biological productivity of the SO, with direct consequences on the amount of CO₂ “fixed” by the biological pump, will respond to global warming. In this research programme, we use an innovative sampling fluorescence approach to quantify phytoplankton concentration at sea. For the first time, a low energy consumption fluorometer was added to Argos CTD-SRDL tags, and these novel instruments were deployed on 27 southern elephant seals between 25 December 2007 and the 4 February 2011. As many as 3388 fluorescence profiles associated with temperature and salinity measurements were thereby collected from a vast sector of the Southern Indian Ocean. This paper addresses the calibration issue of the fluorometer before being deployed on elephant seals and presents the first results obtained for the Indian sector of the Southern Ocean. This in situ system is implemented in synergy with satellite ocean colour radiometry. Satellite-derived data is limited to the surface layer and is restricted over the SO by extensive cloud cover. However, with the addition of these new tags, we are able to assess the 3-dimension distribution of phytoplankton concentration by foraging southern elephant seals. This approach reveals that for the Indian sector of the SO, the surface chlorophyll *a* (chl *a*) concentrations provided by MODIS were underestimated by a factor 2 compared to chl *a* concentrations estimated from HPLC corrected in situ fluorescence measurements. The scientific outcomes of this programme include an improved understanding of both the present state and variability in ocean biology, and the accompanying biogeochemistry, as well as the delivery of real-time and open-access data to scientists (doi:10.7491/MEMO.1).

Annexe 8: Winter use of sea ice and ocean water mass habitat by southern elephant seals: The length and breadth of the mystery

Sara Labrousse, Jade Vacquié-Garcia, Karine Heerah, Christophe Guinet, Jean-Baptiste Sallée, Matthieu Authier, Baptiste Picard, Fabien Roquet, Frédéric Bailleul, Mark Hindell, Jean-Benoit Charrassin

Progress in Oceanography. doi: 10.1016/j.pocean.2015.05.023

Progress in Oceanography 137 (2015) 52–68



Contents lists available at ScienceDirect

Progress in Oceanography

journal homepage: www.elsevier.com/locate/pocean



Winter use of sea ice and ocean water mass habitat by southern elephant seals: The length and breadth of the mystery



Sara Labrousse^{a,*}, Jade Vacquié-Garcia^b, Karine Heerah^a, Christophe Guinet^b, Jean-Baptiste Sallée^{a,c}, Matthieu Authier^d, Baptiste Picard^b, Fabien Roquet^e, Frédéric Bailleul^{g,h}, Jean-Benoit Charrassin^a

^a Sorbonne Universités, UPMC Univ., Paris 06, UMR 7159 CNRS-IRD-MNH, LOCEAN-IPSL, 75005 Paris, France

^b Centre d'Études Biologiques de Chizé (CEBC), CNRS UPR 1934, 79360 Villiers en Bois, France

^c British Antarctic Survey, High Cross, Cambridge CB3 0ET, United Kingdom

^d Observatoire PELAGIS UMS 3462 CNRS IRL, 5 allée de l'océan, 17000 La Rochelle, France

^e Department of Meteorology, Stockholm University, S-106 91 Stockholm, Sweden

^f South Australian Research & Development Institute (SARDI), 2 Hamra Avenue, West Beach, South Australia 5024, Australia

^g Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, University of Tasmania, Private Bag 80, Hobart, Tasmania 7001, Australia

^h Marine Predator Unit, Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania, Private Bag 129, Hobart, Tasmania 7001, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 August 2014

Received in revised form 24 May 2015

Accepted 26 May 2015

Available online 3 June 2015

ABSTRACT

Understanding the responses of animals to the environment is crucial for identifying critical foraging habitat. Elephant seals (*Mirounga leonina*) from the Kerguelen Islands (49°20'S, 70°20'E) have several different foraging strategies. Why some individuals undertake long trips to the Antarctic continent while others utilize the relatively close frontal zones is poorly understood. Here, we investigate how physical properties within the sea ice zone are linked to foraging activities of southern elephant seals (SES). To do this, we first developed a new approach using indices of foraging derived from high temporal resolution dive and accelerometry data to predict foraging behaviour in an extensive, low resolution dataset from CTD-Satellite Relay Data Loggers (CTD-SRDs). A sample of 37 post-breeding SES females were used to construct a predictive model applied to demersal and pelagic dive strategies relating prey encounter events (PEE) to dive parameters (dive duration, bottom duration, hunting-time, maximum depth, ascent speed, descent speed, sinuosity, and horizontal speed) for each strategy. We applied these models to a second sample of 35 seals, 20 males and 15 females, during the post-moult foraging trip to the Antarctic continental shelf between 2004 and 2013, which did not have fine-scale behavioural data. The females were widely distributed with important foraging activity south of the Southern Boundary Front, while males predominately travelled to the south-eastern part of the East Antarctica region. Combining our predictions of PEE with environmental features (sea ice concentration, water masses at the bottom phase of dives, bathymetry and slope index) we found higher foraging activity for females over shallower seabed depths and at the boundary between the overlying Antarctic Surface Water (AASW) and the underlying Modified Circumpolar Deep Water (MCDW). Increased biological activity associated with the upper boundary of MCDW, may provide overwintering areas for SES prey. Male foraging activity was strongly associated with pelagic dives within the Antarctic Slope Front where upwelling of nutrient rich Circumpolar Deep Water onto surface water may enhance and concentrate resources. A positive association between sea ice and foraging activity was found for both sexes where increased biological activity may sustain an under-ice ecosystem. Variability of the East Antarctic sea ice season duration is likely a crucial element to allow air-breathing predators to benefit from profitable prey patches within the pack ice habitat.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Annexe 9 : Marine bioluminescence: record by a light-sensor and related foraging behaviour of a diving predator

Vacquie Garcia, Jade; Mallefet, Jerome; Bailleul, Frederic; Picard, Baptiste; Guinet, Christophe

(En soumission)

Abstract :

Bioluminescence is a very common but difficult phenomenon to study in the deep ocean. It is produced by a broad range of organisms for defense, predation or communication purposes. We aimed at assessing that bioluminescence could be used by deep diving predators to locate their prey. Southern elephant seals (SES) have a vision adapted to low intensity light with a peak sensitivity of 479 nm, matching the wavelength of bioluminescence of myctophid species known to represent the main prey of female SES. To address that question, 13 satellite-tracked females were equipped with high sampling rate Time-Depth-Light 3D-accelerometers (MK10-X). First, we demonstrated experimentally that MK10-X light sensor was sensitive enough to detect natural bioluminescence. Then, we linked the number of Prey Encounter/Capture Attempts/Events (PEE), assessed from the processing of accelerometer data, with the number of detected bioluminescence events. Although PEE could take place in absence of bioluminescence events, we found that PEE was positively related to bioluminescence events which provide strong support that bioluminescence represents a key element in predator-prey interactions in the deep-dark marine environment of the Southern Ocean.

Annexe 10: How Elephant Seals (*Mirounga leonina*) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate

Yves Le Bras, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, Christophe Guinet

PLoS ONE 11(12):e0167226.doi:10.1371/journal.pone.0167226

RESEARCH ARTICLE

How Elephant Seals (*Mirounga leonina*) Adjust Their Fine Scale Horizontal Movement and Diving Behaviour in Relation to Prey Encounter Rate

Yves Le Bras*, Joffrey Jouma'a, Baptiste Picard, Christophe Guinet

Centre d'Etude Biologiques de Chizé, UMR, CNRS-ULR, France

* yves.lebras@cebc.cnrs.fr

Abstract

Understanding the diving behaviour of diving predators in relation to concomitant prey distribution could have major practical applications in conservation biology by allowing the assessment of how changes in fine scale prey distribution impact foraging efficiency and ultimately population dynamics. The southern elephant seal (*Mirounga leonina*, hereafter SES), the largest phocid, is a major predator of the southern ocean feeding on myctophids and cephalopods. Because of its large size it can carry bio-loggers with minimal disturbance. Moreover, it has great diving abilities and a wide foraging habitat. Thus, the SES is a well suited model species to study predator diving behaviour and the distribution of ecologically important prey species in the Southern Ocean. In this study, we examined how SESs adjust their diving behaviour and horizontal movements in response to fine scale prey encounter densities using high resolution accelerometers, magnetometers, pressure sensors and GPS loggers. When high prey encounter rates were encountered, animals responded by (1) diving and returning to the surface with steeper angles, reducing the duration of transit dive phases (thus improving dive efficiency), and (2) exhibiting more horizontally and vertically sinuous bottom phases. In these cases, the distance travelled horizontally at the surface was reduced. This behaviour is likely to counteract horizontal displacement from water currents, as they try to remain within favourable prey patches. The prey encounter rate at the bottom of dives decreased with increasing diving depth, suggesting a combined effect of decreased accessibility and prey density with increasing depth. Prey encounter rate also decreased when the bottom phases of dives were spread across larger vertical extents of the water column. This result suggests that the vertical aggregation of prey can regulate prey density, and as a consequence impact the foraging success of SESs. To our knowledge, this is one of only a handful of studies showing how the vertical distributions and structure of prey fields influence the prey encounter rates of a diving predator.

Annexe 11: Southern Elephant Seal foraging success in relation to temperature and light conditions: insight on their prey distribution.

Guinet C., Vacquié-Garcia J., Picard B., Bessigneul G., Lebras Y., Dragon A.C., Viviant M., Arnould J.P.Y., Bailleul F

Mar. Ecol. Prog. Ser. Ser. 499:285-301.

Vol. 499: 285–301, 2014
doi: 10.3354/meps10660

MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES
Mar Ecol Prog Ser

Published March 3



Southern elephant seal foraging success in relation to temperature and light conditions: insight into prey distribution

Christophe Guinet^{1,*}, Jade Vacquié-Garcia¹, Baptiste Picard¹,
Guillaume Bessigneul¹, Yves Lebras¹, Anne Cécile Dragon^{1,2}, Morgane Viviant¹,
John P. Y. Arnould³, Frédéric Bailleul¹

¹Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, CNRS, 79360 Villiers en Bois, France

²LOCEAN-UPMC, 4 Place Jussieu, Boite 100, 75252 Paris Cedex 05, France

³School of Life and Environmental Sciences, Faculty of Science & Technology, Deakin University, 221 Burwood Highway, Burwood, VIC 3125, Australia

ABSTRACT: The distribution of southern elephant seal *Mirounga leonina* prey encounter events (PEEs) was investigated from the foraging behaviour of 29 post-breeding females simultaneously equipped with a satellite tag, a time–depth recorder and a head-mounted accelerometer. Seal diving depth and PEE were related to water temperature at 200 m (T_{200}), and light level at the surface (L_0) and at depth. Approximately half (49%) of all dives were located in waters encompassed between the southern Antarctic Circumpolar Current Front and the Polar Front. Seals dived significantly deeper during the day than at night. Diving and PEE depth increased with increasing T_{200} and for a given T_{200} according to L_0 and the percentage of surface light reaching 150 m. On average, 540 PEEs per day were recorded. Seals exhibited more PEEs per unit of time spent diving during the twilight period compared with at night, and were least successful during daylight hours. Elephant seals forage in T_{200} ranging between -1 and 13°C ; however, few PEEs were recorded at depths shallower than 400–500 m at night when the T_{200} exceeded 8°C . The diet of female Kerguelen elephant seals appears to be dominated by myctophids (lanternfish), and according to the average mass of their most likely myctophid prey (9 g, *Electrona calisbergi* and *E. antarctica*; 30 g *Gymnoscopelus nicholsi* and *G. piabilis*), we estimate that seals consumed 4.8–16.1 kg of fish daily. Despite lower catch rates in warmer waters, no relationship was found between the mean T_{200} at the scale of the foraging trip and daily or absolute mass gain, suggesting that elephant seals are compensating for lower catch rates by consuming larger/richer prey items in those waters.

Résumé :

Depuis 2003, l'équipe de Christophe Guinet basé au Centre d'Etude Biologique de Chizé suit la population des éléphants de mer de Kerguelen dans l'océan Austral. Pour ce faire ils utilisent le bio-logging et équipent des éléphants de mer de balises Argos afin de suivre leur trajet en mer durant plusieurs mois. Ces balises enregistrent des données environnementales, tel que la température ou la salinité, et comportementales, tel que les tentatives de capture de proie ou les événements de bioluminescence. De par leur comportement en mer, des plongées en continues à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 2000 mètre, et leur zone d'habitat difficile d'accès pour l'homme : supérieur à des latitudes à 50 degrés Sud, les éléphants de mer sont des parfaits bio-échantillonneurs de l'océan Austral. Cependant les données récoltées ont besoin d'être traitées, calibrées et ordonnées avant d'être utilisées dans différentes études océanographiques ou biologiques dans un soucis d'homogénéité. L'objectif de ce travail est d'une part, de créer un outil automatisé de calibration sous Matlab qui permet d'assurer une précision des données de température et salinité et d'autre part, d'utiliser les données comportementales pour essayer de mettre en relation les événements de bioluminescence comme une cause ou une conséquence des événements de tentatives de capture de proie. Grâce aux connaissances océanographiques un outil a été développé et a permis de calibrer plus de 500 000 profils océanographiques en température et salinité avec des précisions assurées pour chaque profil. L'outil est toujours en cours d'amélioration avec la calibration d'autres données environnementales comme la chlorophylle a ou la détection des profils ayant des erreurs de plus en plus automatisées. Concernant la partie biologie les résultats montrent un lien de causalité des événements de bioluminescence avec les tentatives de captures de proie. La limite vient surtout du capteur de lumière qui détecte les événements de bioluminescence jusqu'à 3 mètres, l'amélioration des capteurs permettrait donc de vérifier les résultats obtenus.

Mots-clés : Eléphant de mer, Bio-logging, MEOP, calibration, océanographie, température, salinité, bioluminescence, accéléromètre.