

Ifremer

le cnam
intechmer

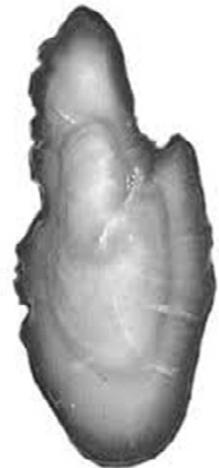
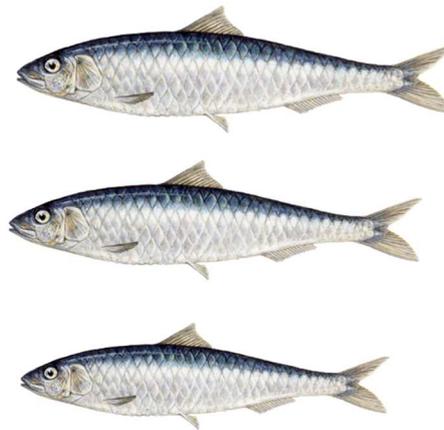
Rapport de stage

présenté par

Claire GENTIL

Promotion G. BEUCHAT (2015-2018)

Déclin de la taille-aux-âges des sardines (*Sardina pilchardus*) :
diminution de la croissance et/ou
disparition sélective des individus à croissance rapide



Stage de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de
Cadre Technique

Production et Valorisation des Ressources Marines

Maîtres de stage : M. Petitgas et M. Lebigre

Dates de stage : du 23 avril au 31 août 2018

Unité Ecologie et Modèles pour l'Halieutique

IFREMER Centre Atlantique, Rue de l'Île d'Yeu, 44 311 Nantes Cedex 3

Tél : 02 40 37 81 63

E-mail : pierre.petitgas@ifremer.fr

Remerciements

En premier lieu, je voudrais remercier Pierre Petitgas et Christophe Lebigre, tout d'abord pour m'avoir accepté en tant que stagiaire, mais également pour m'avoir suivi et aidé tout au long du stage.

Ensuite je voudrais remercier toute l'équipe de la salle de tri présente sur la Thalassa, à mes côtés : Laurence Pennors, Hervé Barone, Anne Boiron, Victor Martin-Baillet et Laetitia Marchand, qui m'ont permis de m'intégrer facilement et m'ont appris beaucoup de choses ; mais aussi Ewan Duhamel, sans qui j'aurais été incapable de lire tous ces otolithes. Evidemment, je remercie toutes les personnes présentes sur le navire, grâce à qui j'ai vécu une expérience inoubliable.

Un grand merci également à Patrick Grellier qui m'a aussi transmis de son savoir en otolithométrie et m'a appris l'utilisation du logiciel Visilog, et donc sans qui mes mesures n'auraient pas été très fiables.

Je remercie aussi Matthieu Veron, qui réalise une thèse sur la croissance des sardines pour le développement d'un modèle opérationnel d'évaluation écosystémique de la sardine Atlantique, et avec qui j'ai pu échanger quelques informations puisque nos sujets respectifs pouvaient se croiser en certains points.

Et enfin, je remercie toute l'équipe de l'Unité EMH de l'Ifremer de Nantes, pour leur bon accueil et leur gentillesse.

Sommaire

Liste des figures

Liste des abréviations

Présentation de la structure	1
Introduction	2
I - Matériel et Méthodes	4
1. Acquisition des données	4
1.1. La campagne PELGAS	4
1.2. En laboratoire	6
2. Analyse des données récoltées	9
3. Comparaison aux données environnementales	11
II – Résultats	12
1. Vue d'ensemble	12
2. Caractéristiques de la croissance	16
3. Modifications de la croissance au cours du temps	18
4. La mortalité sélective	20
4.1. Changements du R1 entre l'âge 1 et l'âge 2	20
4.2. Suivi des cohortes	21
5. Comparaison aux données environnementales	22
5.1. Biomasse estimée, captures de sardines et température dans le Golfe de Gascogne	22
5.2. Lien avec la croissance et la mortalité sélective	23
III – Discussion	25
Conclusion	29
Références bibliographiques	30

Annexes

Liste des Figures

Figure 1 : Etapes pour conserver (et lire) les otolithes	5
Figure 2 : Figure 2 : Carte des différents grands domaines environnementaux du Golfe de Gascogne (source : Petitgas <i>et al.</i> , 2017).....	6
Figure 3 : Exemple de la méthode de mesure sur un otolithe d'un individu de deux ans (station W0152, 2018, puit B9)	7
Figure 4 : Exemples d'otolithes peu ou pas lisibles.....	8
Figure 5 : Exemple d'un otolithe cristallin (R0244, 2013, C6)	8
Figure 6 : Stations des données utilisées pour chaque année	12
Figure 7 : Evolution de la longueur moyenne de <i>S. pilchardus</i> en fonction des années.....	13
Figure 8 : Rayon total de l'otolithe en fonction de la taille de la sardine, pour chaque individu	14
Figure 9 : Comportement des résidus du modèle linéaire mesurant la relation entre le radius des otolithes et la longueur totale du corps des sardines	14
Figure 10 : Rayon total de l'otolithe en fonction de l'âge : différence entre mâles (en rouge) et femelles (en bleu).....	15
Figure 11 : Densité de chaque taille de R1, ajustement à la loi normale.....	16
Figure 12 : Comparaison de la croissance otolithaire entre chaque âge	17
Figure 13 : Relation entre la croissance pendant la première et la seconde année de vie	17
Figure 14 : Evolution du R1, des âges 1 (A) et des âges 2 (B), au cours des années.....	19
Figure 15 : Comparaison des moyennes de R1 à l'âge 1 et 2 pour chaque année.....	20
Figure 16 : Evolution du R1 des âges 1 et 2, pour chaque cohorte.....	21
Figure 17 : Différence des moyennes de R1 des âges 1 et 2, pour chaque cohorte	22
Figure 18 : Changements de trois facteurs au cours du temps pouvant influencer la croissance et la mortalité des sardines du Golfe de Gascogne : biomasse de sardines estimée par acoustique pendant la campagne PELGAS (A), captures de sardines, par les flottes françaises et espagnoles (B), et température moyenne pendant la période de croissance (C)	23
Figure 19 : Rapport entre la moyenne des R1, à l'âge 1 et : (A) la biomasse estimée par PELGAS, (B) les captures et (C) la température moyenne (juin-novembre)	24
Figure 20 : Rapport entre la différence de moyennes des R1 à l'âge 1 et à l'âge 2 et : (A) la biomasse estimée par PELGAS, (B) les captures et (C) la température moyenne (juin-novembre).....	24

Liste des tableaux

<u>Tableau 1</u> : Test du modèle linéaire de la taille en fonction des années et de l'âge (1 ou 2)	13
<u>Tableau 2</u> : Sélection de modèle mesurant l'influence du sexe sur le rayon otolithaire. La sélection s'est faite selon l'approche séquentielle inverse (stepwise backward model selection)	15
<u>Tableau 3</u> : Résultats des tests d'interaction entre les variables explicatives R1, zone et année, pour expliquer R2-R1	18
<u>Tableau 4</u> : Sélection de modèle mesurant l'influence de l'âge sur R1. La sélection s'est faite selon l'approche séquentielle inverse (stepwise backward model selection)	19
<u>Tableau 5</u> : Impact de l'âge et de la cohorte sur les variations de R1.....	22

Liste des abréviations

CIEM (ICES) : Conseil International pour l'Exploration de la Mer (International Council for the Exploration of the Sea)

EMH : Ecologie et Modèles pour l'Halieutique

L1 (à L5) : longueur (ou diamètre) du premier anneau (au cinquième)

R1 (à R5) : rayon au premier (au cinquième) anneau de l'otolithe

SE : Erreur Standard

Présentation de la structure

J'ai été accueillie par l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) de Nantes, dans l'Unité Ecologie et Modèles pour l'Halieutique (EMH) dont le responsable est Pierre Petitgas. Cette unité est composée de 21 membres permanents (14 chercheurs et 7 techniciens et administratifs) et de 5 à 10 membres non permanents (étudiants, CDD).

Le but d'EMH est de développer des connaissances et des outils quantitatifs pour faciliter la mise en place d'une approche écosystémique de la gestion des pêches. Une approche écosystémique (ou « intégrée ») des pêches consiste à prendre en compte toutes les interactions entre le milieu, les activités humaines, la biodiversité et la population dont on veut gérer l'exploitation. En effet, puisque les ressources exploitées dépendent de la capacité à produire de l'écosystème, il est essentiel de conserver les habitats, la biodiversité et les fonctions des écosystèmes. EMH a également comme spécificité d'avoir une approche spatialisée des effets de la pêche sur les ressources exploitées, tenant compte des interactions trophiques, du cycle de vie et du comportement des espèces, de l'habitat et de la biodiversité, de l'effort de pêche et de l'économie.

Le projet d'EMH est donc de développer des indicateurs permettant d'évaluer cette complexité ; indicateurs qui sont intégrés dans le processus d'évaluation permettant d'estimer l'évolution de la taille des stocks et ainsi mettre en place des scénarios de gestion dans le but de mieux gérer les pêches. Ainsi, EMH concentre ses activités sur l'étude de la distribution spatiale et saisonnière des populations (grâce aux campagnes scientifiques), l'estimation du recrutement et des mortalités naturelles de façon spatialisée grâce à des modèles biophysiques larvaires, et enfin, le suivi des activités de pêche (afin de connaître la distribution spatiale et saisonnière des flottilles). L'ensemble de ces différents processus sont ensuite modélisés en interactions sur une plateforme de modélisation appelée ISIS-fish.

Pour résumé, le but de EMH est d'évaluer des scénarios de gestion intégrant la conservation des écosystèmes et l'exploitation. Pour cela, ils utilisent des méthodes mathématiques et statistiques : échantillonnage écosystémique (protocoles, acoustique, imagerie), intégration/analyse de données et création de modèles spatiaux complexes avec gestion des incertitudes.

Introduction

Depuis plusieurs années, une diminution globale de la taille-aux-âges est observée chez de nombreuses espèces de poissons exploitées (Lee, 1912 ; Law, 2000 ; Petitgas *et al.*, 2010). Ce déclin est souvent attribué à la pêche qui, en prélevant les individus les plus grands, pourrait induire un changement évolutif des populations exploitées (Ernande *et al.*, 2004 ; Edeline *et al.*, 2007 ; Heino *et al.*, 2013). Mais, le déclin des tailles-aux-âges peut aussi être lié aux changements environnementaux. En effet, les capacités de croissance et de reproduction des individus sont maximales dans une certaine gamme environnementale (Stearns, 1992). Les changements environnementaux exposent donc les individus à des conditions inhabituelles qui vont entraîner une utilisation de l'énergie à des réponses de stress, induisant ainsi une diminution de la quantité disponible pour la croissance des individus (Ohlberger, 2013). Il est donc nécessaire d'estimer l'importance relative de la pêche et des changements environnementaux dans le déclin de taille-aux-âges.

La sardine du golfe de Gascogne, *Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792), est d'une grande importance économique pour les flottilles pélagiques. C'est une espèce fourrage planctonophage qui sert de nourriture aux prédateurs marins ; elle se situe donc au milieu du réseau trophique marin. De plus, c'est une espèce pélagique, de longévité relativement importante, se trouvant aussi bien sur la côte qu'au large et en surface qu'au fond (détails en Annexe 1). La sardine du golfe de Gascogne est classée comme stock à données limitées par le CIEM. Elle est donc gérée à partir de séries d'indicateurs telles que les captures par la pêche et le suivi par des campagnes scientifiques, qui ont montré une diminution globale de la taille des sardines (Doray *et al.*, 2018). Elle n'est donc pas réglementée en termes de TAC ou de quota. Cette espèce est également très sensible aux modifications de son environnement.

L'objectif de ce travail est de comprendre l'origine de la diminution des tailles-aux-âges de la sardine du Golfe de Gascogne. Deux hypothèses principales sont émises : un problème global de croissance, ou une mortalité sélective des individus à croissance rapide. Cette dernière a été mise en évidence chez l'anchois *Engraulis encrasicolus* (Petitgas *et al.*, 2012), qui est une espèce semblable à la sardine en beaucoup de points : position intermédiaire dans la chaîne trophique, intérêt commercial, sensibilité aux variations environnementales, morphologie, etc. Nous voulons donc savoir si l'on observe les mêmes tendances. Pour cela,

nous allons utiliser des otolithes (sagittae) de sardine, récoltés sur une campagne scientifique depuis le début des années 2000. Un otolithe est une petite pièce calcifiée se trouvant, par paire, dans l'oreille interne des poissons. Il intervient dans l'équilibre et l'audition des poissons, et nous permet de déterminer leur âge grâce à des stries annuelles (voire journalières) formées par une succession de dépôts à la composition chimique variable (détails en Annexe 2).

Tout au long de ce rapport, nous allons suivre le cheminement que j'ai effectué pour réaliser cette étude. Tout d'abord, il a été nécessaire de récolter les données *in situ*. Elles proviennent de la campagne PELGAS, à laquelle j'ai participé. Nous allons voir de quelle façon sont réalisés les plans d'échantillonnage et comment sont relevés les paramètres biologiques des individus sélectionnés, ainsi que l'extraction et la lecture des otolithes. Puis, nous verrons les manipulations en laboratoire, c'est-à-dire la sélection d'un certain nombre d'otolithes par année, ainsi que la méthode de mesure des stries de croissance des otolithes. Enfin, nous passerons à l'analyse des données récoltées, qui se fera principalement avec le logiciel R (R Core Team, 2017). Pour cela, nous allons, dans un premier temps, observer l'évolution globale de la taille et de la croissance des individus avec les années, afin de caractériser la diminution des tailles et la croissance. Puis nous suivrons l'évolution de la croissance au sein de différentes cohortes, ce qui nous permettra d'évaluer s'il y a une mortalité sélective ou non. Nous déterminerons ensuite si la croissance et le degré de mortalité dépendent de variables environnementales : température, biomasse de sardine estimée et effort de pêche.

I - Matériel et méthodes

1. Acquisition des données

1.1. La campagne PELGAS

PELGAS est une campagne halieutique organisée chaque année par l'IFREMER au mois de mai (navire océanographique Thalassa). Son but est d'étudier les espèces exploitées et l'ensemble de l'écosystème pélagique afin de comprendre les interactions entre les petits poissons pélagiques et leur environnement. Ainsi, la campagne comporte quatre grands volets : la prospection acoustique, l'hydrobiologie, la pêche et l'observation des prédateurs marins (détails en Annexe 3). Les observations sont réalisées selon un réseau de radiales standardisé, s'étendant sur le plateau français du Golfe de Gascogne (de la côte espagnole jusqu'à la pointe de la Bretagne ; Annexe 4).

Nous allons donc nous concentrer sur l'équipe « pêche », dont je faisais partie, ce qui va permettre d'expliquer la méthode de récolte des otolithes. La pêche se fait au chalut pélagique (positionné près du fond ou en surface). Celui-ci est mis à l'eau lorsque l'équipe acoustique détecte des bancs de poissons suffisamment grands. En moyenne, trois pêches sont réalisées par jour mais cela dépend de la détection. Le chalut est également équipé d'un sondeur permettant de détecter l'entrée des poissons dans le chalut ; la durée de chalutage est donc variable, elle prend fin lorsque l'équipe acoustique juge que la biomasse entrant dans le chalut est suffisante. Une fois le chalut entièrement viré sur le pont, les poissons sont déversés dans la cale à poissons (« trunk »), menant à la salle de tri. Tous les poissons pêchés sont pesés sur la balance « trunk ». Selon le tonnage de départ, seulement une partie est triée, par espèce. Chaque espèce triée est ensuite pesée sur la balance « carrousel » (étapes en photos : Annexe 5). On peut donc calculer des proportions entre espèces sur toute la capture. Différents protocoles sont alors appliqués aux espèces pêchées : relations taille/poids, prélèvements d'otolithes (sur l'anchois et la sardine) et d'estomacs, et prélèvements des yeux et morceaux de muscle sur la sardine.

Des pêcheurs professionnels nous accompagnent durant la campagne (Massé *et al.*, 2016). Ceci permet d'augmenter le nombre de pêches et ainsi de préciser la répartition des différentes espèces pélagiques dans le golfe de Gascogne. Nous récupérons à bord de la Thalassa, par un système de toulaine, les échantillons de sardines et d'anchois pêchés par les

navires de pêche professionnelle afin d'augmenter le nombre de prélèvements sur ces espèces (otolithes).

Pour mesurer les paramètres biologiques et extraire les otolithes, un sous-échantillon de sardines (idem pour l'anchois) est tout d'abord trié par classes de taille (au ½ cm) et chacune de celles-ci est pesée (relation taille/poids ; Annexe 6). Quarante individus répartis sur toutes les classes sont sélectionnés au hasard. Chaque poisson est alors pesé individuellement et sexé. La maturité est déterminée sur une échelle de 1 à 6 (de repos à post-ponte, voir Annexe 7). On note aussi, seulement pour la sardine, la présence de graisse (échelle de 1 à 4, voir Annexe 8) et de parasites *Anisakis sp.* (échelle de 0 à 3, voir Annexe 9).

Avant d'extraire les otolithes, il est nécessaire de préparer quatre plaquettes contenant dix puits numérotés, où seront mis les paires d'otolithes. Celles-ci sont étiquetées avec le numéro de station où la pêche a été effectuée, le numéro de chalut, la date, l'espèce et une lettre de A à D pour pouvoir retrouver à quel individu correspond l'otolithe (les repères A1 à A10, B1 à B10, C1 à C10 et D1 à D10 sont notés sur la fiche où a été reporté tous les paramètres biologiques décrits précédemment). Il est donc primordial de toujours garder les quarante poissons dans le même ordre. Une fois tous ces éléments prêts, on peut procéder au prélèvement des otolithes. Lorsque toutes les paires d'otolithes sont nettoyées (pour éviter toute trace de chair ou de sang qui pourrait gêner la lecture) et mises dans le bon puit, on les laisse sécher durant 24h puis on les met dans le bon sens, c'est-à-dire dans celui facilitant la lecture (placé sur la face légèrement incurvée de l'otolithe). Ils peuvent ensuite être fixés dans une résine (leukite) sous hotte et doivent sécher au moins 24h, toujours sous hotte, avant de pouvoir empiler et ranger les plaquettes (Fig. 1). La lecture des âges à bord, sous loupe binoculaire, est ensuite réalisée par Erwan Duhamel, qui m'a donc enseigné la méthode.



Figure 1 : Etapes pour conserver (et lire) les otolithes :

- a. Otolithes mis à sécher après extraction b. Otolithes mis dans le bon sens de lecture
c. Otolithes résinés

1.2. En laboratoire

Afin d'étudier s'il y a une modification de la croissance des poissons ou une disparition sélective des individus à croissance rapide, il est nécessaire de mesurer la croissance des otolithes sur plusieurs générations. Christophe Lebigre et Erwan Duhamel ont sélectionné des plaquettes d'otolithes de 2003 à 2006 et de 2011 à 2018. Pour chaque année, ils ont pris les otolithes de cinq stations se trouvant, si possible, dans quatre grands domaines environnementaux (sud/nord, côte/large) représentées sur la carte ci-dessous (Fig. 2). A défaut, ils prenaient des stations où ont été pêchées des sardines d'âges différents. A partir de 247 plaquettes, 2328 otolithes ont été analysés.

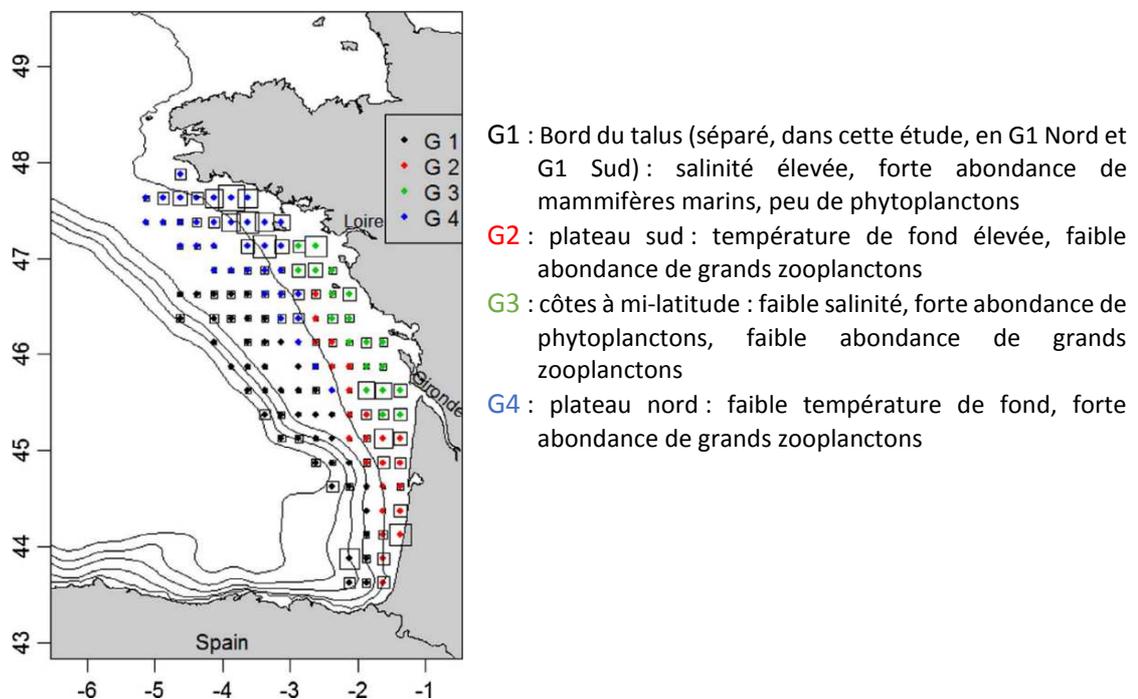


Figure 2 : Carte des différents grands domaines environnementaux du Golfe de Gascogne.
(source : Petitgas *et al.*, 2017)

Un otolithe présente des stries qui sont des anneaux hyalins (en lumière optique) représentant la période hivernale. Entre ces stries, on trouve des zones opaques qui montrent la période de croissance. C'est donc en comptant ces anneaux que l'on va déterminer l'âge du poisson.

Mon but était donc, tout d'abord, de bien retrouver les âges de chaque otolithe (Annexe 10), répertoriés sur un tableur représentant tous les paramètres biologiques relevés chaque année. Puis, il fallait mesurer chaque rayon de croissance (distance entre le centre –

nucleus – et chaque anneau d’hiver) grâce au logiciel d’image Visilog v6.4 qu’il a été tout d’abord nécessaire de calibrer afin d’obtenir les mesures réelles. Les stries se resserrant de plus en plus et se décalant sur le côté de l’otolithe, nous avons décidé d’arrêter les mesures à R5 (rayon du nucleus au cinquième anneau). Pour pouvoir prendre les mesures des otolithes, une caméra était placée sur une loupe binoculaire afin de prendre en photo l’otolithe le plus lisible dans chaque puits. Ensuite, pour réaliser les mesures, le nucleus n’étant pas toujours bien visible, il fallait prendre la longueur totale (L) qui sera, par la suite, divisée par deux pour obtenir le rayon (R). La mesure des stries s’effectue sur la plus grande longueur de l’otolithe passant, si possible, par le nucleus. Chaque anneau est mesuré sur la même droite que celle fixée pour la longueur totale de l’otolithe. Le segment mesurant chaque anneau s’arrête sur le bord extérieur de celui-ci. On mesure ensuite la largeur totale de l’otolithe en traçant un segment perpendiculaire à la droite représentant la longueur, et passant, dans la mesure du possible, au milieu de celle-ci et donc, normalement, par le nucleus (Fig. 3).

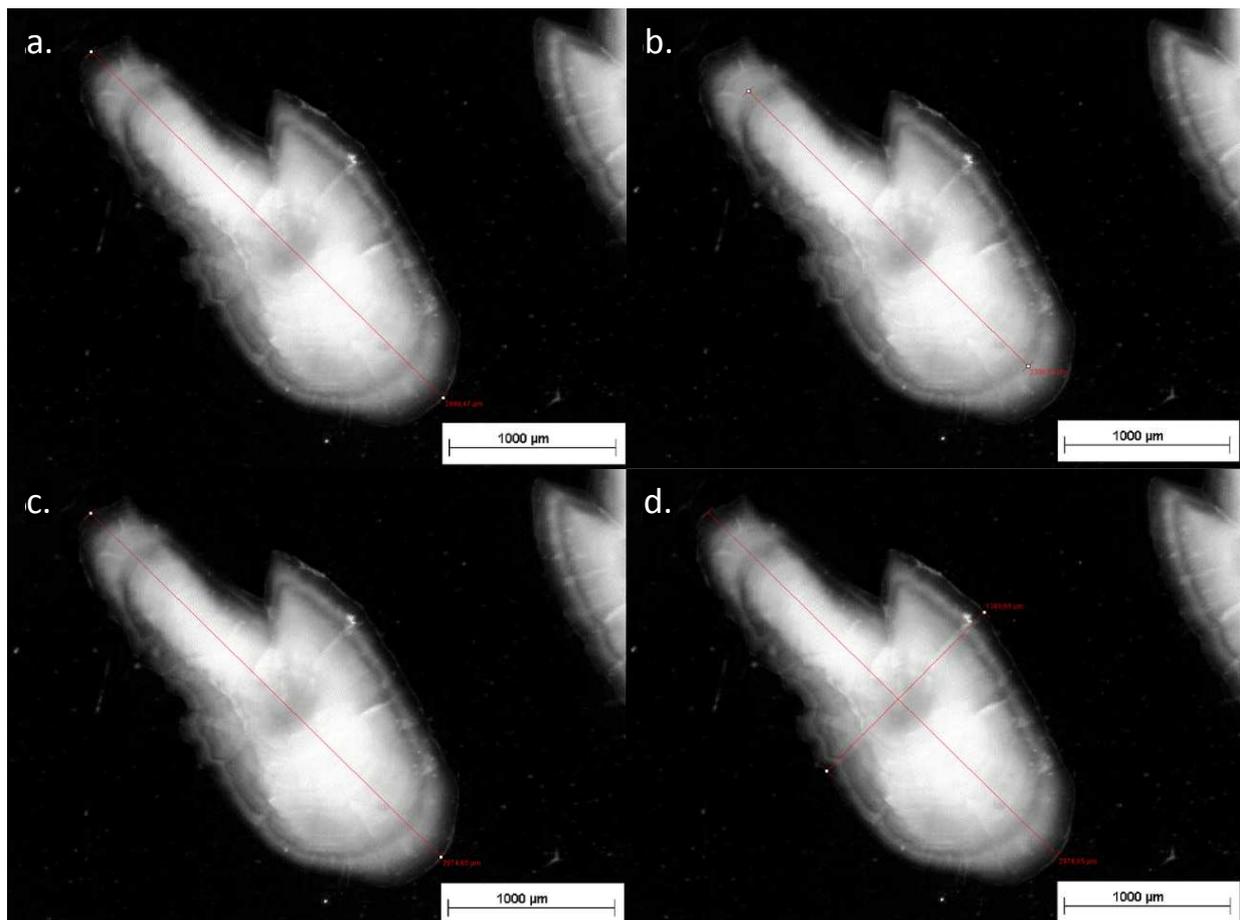


Figure 3 : Exemple de la méthode de mesure sur un otolithe d’un individu de deux ans (station W0152, 2018, puit B9) : a. Longueur totale (LT) ; b. Longueur du premier anneau (L1) ; c. Longueur du deuxième anneau (L2) ; d. Largeur

Cependant, certains otolithes datant de plusieurs années, la résine qui les recouvre est souvent craquelée ou opaque. Et, malgré l'ajout d'une nouvelle résine pour combler les craquelures, certains sont restés difficilement lisibles (Fig. 4). C'est pourquoi un critère de lisibilité (donc fiabilité) a été ajouté au jeu de données sur une échelle de 0 à 2. Le code « 0 » signifie que la lecture de l'otolithe est simple et donc la mesure facile et fiable. Le « 1 » signifie qu'on ne distingue pas bien les anneaux, soit parce que la résine a rendu l'otolithe flou, soit parce qu'à l'origine les stries ne sont pas bien marquées. Mais on peut tout de même deviner la limite des anneaux ; la mesure perd donc en fiabilité (des tests ont été réalisés pour savoir si l'exclusion ou l'inclusion des mesures de ces otolithes induisait des modifications des résultats mais ce n'est pas le cas, ils ont donc tous été utilisés dans les analyses). Et enfin, le code « 2 » signifie que l'otolithe est complètement illisible (ce qui correspond à 6,1% des otolithes sélectionnés qui n'ont pas pu être mesurés) et ceci pour différentes raisons possibles : image complètement floue à cause de la résine (impossible de distinguer les stries), otolithe cassé, otolithe cristallin (Fig. 5), ou même aucun otolithe dans le puits.

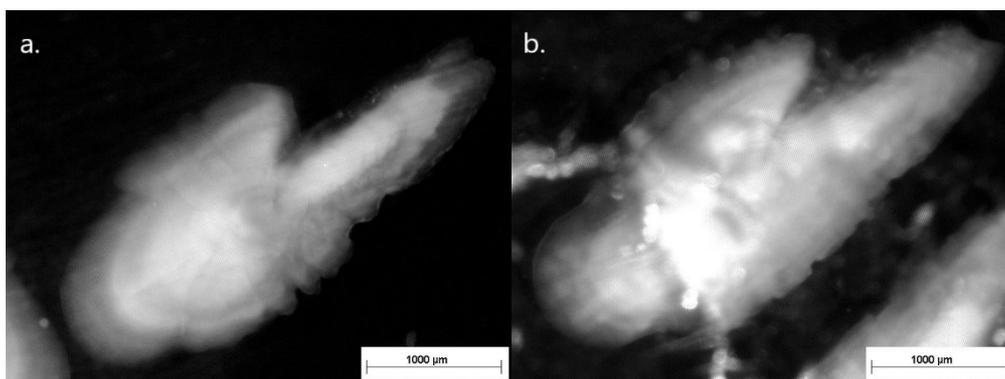


Figure 4 : Exemples d'otolithes peu ou pas lisibles :
a. Otolithe de lisibilité 1 (U0242, 2016, C7) b. otolithe de lisibilité 2 (I0318, 2004, D7)

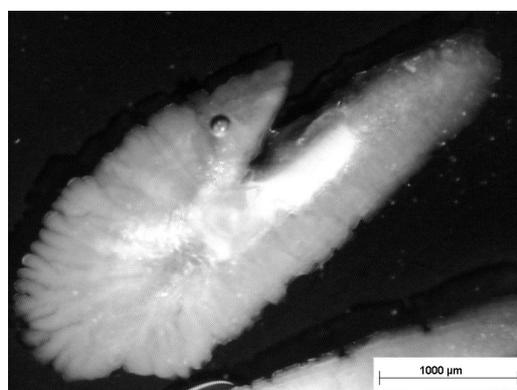


Figure 5 : Exemple d'un otolithe cristallin (R0244, 2013, C6).

Toutes les mesures sont donc inscrites, au fur et à mesure, dans le tableau où sont déjà renseignés la date, la station (le lieu), la zone (G1 à G4), le numéro de chalut et les paramètres biologiques de chaque individu correspondant aux plaquettes sélectionnées (Annexe 11).

2. Analyse des données récoltées

Dans un premier temps, le tableau de données (format .csv) est importé sous R avec la fonction `read.table()`. Il a tout d'abord fallu vérifier la cohérence de mon jeu de données avec le sujet du stage : la bonne répartition des stations dans le Golfe de Gascogne, pour chaque année et le fait d'observer une diminution globale de la taille des sardines.

Pour savoir si on peut utiliser le rayon otolithaire comme indicateur de croissance, il fallait également vérifier que la taille des otolithes correspond bien à la taille des individus. Pour cela, on a utilisé la fonction `lm()` pour estimer une droite de régression entre la taille des individus mesurée pendant la campagne et la taille de l'otolithe. Nous avons utilisé la fonction `plot()` pour visualiser la qualité de l'ajustement du modèle linéaire. Il est important de déterminer également si les mâles et les femelles ont une croissance similaire (chez de nombreux poissons les femelles sont plus grandes et plus grosses que les mâles). Nous le ferons en réalisant deux graphiques (un pour les mâles, un pour les femelles) du rayon total de l'otolithe en fonction de l'âge et en ajoutant une courbe de lissage (courbe de tendance) avec les fonctions `lines(smooth.spline())` afin de mieux observer la différence. Nous testerons la différence entre sexe à partir d'un modèle linéaire dont la variable dépendante est la taille de l'otolithes et les variables indépendantes sont l'âge et l'âge au carré (effet quadratique permettant de modéliser une inflexion de la croissance) en interaction avec le sexe des individus. S'il y a une interaction significative, alors il sera préférable de traiter les sexes séparément.

Nous avons ensuite regardé la répartition de tous les R1 (rayon au premier anneau d'hiver) des otolithes des individus de l'ensemble du jeu de données, en réalisant un histogramme avec la fonction `hist()`. Un ou plusieurs modes sur l'histogramme du R1 nous renseignerait sur le nombre de périodes de ponte. Puis nous avons vérifié la normalité de cette distribution grâce au test de Shapiro-Wilk ; fonction `shapiro.test()`.

Par la suite, nous avons étudié la corrélation entre les croissances aux différentes années en se concentrant essentiellement sur R1 et R2, afin de connaître l'influence de la croissance à la première année, sur celle à la deuxième. Pour cela, nous avons sélectionné seulement les individus d'âge 2 pour éviter que la mortalité sélective n'influence notre analyse (ex : si les individus à forte croissance meurent, on verra davantage de R1 faible, en fonction de l'âge, sur le graphique). Puis, pour voir l'évolution de cette relation selon différents facteurs (temps, zones), nous avons comparé les pentes des régressions linéaires créées en réalisant des tests statistiques `lm()` et `anova()`. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évolution du R1 et du R2 selon les âges et les années, pour cela nous avons utilisé des boîtes à moustaches avec la fonction `boxplot()`.

Enfin, nous avons mesuré le degré de mortalité sélective en mesurant pour chaque cohorte la différence entre la moyenne des R1 à l'âge 1 et la moyenne des R1 à l'âge 2 (une valeur positive de cette différence indique une mortalité sélective des individus de grande taille, une valeur négative indiquerait une mortalité sélective des individus de petite taille). Pour visualiser ce processus, nous avons utilisé des boîtes à moustaches pour chaque cohorte composant le jeu de données. Celles-ci représentaient le R1 en fonction de l'âge le long de chaque cohorte. Nous nous sommes assurés de la fiabilité du suivi de cohorte par la campagne PELGAS en visualisant la diminution des abondances avec l'âge telles qu'estimées par la campagne et fournies dans le rapport du CIEM (ICES, 2017). Pour réaliser un graphique représentant l'ensemble des cohortes, nous avons également utilisé la fonction `ggplot()` (disponible avec le package « `ggplot2` »).

Lorsqu'il était nécessaire de réaliser un graphique avec des moyennes et écart-types, on a utilisé la fonction `aggregate()` permettant d'appliquer une fonction à un ensemble de données selon un paramètre précis (ex : calculer les moyennes de R1 pour chaque année). Puis la fonction `plotCI` (disponible dans avec le package « `gplots` ») nous a permis de tracer le graphique avec les écart-types.

Pour les tests statistiques, nous avons utilisé principalement des modèles linéaires simples ou des analyses de covariance. Pour ces modèles nous présenterons les éléments suivants : Df (degré de liberté), β (paramètre estimé), SE ou Erreur Standard (écart-type), la t-value (mesure de précision de l'effet = β/SE) et la p-value (probabilité critique).

3. Comparaison aux données environnementales

Nous avons testé si les différences de R1 au cours du temps étaient corrélées avec l'abondance globale de la population (effet de densité), l'effort de pêche (effet de la pêche) et la température (effet environnemental).

Nous avons, de nouveau, utilisé les données de PELGAS, concernant l'estimation, par acoustique, de la population de sardine du Golfe de Gascogne ainsi que les estimations de captures des sardines dans cette zone par les navires de pêche français et espagnol (issues également du rapport du CIEM ; ICES, 2018). Nous avons décidé d'utiliser les données de biomasse car c'est l'indice le plus intégrateur (le plus représentatif de l'ensemble des caractéristiques de la population), tout en vérifiant la corrélation entre biomasse et nombre d'individus (ICES, 2017) avec la fonction `cor.test()`. Ensuite, nous avons fait un graphique de l'évolution de ces deux paramètres avec les années (fonction `plot()`). Puis, pour constater s'il y a un lien avec les variations de croissance et la mortalité sélective, on a réalisé un graphique représentant la moyenne des R1 par an, en fonction de la biomasse (population estimée) et un autre en fonction des captures estimées. Nous avons fait de même avec la différence de moyennes des R1 entre l'âge 1 et l'âge 2. En effet, si la pêche a une influence, ce serait plutôt sur la mortalité sélective ; cette différence permettrait de voir l'impact que peut avoir les captures. Grâce à la fonction `text()`, nous avons pu ajouter les années à côté du point correspondant. Ainsi on peut remarquer s'il y a une tendance particulière pour certaines années et si celles-ci correspondent aux phénomènes observés lors de l'analyse du jeu de données.

Afin d'étudier l'évolution de la température au cours des années, nous avons utilisé les cartes satellites (produits opérationnels) recouvrant tout le Golfe de Gascogne. Ces cartes renseignent sur la température de surface sur l'ensemble du golfe, chaque jour. La variation saisonnière étant marquée et supérieure aux variations inter-annuelles, on a émis l'hypothèse que les individus d'âge 1, l'année n, ont grandi principalement entre juin et novembre de l'année n-1. Nous avons donc étudié la corrélation entre la moyenne des R1 par an et la moyenne de température de juin à novembre, en utilisant la fonction `plotCI()`. Nous avons fait de même avec la différence entre les R1 des âges 1 et 2, pour voir si la température agissait sur la mortalité sélective.

II – Résultats

1. Vue d'ensemble

Chaque année, les sardines ne sont pas forcément pêchées dans toutes les zones déterminées par Petitgas *et al.* (2017 ; Fig. 2). On voit par exemple, sur la carte représentant les pêches de PELGAS 2018, que peu de sardines ont été pêchées dans la zone G1 Sud (Annexe 12). Il est donc important de s'assurer que les domaines environnementaux identifiés par Petitgas *et al.* (2017) sont bien représentés dans notre jeu de donnée. La Figure 6 présente l'ensemble des stations utilisées dans le cadre de ce projet qui correspondent aux 4 grands domaines environnementaux mais ne sont clairement pas réparties de manière homogène sur l'ensemble du Golfe de Gascogne.

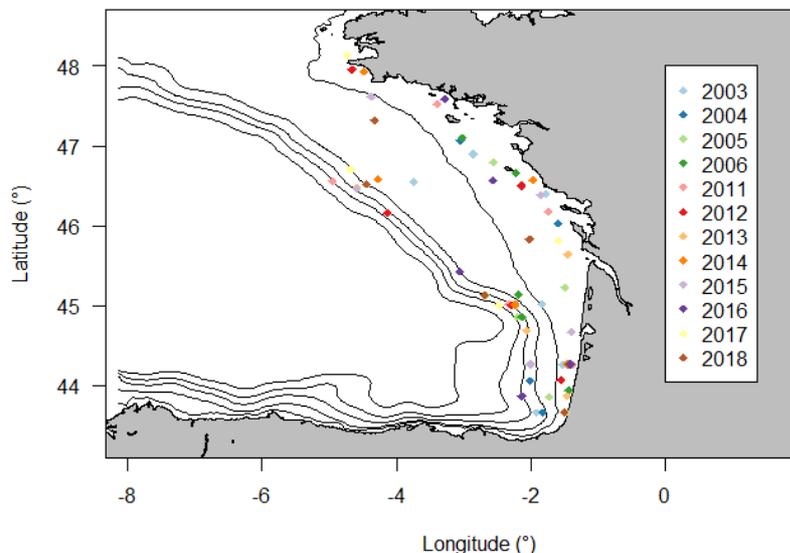


Figure 6 : Stations des données utilisées pour chaque année.

Il est également nécessaire de s'assurer que les échantillons que nous avons utilisés pour cette étude (N= 2328) sont représentatifs de l'ensemble des données collectées depuis le début de PELGAS (N = 20377, depuis 2000) et pour lequel nous savons qu'il y a un déclin de la taille-aux-âges (Doray *et al.*, 2018). Sur la base du jeu de données collecté dans le cadre de ce stage, se centrant sur les individus pour lesquels l'otolithe a été mesuré, nous trouvons bien qu'il y a un déclin de la taille-aux-ages (Tableau 1 ; Fig. 7). Ce déclin est différent selon les âges comme le montre l'effet significatif de l'interaction « année : âge » du Tableau 1. Ainsi, le déclin est plus fort pour les âges 1 que pour les individus d'âge 2. Sur la Figure 7, il semblerait néanmoins qu'il y ait un rebond de la taille-aux-âges à partir de 2016.

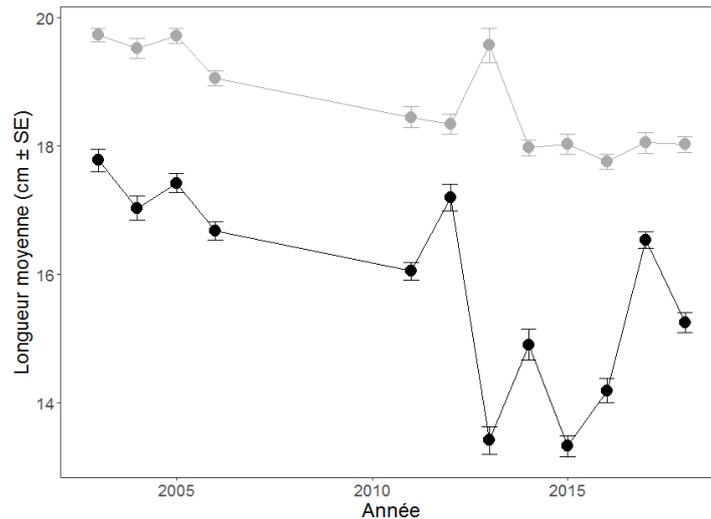


Figure 7 : Evolution de la longueur moyenne de *S. pilchardus* en fonction des années.
Ages 1 en noir ; Ages 2 en gris

Tableau 1 : Test du modèle linéaire de la taille en fonction des années et de l'âge (1 ou 2).

Variable	β	SE	t-value	p-value
Année	-0.336	0.026	-12.841	<0.001
Age	-207.298	32.432	-6.392	<0.001
Année : Age	0.105	0.016	6.486	<0.001

Les abréviations représentent : β : paramètre estimé, SE ou Erreur Standard : écart-type, t-value : mesure de précision de l'effet (β/SE) et p-value : probabilité critique

Il est également important de s'assurer que la taille et la croissance des otolithes correspondent bien à la taille et à la croissance du corps des sardines (Fig. 8). Cette relation étant très forte (modèle linéaire : $\beta = 74.802 \pm 0,675$ (SE), $t = 110,79$ $P < 0.001$), la taille de l'otolithe représente bien la taille des individus. On observe tout de même une augmentation de la variance de cette relation avec la taille et donc potentiellement avec l'âge. On peut visualiser ce phénomène à partir des résidus de cette relation dont la variance augmente avec les valeurs prédites (Fig. 9A ; hétéroscédasticité).

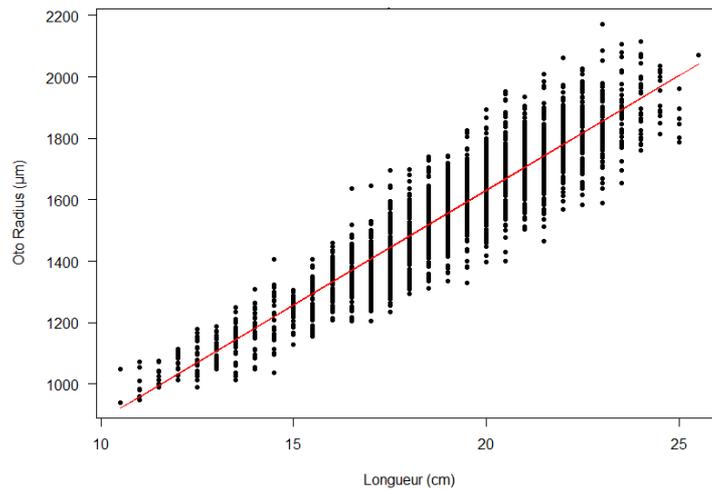


Figure 8 : Rayon total de l'otolithe en fonction de la taille de la sardine, pour chaque individu. La droite (rouge) est issue du modèle linéaire décrit dans le texte.

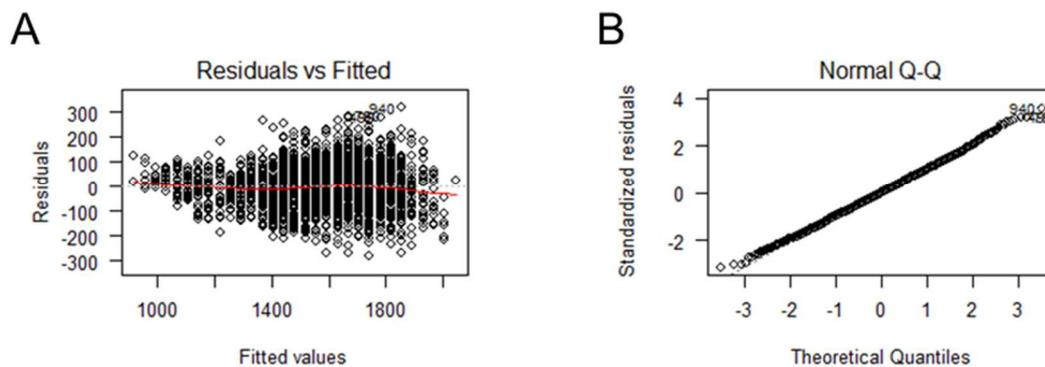


Figure 9 : Comportement des résidus du modèle linéaire mesurant la relation entre le radius des otolithes et la longueur totale du corps des sardines.

Sur la Figure 9A, on voit qu'il n'y a pas (ou peu) de tendance dans les résidus, et le Q-Q plot est quasiment une droite (résidus gaussiens ; Fig. 9B), ce qui signifie que les trois autres hypothèses des modèles linéaires sont vérifiées (normalité des résidus, linéarité des résidus, absence de valeurs aberrantes). Nous n'avons pas trouvé de différence significative de croissance entre les mâles et les femelles (Fig. 10, Tableau 2) ; nous les traiterons donc ensemble.

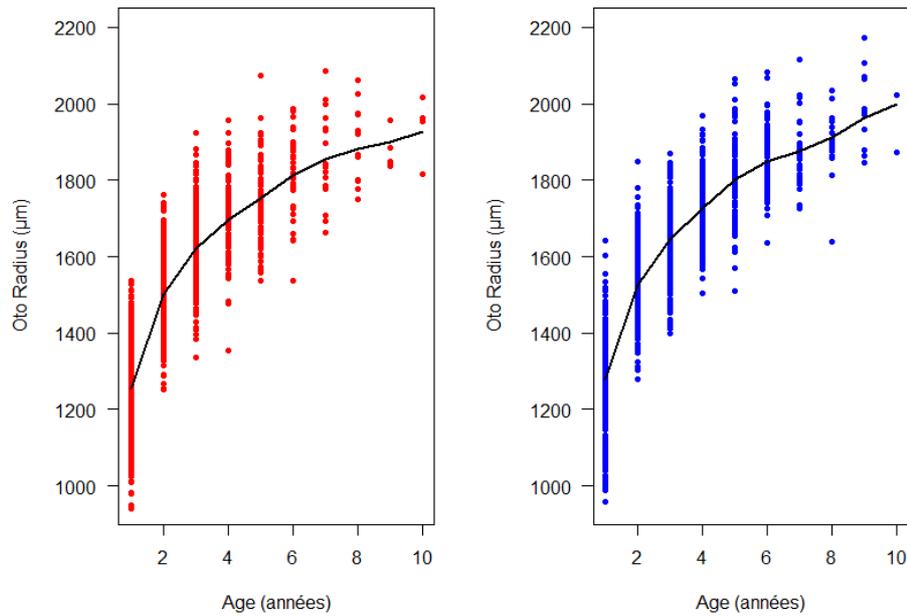


Figure 10 : Rayon total de l'otolithe en fonction de l'âge : différence entre mâles (en rouge) et femelles (en bleu).

Tableau 2 : Sélection de modèle mesurant l'influence du sexe sur le rayon otolithaire. La sélection s'est faite selon l'approche séquentielle inverse (stepwise backward model selection).

Variable étudiée	Effets principaux	Variabes retirées	Variabes retenues	β	SE	t-value	p-value
Oto radius	(Age + Age ²)*Sex	Age ² * Sex	-	73.24	54.14	1.353	0.176
	Age*Sex + Age ²	Age*Sex	-	-55.851	39.608	-1.410	0.159
	Age+Age ² +Sex	Sex	-	77.575	63.891	1.214	0.225
	Age+Age ²	-	Age	221.235	7.910	27.97	<0.001
		-	Age ²	-14.972	0.967	-15.49	<0.001

Les abréviations représentent : β : paramètre estimé, SE : écart-type, t-value : mesure de précision de l'effet (β /SE), et p-value : probabilité critique

La Figure 10 nous permet également de mettre en évidence la variation de l'âge pour une même taille et montre clairement qu'on ne peut pas déterminer de manière fiable l'âge des individus à partir de leur taille. Maintenant que l'on a vérifié la corrélation entre croissance otolithaire et somatique, on peut utiliser l'otolithe pour étudier l'évolution de la croissance avec l'âge et les années.

2. Caractéristiques de la croissance

La distribution de la taille des rayons à l'âge 1 (R1) ressemble à une distribution Gaussienne, clairement unimodale mais étalée (Fig. 11). Le test de Shapiro-Wilk indique que cette distribution ne suit pas une loi Normale ($W = 0.498$, $N = 2189$, $p\text{-value} < 0.001$), mais ceci peut s'expliquer par le nombre important d'échantillons qui permet la détection de petits écarts par rapport à une distribution normale « idéale ». Les quelques petits individus peuvent être la cause de ce léger décalage dans la superposition du modèle aux données. Pour les tests statistiques, nous vérifierons la validité de nos analyses à partir de la distribution des résidus des modèles linéaires et ANOVA. Nous avons aussi visualisé la distribution des R1 pour chaque année ; cette distribution reste unimodale (graphiques non présentés).

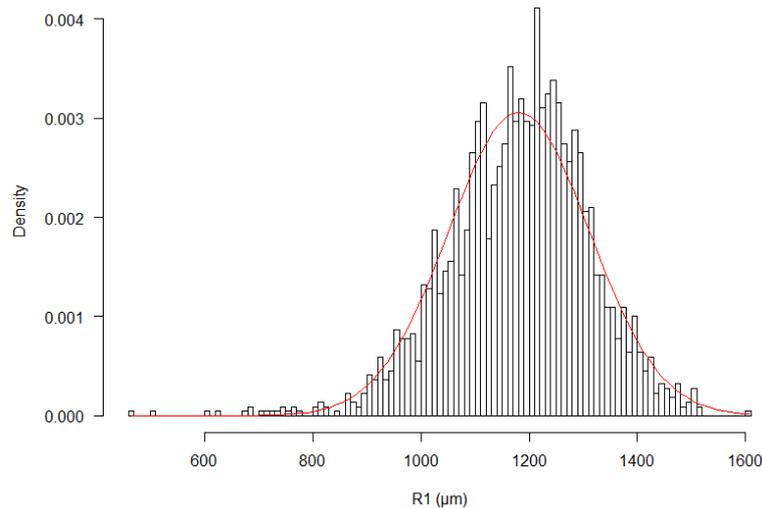


Figure 11 : Densité de chaque taille de R1, ajustement à la loi normale.

Afin de bien se rendre compte à quel âge la croissance est importante, on va regarder la croissance otolithaire pour chaque âge (Fig. 12). Le taux de croissance est très important pour les âges 1 et 2 et est faible pour les âges suivants. De même, la variance du taux de croissance est plus élevée pour les âges 1 et 2. On se concentrera donc, par la suite, sur ces deux âges.

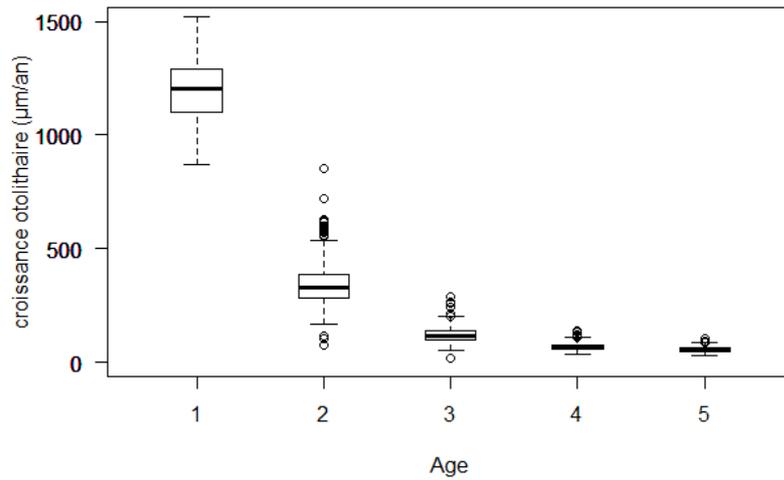


Figure 12 : Comparaison de la croissance otolithaire entre chaque âge.

On s'est donc ensuite intéressé à l'influence de la croissance à la première année, sur la deuxième (Fig. 13).

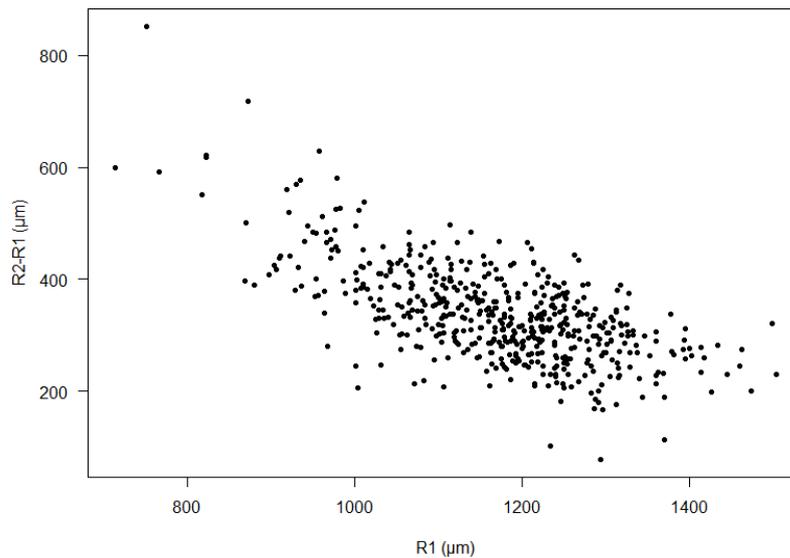


Figure 13 : Relation entre la croissance pendant la première et la seconde année de vie.

Plus les sardines sont grandes à l'âge 1, moins leur croissance à l'âge 2 sera importante et inversement, les sardines ayant eu une croissance faible en première année auront une croissance à l'âge 2 plus élevée (Tableau 3 ; Fig. 13) ; c'est ce qu'on appelle un compromis de la croissance-aux-âges. On a également regardé les différentes répartitions des points, sur le graphique, selon la zone de pêche et l'année, en créant une droite de régression pour chaque zone et chaque année (Annexes 13 et 14). En ce qui concerne les zones, les points sont répartis sur à peu près tout le graphique mais on observe une légère tendance à grandir davantage la

première année et moins la deuxième sur le talus en zone sud (strate G1(S) ; Fig. 2). De plus, le test d'interactions entre les facteurs montre une différence relativement significative entre les pentes (p -value < 0.05 ; voir Tableau 3). La valeur de l'interaction « R1 : Année » indique que la pente a tendance à augmenter très légèrement au cours du temps. En inspectant les données il semble que cet effet soit principalement dû à certaines années dans lesquelles la pente est particulièrement faible (exemples : 2006, 2014 et 2018).

Tableau 3 : Résultats des tests d'interaction entre les variables explicatives R1, zone et année, pour expliquer R2-R1.

Variable	Df	β	SE	F-value	t-value	p-value
R1	1	-30.43	9.012	-	-3.377	<0.001
Année	1	-20.96	5.337	-	-3.928	<0.001
Zone	4	-	-	5.152	-	0.001
R1 : Année	1	0.014	0.004	-	3.309	0.001
R1 : Zone	4	-	-	3.335	-	0.010

Les abréviations représentent : Df : degré de liberté, β : paramètre estimé, SE : écart-type, F-value : rapport entre variations intra et intergroupe, t-value : mesure de précision de l'effet (β/SE), et p-value : probabilité critique

En résumé, la croissance jusqu'au premier hiver (R1) a une forte influence sur la croissance l'année suivante et cette relation dépend de l'année et de la zone d'échantillonnage.

3. Modifications de la croissance au cours du temps

On va étudier l'évolution des rayons otolithaires au cours des années, aux âges 1 et 2. On observe un léger déclin de la croissance à l'âge 1 (R1) en 2006 et en 2011-2012 suivi d'une diminution importante entre 2013 et 2016 (Fig. 14A). Il y a ensuite une brusque remontée du R1 en 2017 qui s'atténue légèrement en 2018. Si on s'intéresse maintenant aux individus d'âges 2, on peut constater que les R1 des âges 2 (Fig. 14B) suivent globalement les mêmes tendances que ceux des âges 1, mais en moins prononcées. Nous reviendrons sur ce point dans la partie suivante. En étudiant le modèle linéaire de R1 en fonction des années et de l'âge (Tableau 4), on peut constater que R1 diminue avec le temps, que cette diminution est non-linéaire (stabilisation du déclin, voire rebond) et qu'elle est légèrement plus importante pour les âges 1 par rapport aux âges 2.

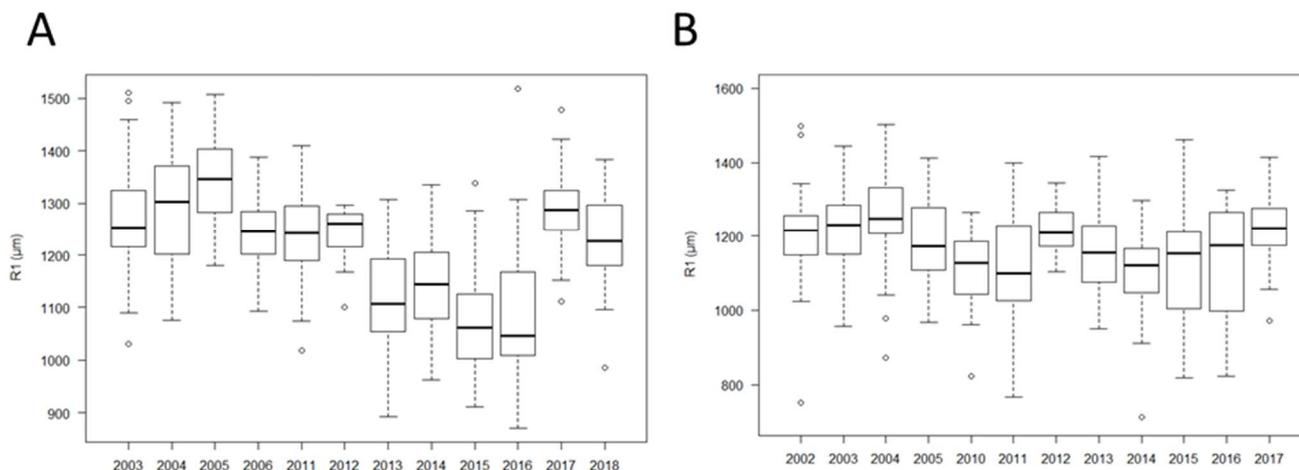


Figure 14 : Evolution du R1, des âges 1 (A) et des âges 2 (B), au cours des années
 NB : le graphique B est fait aux années n-1 pour que la dispersion des R1 correspondent à l'année où l'individu avait un an.

Tableau 4 : Sélection de modèle mesurant l'influence de l'âge sur R1. La sélection s'est faite selon l'approche séquentielle inverse (stepwise backward model selection).

Variable étudiée	Effets principaux	Variable retirée	Variable retenue	β	SE	t-value	p-value
R1	(Année + Année ²)*Age	Année ² * Age	-	-0.310	0.414	-0.748	0.454
	Année*Age + Année ²	-	Année*Age	6.037	1.432	4.214	<0.001
		-	Année ²	1.441	0.207	6.962	<0.001
		-	Age	-12170	2881	-4.226	<0.001
		-	Année	-5803	831.8	-6.976	<0.001

Les abréviations représentent : β : paramètre estimé, SE : écart-type, t-value : mesure de précision de l'effet (β /SE), et p-value : probabilité critique

Si on s'intéresse à leur croissance la deuxième année (R2-R1 ; Annexe 15) et à leur croissance totale (R2 ; Annexe 15), le compromis des croissances-aux-âges est également mis en avant. Mais, malgré la compensation des écarts de croissance qui a lieu la deuxième année, les tendances observées avec les R1 restent marquées avec les R2. Cela signifie donc que la croissance à la première année détermine si un individu a une croissance plutôt lente ou rapide tout au long de sa vie. On va maintenant s'intéresser à la mortalité sélective.

4. La mortalité sélective

Pour aborder la notion de mortalité sélective, on doit suivre les cohortes et mettre en relation la croissance à un âge donné avec celle à un autre âge le long des cohortes.

4.1. Changements du R1 entre l'âge 1 et l'âge 2

Si on reprend les graphiques du R1 à l'âge 1 et de celui à l'âge 2, en fonction des années (Fig. 14A et 14B), on se rend compte que les tendances sont les mêmes mais avec un rapprochement des médianes (écarts moins importants). On peut donc supposer qu'il n'y a pas seulement une mortalité des individus à croissance rapide mais plutôt des individus à croissance « extrême » (lente et rapide). Pour mieux mettre en évidence ce processus, nous avons mesuré la pente de la relation liant la moyenne des R1 mesurée à l'âge 1 et celle des R1 mesurée à l'âge 2. Cette pente est significative ($\beta = 0.426 \pm 0.130$ (SE), $t = 3.276$, $P = 0.011$) et diffère d'une relation 1:1 (test de différence de pente : $\beta = -0.574 \pm 0.130$ (SE), $t = -4.407$, $P = 0.002$; Fig. 15). Ainsi, lorsque les individus d'âge 1, avaient en moyenne un R1 faible, la moyenne des R1 des individus atteignant la deuxième année est plus élevée, et inversement.

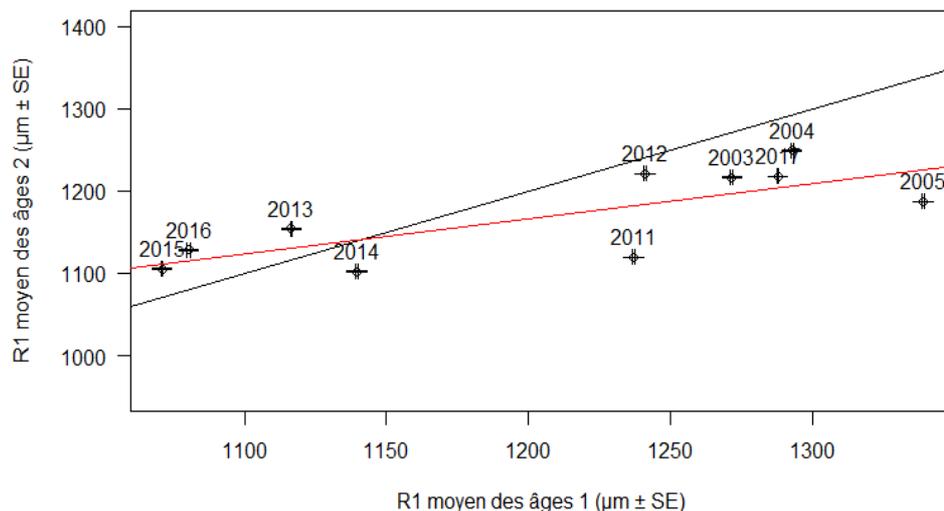


Figure 15 : Comparaison des moyennes de R1 à l'âge 1 et 2 pour chaque année. En noir, droite bissectrice, qui montre le cas où les moyennes des R1 aux âges 1 et 2 seraient égales. En rouge, droite de régression issue du modèle linéaire.

4.2. Suivi des cohortes

Nous avons suivi l'évolution du R1 à chaque âge de chaque cohorte représentée dans le jeu de données, tout en les comparant avec le suivi par la campagne PELGAS (Annexe 16). Il faut également prendre en compte le nombre d'individus représentant chaque âge (Annexe 17), car plus l'effectif est élevé, plus le résultat est fiable. Parmi ces cohortes, on observe des mortalités sélectives des individus à croissance rapide ($R1 \text{ âge2} < R1 \text{ âge1}$), d'autres, à croissance lente ($R1 \text{ âge2} > R1 \text{ âge1}$) et parfois aucune mortalité sélective. Ci-dessous, une vue d'ensemble de l'évolution du R1 au sein de chaque cohorte (Fig. 16). Ce graphique permet de voir différentes choses. Tout d'abord, on remarque à nouveau cette mortalité sélective variable, mise en évidence sur la Figure 17 ainsi que par le test statistique anova (Tableau 5). La Figure 16 met également en avant une diminution globale de croissance pour les cohortes de 2012 à 2015. Ces années correspondent à la diminution de croissance des R1 observée aux âges 1 et 2. Ceci renforce donc l'idée que le facteur est principalement externe. On va donc s'intéresser à quelques variables environnementales pour voir si on observe un changement marqué à cette période.



Figure 16 : Evolution du R1 des âges 1 et 2, pour chaque cohorte.

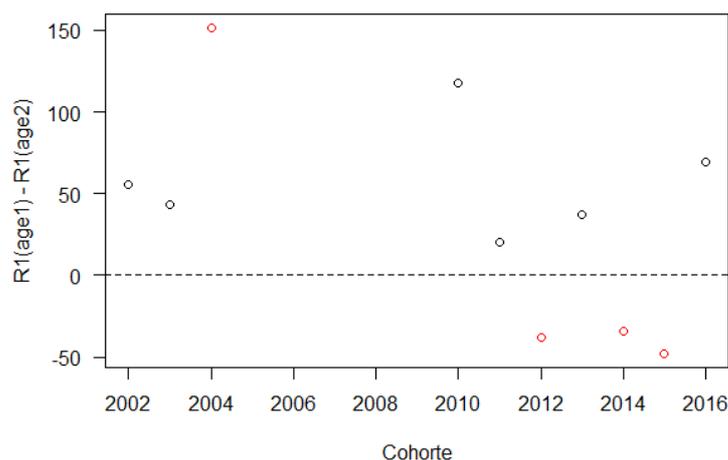


Figure 17 : Différence des moyennes de R1 des âges 1 et 2, pour chaque cohorte. Les points rouges sont les cohortes qui ont présenté une différence significative de R1 entre les âges, par l'analyse du modèle linéaire.

Tableau 5 : Impact de l'âge et de la cohorte sur les variations de R1.

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	p-value
Age	1	181663	181663	16.331	<0.001
Cohorte	13	4501108	346239	31.126	<0.001
Age : Cohorte	9	1035177	115020	10.340	<0.001

Les abréviations représentent : Df : degré de liberté, Sum Sq (SS, somme des carrés) : mesure de distance entre chaque point et la moyenne globale, Mean Sq (MS, moyenne des carrés) : SS/Df , SE : écart-type, F-value : rapport entre variations intra et intergroupe ($MS/Résidus$), et p-value : probabilité critique

5. Comparaison aux données environnementales

5.1. Biomasse estimée, captures de sardines et température dans le Golfe de Gascogne

Nous utiliserons la biomasse de sardine estimée durant la campagne PELGAS (ICES, 2018) puisque celle-ci est plus intégratrice des caractéristiques de la population ; elle représente non seulement le nombre d'individus (coefficient de corrélation $r = 0.772$), mais aussi leur taille et leur poids.

La biomasse de sardines estimée dans le Golfe de Gascogne varie fortement mais il n'y a pas d'effet significatif entre l'année et la biomasse estimée (Fig. 18A ; population-aux-âges en Annexe 18). On n'observe pas de tendance particulière dans l'évolution de la biomasse, comme on peut également le voir par l'analyse statistique (modèle linéaire : $\beta = -1111 \pm 6120$ (SE), $t = -0.181$, $P = 0.858$).

Les captures de sardines par les flottes françaises et espagnoles, dans le Golfe de Gascogne augmentent clairement depuis l'an 2000 (modèle linéaire : $\beta = 1145.7 \pm 191.1$ (SE), $t = 5.994$, $P < 0.001$; Fig. 18B ; captures-aux-âges en Annexe 19).

Pour la température, nous avons d'abord voulu voir l'évolution annuelle moyenne dans le Golfe de Gascogne (Annexe 20) mais cette approche ne nous a pas semblée pertinente étant donnée les variations de température très importantes au cours d'une année. La croissance des sardines, pendant la première année, est supposée avoir lieu essentiellement entre juin et novembre puisque la ponte principale se termine en mai. Nous avons donc regardé l'évolution de la température sur cette période (Fig. 18C). Ainsi, on remarque que les variations de température ne correspondent pas forcément à celles de la croissance.

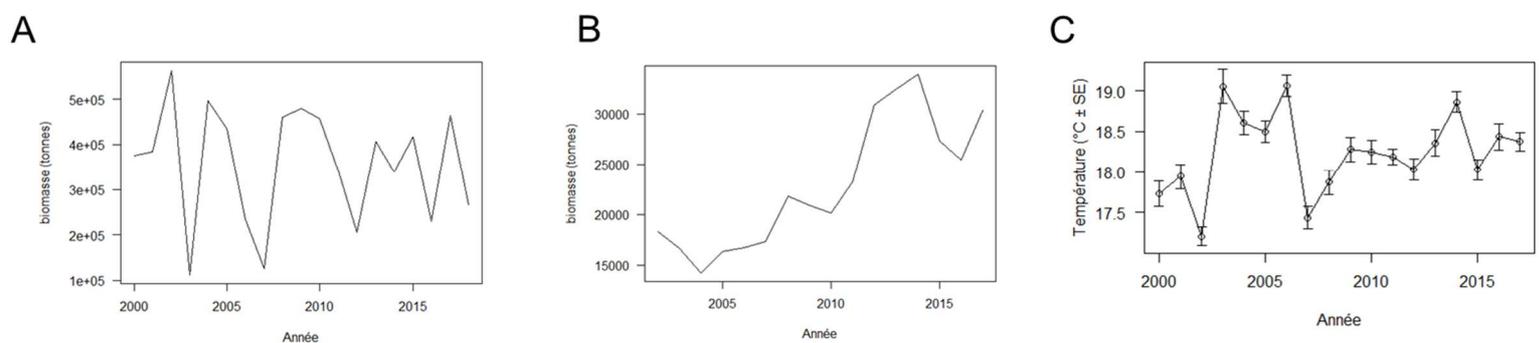


Figure 18 : Changements de trois facteurs au cours du temps pouvant influencer la croissance et la mortalité des sardines du Golfe de Gascogne : biomasse de sardines estimée par acoustique pendant la campagne PELGAS (A), captures de sardines, par les flottes françaises et espagnoles (B), et température moyenne pendant la période de croissance (C).

5.2. Liens avec la croissance et la mortalité sélective

Le faible nombre de cohortes ($N = 10$), ne nous permet pas d'analyser ces variables environnementales et de pêche dans un même modèle linéaire. Pour une première approche, nous les analyserons donc séparément. Nous verrons si ces trois paramètres ont un impact sur la croissance à la première année (R1 des âges 1) et/ou sur la mortalité sélective (différence entre la moyenne des R1 à l'âge 1 et celle des R1 à l'âge 2).

Nous n'avons pas trouvé d'effet significative de la biomasse de sardine estimée durant la campagne PELGAS avec la moyenne des R1 à l'âge 1 (modèle linéaire : $\beta = 7.408 \cdot 10^{-5} \pm 2.032 \cdot 10^{-4}$ (SE), $t = -0.364$ $P = 0.723$; Fig. 19A) ni avec la mortalité sélective (modèle linéaire : $\beta = 9.057 \cdot 10^{-5} \pm 1.834 \cdot 10^{-4}$ (SE), $t = -0.494$ $P = 0.635$; Fig 20A).

Nous avons donc observé une augmentation globale des captures de sardines au cours des années ; selon les critères de sélection des pêcheurs sur la taille, cela pourrait influencer sur la mortalité des sardines. Néanmoins, nous n'avons pas trouvé d'effet significatif de cette variable sur la croissance à la première année ($\beta = -3.680.10^{-3} \pm 3.457.10^{-3}$ (SE), $t = -1.065$, $P = 0.315$; Fig 19B) ni sur la différence des R1 à l'âge 1 et à l'âge 2 ($\beta = -0.004 \pm 0.003$ (SE), $t = -1.527$, $P = 0.165$; Fig. 20B). En revanche, lorsqu'on fait le même test en utilisant le nombre total d'individus pêchés, il semblerait que la pêche soit (légèrement) liée à la mortalité sélective ($\beta = -2.407.10^{-7} \pm 8.154.10^{-8}$ (SE), $t = -2.952$, $P = 0.021$; Annexe 21).

Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif de la température moyenne de la période juin-novembre aux années n-1 sur les R1 (modèle linéaire : $\beta = 25.45 \pm 72.37$ (SE), $t = 0.352$, $P = 0.733$; Fig 19C). Il n'y a pas non plus d'effet de la température sur la différence des moyennes de R1 aux âges 1 et 2 (modèle linéaire : $\beta = 40.24 \pm 68.61$ (SE), $t = 0.586$, $P = 0.574$; Fig 20C). Pour plus de précision, nous avons également regardé l'évolution journalière de la température, pour chaque année influençant les individus du jeu de données (Annexe 22). Mais elle n'explique pas non plus la faible croissance pendant plusieurs années consécutives.

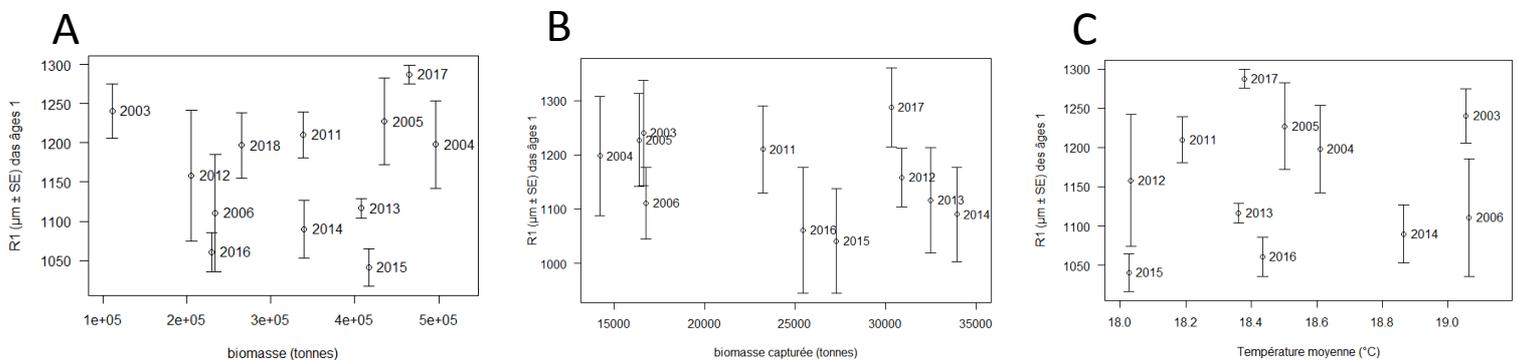


Figure 19 : Rapport entre la moyenne des R1, à l'âge 1 et : (A) la biomasse estimée par PELGAS, (B) les captures et (C) la température moyenne (juin-novembre).

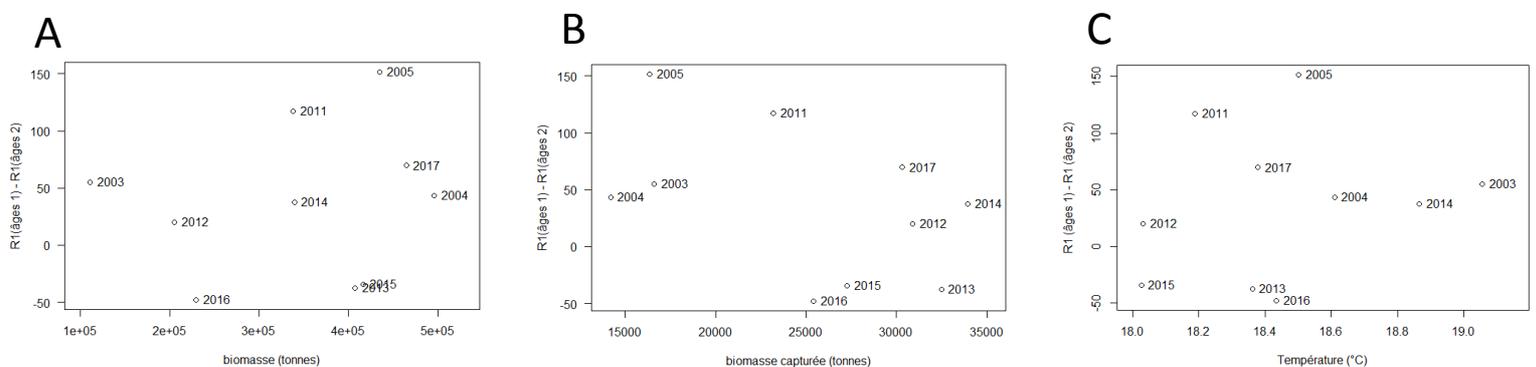


Figure 20 : Rapport entre la différence de moyennes des R1 (en µm) à l'âge 1 et à l'âge 2 et : (A) la biomasse estimée par PELGAS, (B) les captures et (C) la température moyenne (juin-novembre).

III – Discussion

Dans un premier temps, nous avons bien confirmé le rapport entre la taille des sardines et le rayon de leurs otolithes. Les modifications de croissance des otolithes représentent donc bien les modifications de taille des individus. Cependant, il y a une augmentation de la variance de cette relation avec la taille et donc potentiellement avec l'âge. Cela suggère que les otolithes ont une croissance constante mais en raison de l'influence de l'environnement sur la croissance du corps ou sur la reproduction, la vitesse de croissance des individus peut fortement varier.

La distribution des R1 suggère une ponte étendue dans le temps mais avec un seul pic de reproduction. Il y a un petit groupe d'individus très petits qui est très probablement issu de pontes d'automne, mais la grande majorité des sardines semble issue des pontes de printemps-été. Cette observation correspond bien aux résultats de Stratoudakis *et al.* (2007) : un pic de ponte au printemps (avril-mai) qui s'étend jusqu'en automne avec une plus faible intensité, ou du moins, une plus faible survie. D'une année à l'autre (et d'une zone à l'autre), le pic de ponte peut avoir lieu à des périodes légèrement différentes puisque la période de ponte dépend essentiellement de la température. Cependant, toutes les années ont une distribution unimodale des R1.

On a ensuite montré que la croissance se fait principalement aux âges 1 et 2 et décline très clairement aux âges suivants. Ce déclin de la croissance est un phénomène universel qui est dû à la nécessité d'investir de l'énergie dans les autres grandes fonctions (reproduction, maintenance somatique). Il est cependant remarquable que les individus ayant une très forte croissance à l'âge 1 ont une croissance très faible à l'âge 2 (et inversement). Ce compromis de croissance-aux-âges peut s'expliquer par le fait que les sardines qui grandissent bien la première année vont investir leur énergie dans la reproduction, au détriment de la croissance (Dmitriew, 2011 ; Brosset, 2017). Et donc, celles qui ont peu grandi vont continuer à utiliser leur énergie pour la croissance et se reproduire peu durant la seconde année. Il est également possible que les sardines utilisent leur environnement différemment : celles qui ont eu une croissance lente resteraient dans les milieux où la nourriture est abondante alors que les autres se dirigeraient vers des zones de reproduction. Cette hypothèse est partiellement

confirmée par la pente plus faible de cette relation pour les individus échantillonnés en G1 (Sud), qui est la zone dans laquelle il y a une forte reproduction (Annexe 23).

Contrairement à l'hypothèse initialement avancée, nous avons constaté que le déclin du taux de croissance n'était pas continu : après une période de déclin (2005-2015), la croissance à l'âge 1 des sardines a augmenté en 2016-2017. Ainsi, il apparaît clairement que la diminution de la taille-aux-âges est dû à un déclin de la croissance des individus et qu'un ou plusieurs facteurs écologiques limiteraient la croissance des sardines. Nous n'avons pas trouvé de relation significative entre la croissance durant la première année et la température moyenne durant cette période de croissance (juin-novembre). Mais cet indice (température moyenne) est très agrégé, les températures extrêmes ou la variation de température au sein d'une année pouvant très clairement limiter la croissance des sardines. De plus, la température n'est qu'un facteur environnemental parmi d'autres (salinité, quantité/qualité de nourriture, etc.) et d'autres analyses sont nécessaires pour identifier le(s) facteur(s) limitant la croissance des sardines. Par exemple, Van Beveren *et al.* (2014) ont mis en évidence un déclin de la biomasse des sardines dans le Golfe du Lion dû à des modifications de la quantité/qualité de la production de planctons. Le problème des indicateurs de biomasse (estimée et pêchée) est qu'ils concernent l'ensemble du Golfe de Gascogne et ne permettent donc pas d'étudier les effets locaux de compétition ou de pression de pêche. D'autre part, nous avons noté une correspondance entre la période présentant un fort déclin de croissance (2013-2016) et une période de diminution du nombre d'œufs de 2012 à 2016 (ICES, 2017 ; Annexe 24). Et, en effet, une bonne croissance peut également être visible par une bonne reproduction et donc par un stock d'œufs important. On peut alors supposer que cette diminution du nombre d'œufs reflète une fécondité plus faible de la population due à une plus faible croissance individuelle. Il se pourrait aussi qu'un nombre élevé d'œufs favorise leur survie. Les facteurs pouvant impacter la croissance des individus sont multiples et il est possible que ce soit ces facteurs cumulés qui soient la cause de ce phénomène. Il est donc complexe de trouver les raisons précises de ces épisodes de diminution de croissance.

Contrairement à l'anchois du Golfe de Gascogne, pour lequel il y a une mortalité sélective des individus à croissance rapide (Petitgas *et al.*, 2012), on observe pour la sardine une mortalité sélective liée à la croissance qui peut avoir lieu dans les deux sens (soit des individus à croissance rapide, soit de ceux à croissance lente) ou bien même aucune mortalité sélective. Ainsi, quand les individus de la cohorte sont en moyenne petits, les plus petits

d'entre eux vont mourir, ce qui fait augmenter la moyenne des R1 mesurés à l'âge 2. A l'inverse, lorsque les individus de la cohorte sont plutôt grands en moyenne, les plus grands vont mourir, ce qui fait diminuer la moyenne des R1 mesurés à l'âge 2. Il s'agirait donc d'une sélection fluctuante (par ex. Mappes *et al.*, 2008 ; Tarwater & Beissinger, 2013). Classiquement, la mortalité en milieu naturel est due (1) à un manque de réserves énergétiques (disponibilité en planctons) empêchant les individus de faire face aux conditions environnementales, (2) à la prédation ou (3) à la pêche. Nous n'avons pas trouvé d'effet de la pêche et de la température moyenne durant le développement sur le degré de mortalité sélective. D'un côté, il est peu probable que la pêche soit fortement sélective, puisque tous les individus d'un banc sont capturés par les chaluts pélagiques. En revanche, le choix de la zone et de la période de pêche peut permettre le ciblage de la pêche sur certaines tailles en fonction du marché, qui peut varier. En effet, si la sardine est destinée à être vendue en tant que poisson frais, les pêcheurs vont préférer les individus de petite taille. Alors que les conserveries, par exemple, peuvent davantage vouloir des sardines de taille et taux de graisse spécifiques. L'attente du marché pouvant changer d'une année sur l'autre, cela pourrait expliquer ces mortalités sélectives dans un sens ou dans l'autre selon les périodes. Donc, au-delà du nombre total d'individus pêchés, il serait important de prendre en compte le lieu où les sardines ont été pêchées.

L'environnement en général peut avoir un effet important sur la survie des poissons. Pourtant nous n'avons pas trouvé d'effet de la température moyenne sur la mortalité sélective des sardines ; ce qui s'explique par le fait que cette mesure ne donne qu'un aperçu des conditions environnementales expérimentées par les poissons. De plus, il est important de noter que nous avons mesuré la mortalité sélective (c'est-à-dire entraînant un changement de taille), ce qui ne reflète pas forcément les variations de mortalité naturelle qui elles peuvent être plus fortement liées à l'environnement. Enfin, il serait important de prendre aussi en compte la pression de prédation, puisqu'elle peut avoir un effet important sur les populations de leurs proies. En effet, la taille des poissons capturés par les prédateurs dépend de la taille de ces même prédateurs et un changement dans leur communauté peut induire une modification de la taille des sardines mangées. La prédation et le manque de réserves énergétiques sont intimement liées puisqu'un poisson a plus de chance d'être capturé par un prédateur s'il a de faibles réserves énergétiques. Selon la zone et l'habitat, la catégorie de sardines la plus atteinte par la mortalité naturelle pourrait donc changer. Néanmoins, il est

important de noter que la plupart des différences de moyennes ne sont pas significatives, donc ces variations peuvent très bien représenter un bruit de fond sans qu'il y ait véritablement de mortalité sélective (seuls quatre comparaisons sont significatives : une décrivant la disparition des individus les plus grands, trois décrivant la disparition des individus les plus petits ; Fig. 17). De plus, certaines années (2003 et 2007) ont été mal échantillonnées (canicules, problèmes durant la campagne, donc sardines peu pêchées) ce qui pourrait avoir un effet sur la précision de la comparaison de moyennes de R1 aux âges 1 et 2.

La limite principale de notre étude est le petit nombre d'échantillons analysés. En effet, on ne traite, en général, qu'une station par zone, par année, ce qui fait environ 200 individus par an alors que les données brutes de PELGAS en contiennent, environ, entre 1000 et 1500 par année. De plus, on ne traite pas toutes les années (pas de donnée avant 2003 et trou entre 2006 et 2011), ce qui empêche d'avoir une vision globale et progressive des changements de croissance et de mortalité sélective. Même à plus grande échelle, au niveau de la campagne PELGAS, la capturabilité est variable selon les zones et les périodes. Par exemple, les pêches peuvent être trop en surface ou trop côtières, ce qui peut biaiser la vision globale de la population de sardines. Il y a également un certain degré d'erreur au niveau de la mesure des rayons de croissance des otolithes. D'une personne à l'autre l'âge estimé peut varier, mais surtout on ne trouve jamais exactement les mêmes longueurs lors des mesures de rayon. Il est donc essentiel, tout d'abord de se mettre d'accord sur l'âge avec plusieurs lecteurs, mais aussi que toutes les mesures soient effectuées par la même personne afin d'avoir une cohérence lors de l'analyse des données. Afin d'estimer la précision des mesures, on pourrait également réaliser les mesures plusieurs fois sur les mêmes otolithes afin d'évaluer la répétabilité.

En perspectives, il serait indispensable d'analyser plus d'échantillons afin de mettre davantage en évidence les effets spatiaux, mais également pour avoir un suivi temporel plus complet. Ceci permettrait également d'avoir plus de cohorte pour confirmer l'importance (ou non) de la mortalité sélective dans les changements de taille-aux-âges. De plus, il serait intéressant de réaliser les mêmes analyses sur différentes espèces (ex : anchois) afin de les comparer. Ceci permettrait une meilleure compréhension des effets de l'écosystème comme, par exemple, l'effet de la position dans la chaîne trophique.

Conclusion

A travers cette étude, nous avons tout d'abord pu confirmer le rapport entre la taille de la sardine et le rayon de ses otolithes. Par ce fait, le suivi de la croissance des sardines à partir de leurs otolithes était possible. On sait également que la croissance de l'otolithe, la première année, va déterminer, d'une part, le type de croissance de l'individu et, d'autre part, sa croissance tout au long de sa vie, par rapport aux autres individus.

En ce qui concerne la diminution globale de la taille des sardines, nous avons pu constater qu'il ne s'agissait que de périodes et donc que ce déclin de croissance a davantage lieu sur certaines générations. L'hypothèse initialement émise était qu'il y a une disparition sélective des plus grands individus. Or, on a pu voir que ce n'était pas toujours le cas. En effet, on remarque parfois une mortalité des individus à croissance rapide, parfois de ceux à croissance lente, ou même aucune. Les causes de ces variations (pêche ou environnement) restent à identifier puisque nous n'avons pas trouvé de rapport direct entre les variations de croissance et de mortalité sélective et les paramètres testés (biomasse de sardine, biomasse pêchée, température moyenne pendant la croissance). Mais, à priori, le déclin de la taille-aux-âges serait plutôt la conséquence d'une diminution de la croissance à l'âge 1 partiellement compensée aux âges suivants, mais entraînant quand même une diminution de la taille des individus. La mortalité sélective, elle, semble être particulièrement forte quand les cohortes sont en moyenne de petites tailles et défavoriserait les individus les plus petits ; ainsi cela pourrait expliquer en partie le rebond des tailles-aux-âges dans les années 2016-2017. Il serait donc important d'approfondir ces recherches en faisant intervenir différents facteurs, bien qu'évaluer les interactions de ces derniers nécessitera beaucoup d'échantillons.

Personnellement, ce stage m'a permis de suivre et d'effectuer les différentes étapes d'une étude dans le domaine halieutique : l'acquisition du matériel biologique en participant à une campagne scientifique en mer, l'acquisition des données en laboratoire et enfin le traitement des données. De ce fait, ce fut une expérience très enrichissante. La découverte de la vie en mer fut un réel plaisir pour moi. En ce qui concerne l'utilisation de logiciels informatiques, j'ai pu découvrir un nouveau logiciel de traitement d'images (Visilog), mais surtout, la manipulation du langage R m'a permis de mieux le maîtriser. En somme, j'ai développé un réel intérêt pour le domaine halieutique.

Références bibliographiques

- Bernal, M., Stratoudakis, Y., Coombs, S., Angelico, M.M., Lago de Lanzo´s, A., Porteiro, C., Sagarminaga, Y., Santos, M., Uriarte, A., Cunha, E., Valde´s, L., Borchers, D., 2007. Sardine spawning off the European Atlantic coast: Characterization of and spatio-temporal variability in spawning habitat. *Progress in Oceanography* 74: 210-227.
- Brosset, P., Lloret, J., Muñoz, M., Fauvel, C., Van Beveren, E., Marques, V., Fromentin, J.M., Ménard, F., Saraux, C., 2017. Body reserves mediate trade-offs between life-history traits : new insights from small pelagic fish reproduction. *Royal Society Open Science* 3: 160202.
- Campana, S.E. & Thorrold, S.R., 2001. Otolths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 30-38.
- Dmitriew, C.M., 2011. The evolution of growth trajectories: what limits growth rate? *Biological Rev.* 86: 97-116
- Doray, M., Petitgas, P., Huret, M., Duhamel, E., Romagnan, J.B., Authier, M., Dupuy, C., Spitz, J., 2018. Monitoring small pelagic fish in the Bay of Biscay ecosystem using indicators from an integrated survey. *Progress in Oceanography* 166: 168-188.
- Edeline, E., Carlson, S.M., Stige, L.C., Winfield, I.J., Fletcher, J.M., James, J.B., Haugen, T.O., Vøllestad, L.A, Stenseth, N.C., 2007. Trait changes in a harvested population are driven by a dynamic tug-of-war between natural and harvest selection. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104: 15799–15804.
- Ernande, B., Dieckmann, U., Heino, M., 2004. Adaptive changes in harvested populations: plasticity and evolution of age and size at maturation. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 271: 415–423.
- Furnestin, J., 1943. Contribution à l'étude biologique de la sardine Atlantique. 160p.
- Heino, M., Baulier, L., Boukal, D.S., Ernande, B., Johnston, F.D., Mollet, F.M., Pardoe, H., Therkildsen, N.O., Uusi-Heikkilä, S., Vainikka, A., Arlinghaus, R., Dankel, D.J., Dunlop, E.S., Eikeset, A.M., Enberg, K., Engelhard, G.H., Jørgensen, C., Laugen, A.T., Matsumura, S., Nusslé, S., Urbach, D., Whitlock, R., Rijnsdorp, A.D., Dieckmann, U., 2013. Can fisheries-induced evolution shift reference points for fisheries management? *ICES J. Mar. Sci.* 70: 707–721.
- ICES, 2010a. Report of the Working Group on Anchovy and Sardine (WGANSA). Vigo, Spain. 295p.
- ICES, 2017. Report of the Working Group on Southern Horse Mackerel, Anchovy and Sardine (WGHANSA). Bilbao, Spain. 548p.
- ICES 2018. Report of the Working Group on Southern Horse Mackerel, Anchovy and Sardine (WGHANSA). Lisbon, Portugal. 607p.
- Law, R., 2000. Fishing, selection, and phenotypic evolution. *ICES J. Mar. Sci.* 57: 659–668.
- Lee, R. M., 1912. An investigation into the methods of Growth determination in fishes by means of scales. *ICES J. Mar. Sci.* Volume S1: 3–34.
- Massé, J., Sanchez, F., Delaunay, D., Robert, J.M., Petitgas, P., 2016. A partnership between science and industry for a monitoring of anchovy & sardine in the Bay of Biscay: When fishermen are actors of science. *Fisheries Research* 178: 26-38.
- Mappes, T., Koivula, M., Koskela, E., Oksanen, T.A., Savolainen, T., Sinervo, B., 2008. Frequency and density-dependent selection on life-history strategies - a field experiment. *PLoS one* 3(2): e1687.

- Mille, T., 2015. Sources de variation intra-populationnelle de la morphologie des otolithes : asymétrie directionnelle et régime alimentaire. Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, France. 236p.
- Ohlberger, J., 2013. Climate warming and ectotherm body size - from individual physiology to community ecology. *Funct. Ecol.* 27: 991–1001.
- Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H., Wright, P.J., 2002. Manual of Fish Sclerochronology. Ifremer-IRD coedition, Brest, France. 464p.
- Petitgas, P., Grellier, P., Duhamel, E., Huret, M., Massé, J., Doray, M., 2012. Variability and controls of otolith growth in the anchovy of the Bay of Biscay. *ICES CM* 2012/J:18. 15p.
- Petitgas, P., Huret, M., Dupuy, C., Spitz, J., Authier, M., Romagnan, J.B., Doray, M., 2017. Ecosystem spatial structure revealed by integrated survey data. *Progress in Oceanography*. 10p.
- Petitgas, P., Secor, D.H., McQuinn, I., Huse, G., Lo, N., 2010. Stock collapses and their recovery: mechanisms that establish and maintain life-cycle closure in space and time. *ICES J. Mar. Sci.* 67: 1841-1848.
- R Core Team, 2017. R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Silva, A., Carrera, P., Massé, J., Uriarte, A., Santos, M.B., Oliveira, P.B., Soares, E., Porteiro, C., Stratoudakis, Y., 2008. Geographic variability of sardine growth across the northeastern Atlantic and the Mediterranean Sea. *Fisheries Research* 90: 56-69.
- Silva, A., Santos, M. B., Caneco, B., Pestana, G., Porteiro, C., Carrera, P., Stratoudakis, Y., 2006. Temporal and geographic variability of sardine maturity at length in the northeastern Atlantic and the western Mediterranean. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 663-676.
- Soares, E., Silva, A., Morais, A., 2005. Report of the Workshop on Sardine otolith age reading and biology. IPIMAR, Lisbon, Portugal. 86p.
- Stearns, S.C., 1992. The evolution of life histories. Oxford University Press. 249p.
- Stratoudakis, Y., Coombs, S., Lago de Lanzós, A., Halliday, N., Costas, G., Caneco, B., Franco, C., Conway, D., Santos, M.B., Silva, A., Bernal, M., 2007. Sardine (*Sardina pilchardus*) spawning seasonality in European waters of the northeast Atlantic. *Mar Biol* 152: 201-212.
- Tarwater, C.E. & Beissinger, S.R., 2013. Opposing selection and environmental variation modify optimal timing of breeding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110(38): 15365–15370.
- Van Beveren, E., Bonhommeau, S., Fromentin, J.M., Bigot, J.L., Bourdeix, J.H., Brosset, P., Roos, D., Saraux, C., 2014. Rapid changes in growth, condition, size and age of small pelagic fish in Mediterranean. *Marine Biology* 161: 1809-1822.
- Whitehead, P.J.P., 1985. FAO Species Catalogue. Vol 7. Clupeoid fishes of the world (suborder Clupeioidi). An annotated and illustrated catalogue of the herrings, sardines, pilchards, sprats, shads, anchovies and wolf-herrings. *FAO Fish. Synop.* 125(7/1): 1-303.

Liste des Annexes

- Annexe 1 : La sardine d'Europe (*Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792))
- Annexe 2 : Les otolithes
- Annexe 3 : La campagne PELGAS
- Annexe 4 : Radiales prospectées durant PELGAS 2018, par la Thalassa
- Annexe 5 : Etapes et matériel pour traiter une pêche (tri, PELGAS), en photos
- Annexe 6 : Etablissement de la relation taille/poids, au ½ cm, avec des anchois *E. encrasicolus* (photo)
- Annexe 7 : Echelle de maturité des petits pélagiques
- Annexe 8 : Echelle de l'état d'engraissement de la sardine
- Annexe 9 : Echelle du parasitage de la sardine, par *Anisakis sp.*
- Annexe 10 : Photos d'otolithes représentant les âges 1 à 6
- Annexe 11 : Extrait du tableau de données
- Annexe 12 : Pêches durant la campagne PELGAS de 2018 (ICES, 2018)
- Annexe 13 : Compromis des croissances-aux-âges : différenciation des zones
- Annexe 14 : Compromis des croissances-aux-âges : différenciation des années
- Annexe 15 : Evolution de la croissance des individus d'âge 2
- Annexe 16 : Suivi des cohortes
- Annexe 17 : Nombres d'individus de chaque âge, pour chaque cohorte
- Annexe 18 : Population-aux-âges de sardines, dans le Golfe de Gascogne
- Annexe 19 : Captures-aux-âges de sardines, dans le Golfe de Gascogne
- Annexe 20 : Evolution de la température annuelle dans le Golfe de Gascogne
- Annexe 21 : Rapport entre la différence des moyennes de R1 (entre âges 1 et 2), et le nombre d'individus capturé, par an (ICES, 2017)
- Annexe 22 : Evolution de la température moyenne par jour et par an
- Annexe 23 : Zones de pontes des sardines (PELGAS 2017)
- Annexe 24 : Suivi des pontes de sardines

Annexe 1 : La sardine d'Europe (*Sardina pilchardus* (Walbaum, 1792))

Sardina pilchardus ou sardine européenne appartient à l'ordre des clupéiformes et à la famille des clupéidés. Cet ordre est caractérisé par certains caractères morphologiques tels qu'une ligne latérale réduite, depuis la tête jusqu'à la partie antérieure du tronc, une absence de nageoire épineuse ou adipeuse et la présence d'une nageoire dorsale relativement petite (Whitehead, 1985). C'est une espèce planctonophage (zooplancton) et elle représente une espèce fourrage ; elle est donc au cœur du réseau trophique et permet son bon fonctionnement.

La sardine européenne est présente en Méditerranée, en Atlantique, en Manche et en Mer du Nord [\[1\]](#). Les populations étudiées, ici, sont des sardines d'Atlantique Est, qui sont classifiées comme une sous-espèce appelée *Sardina pilchardus pilchardus* (alors que celles de Méditerranée sont appelées *Sardina pilchardus sardina*), mais qui sont identifiées comme *S. pilchardus* dans l'ensemble du rapport. L'étude s'est portée, plus précisément, sur les populations du Golfe de Gascogne.

C'est une espèce pélagique, qui peut vivre sur les côtes et au large (mais reste, en général, sur le plateau continental) en ayant plutôt des déplacements restreints du large vers la côte au printemps et de la côte vers le large à la fin de l'automne (Furnestin, 1943). On peut la trouver jusqu'à 150 m de profondeur, au grand maximum (Bernal *et al.*, 2007). Ceci s'explique par le fait qu'elles effectuent des migrations nyctémérales : elles sont donc généralement en surface la nuit et en profondeur le jour.

S. pilchardus peut vivre en général jusqu'à neuf ans mais il existe des exceptions jusqu'à quatorze ans (Soares *et al.*, 2005). Sa maturité sexuelle est atteinte lorsqu'elle mesure entre 10,9 et 16,8 cm, ce qui correspond à un âge d'un ou deux ans (Silva *et al.*, 2006). La période de ponte est très étalée dans le temps : dans le Golfe de Gascogne, on observe un pic au printemps (mai) mais on trouve encore des œufs en automne. Plus on va vers le sud, plus les pontes eu lieu plutôt en hiver, on dit alors que les sardines sont des « géniteurs hivernaux » (Stratoudakis *et al.*, 2007). Les sardines ont donc une maturité précoce et une ponte fractionnée et étendue dans le temps, ce qui permet la libération de nombreux œufs pélagiques. Il existe également des variations journalières de l'activité de ponte : pic en fin de journée, avec une température optimale aux alentours de 14-15°C dans l'Océan Atlantique (minimum 12°C et maximum 16°C ; Stratoudakis *et al.*, 2007)

[\[1\] doris.ffessm.fr/Especies/Sardina-pilchardus-Sardine-d-Europe-3095](http://doris.ffessm.fr/Especies/Sardina-pilchardus-Sardine-d-Europe-3095)

Il existe donc des migrations dans le cycle de vie de cette espèce, régies par le processus de maturation, lui-même dépendant de la croissance, permettant à l'organisme de trouver des habitats adaptés à ses besoins. En effet, il a été observé des différences d'âge selon la géolocalisation : plutôt des jeunes d'un à deux ans dans le sud du Golfe de Gascogne, dans la partie médiane et septentrionale du Golfe, une majorité de jeunes de deux à trois ans et sur toute l'étendue de la Manche à la mer du Nord, on trouve essentiellement des adultes de plus de trois ans (Furnestin, 1943).

Les captures commerciales de sardine n'ont cessé d'augmenter ces dernières décennies, passant, en France, de 4 367 tonnes en 1983 à 20 627 tonnes en 2009 (ICES, 2010a). Un suivi des stocks est réalisé par l'IFREMER depuis 1983. La taille minimale de commercialisation de *S. pilchardus* est de 11 cm mais on remarque une préférence du marché pour des tailles de 15-16 cm (Silva *et al.*, 2008) ; aucune autre réglementation n'existe pour cette espèce, ce qui peut paraître surprenant étant donné le fort taux de mortalité auquel elle est confrontée, que ce soit naturellement (prédateurs) ou par la pêche.

La sardine (*Sardina pilchardus*) est donc un bon modèle d'étude du déclin de la taille-aux-âges car elle est particulièrement sensible aux modifications de son environnement, tout comme l'anchois (*Engraulis encrasicolus*). Ces deux espèces jouent un rôle primordial dans les écosystèmes marins en raison de leur position intermédiaire dans la chaîne trophique et font l'objet de pêcheries très importantes. Donc mieux comprendre et prédire les fluctuations de biomasse nécessite de bien comprendre les mécanismes impliqués dans la diminution de taille observés chez ces espèces

Annexe 2 : Les otolithes

Les otolithes sont des structures calcifiées d'organismes aquatiques, se trouvant dans l'oreille interne des vertébrés et plus particulièrement chez les poissons téléostéens. Ils permettent l'audition et l'équilibration de l'individu.

On trouve trois sacs de paire d'otolithes, qui diffèrent par leur taille et leur forme : la sagitta (se trouvant dans la saccule), l'astericus (dans le lagena) et le lapillus (dans l'utricule). C'est le sagitta que l'on utilise pour lire l'âge des individus car ce sont les otolithes les plus grands (Panfili *et al.*, 2002) ; dans ce rapport, le terme otolithe désigne donc l'otolithe sagitta. Il existe des différences de forme interspécifiques, ce qui est utile pour la taxonomie, et intraspécifiques qui sont induites par des variations génétiques et environnementales.

On suppose différents facteurs impactant la forme de l'otolithe (Mille, 2015) : des facteurs endogènes (génétique, changements ontogénétiques comme la taille, l'âge le sexe) et des facteurs environnementaux : facteurs abiotiques (température, profondeur, photopériode...) et facteurs biotiques (quantité de nourriture disponible).

Un otolithe est composé d'une partie centrale appelée le nucleus et qui représente l'organisme au stade œuf. La croissance de l'otolithe est continue, elle se fait par dépôt de couches successives. Autour de ce nucleus va s'organiser une matrice d'otoline (protéine fibreuse) sur laquelle va précipiter des cristaux d'aragonite (carbonate de calcium) qui vont être disposés de manière concentrique autour du nucleus. Ce processus est appelé biominéralisation des otolithes. En hiver, la sécrétion d'aragonite est moindre, ce qui va entraîner visuellement des anneaux hyalins (otoline) alors qu'en été, lors de la forte production d'aragonite, l'otolithe paraîtra opaque (blanc). C'est donc grâce à cette différence d'opacité que l'on va pouvoir définir l'âge des individus (exemple : un otolithe composé d'un anneau hyalin appartient à un poisson d'âge 1). Cette méthode permet d'observer les stries annuelles mais il est également possible de voir les stries journalières, soit chez les larves et juvéniles, soit en ponçant un otolithe d'adulte.

Il existe trois disciplines principales autour de l'étude des otolithes (Campana & Thorrold, 2001) :

- L'observation de Reibisch (méthode découverte par Reibisch en 1899) qui consiste à la lecture des anneaux grâce leur rythmicité d'accroissement

- L'étude de la microstructure des otolithes (depuis les années 1970) qui permet de déterminer l'âge en jours des individus, avec une plus grande précision
- L'étude chimique des otolithes (depuis les années 1980) qui permet d'analyser les éléments constituant l'otolithe, reflétant la composition des masses d'eau, et ainsi de retracer la migration d'un individu ou encore son alimentation, grâce une étude isotopique. En effet, un otolithe peut contenir différents éléments associés à plus ou moins de calcium tels que le magnésium, le strontium, le cuivre, le cadmium, le plomb, l'uranium (en des quantités mineures, voire en traces).

Dans le cadre de cette étude, nous nous préoccupons donc des stries annuelles afin de connaître l'âge mais également le taux de croissance entre chaque année.

NB : La campagne PELGAS ayant lieu au printemps, lorsque le bord de l'otolithe est hyalin, on va considérer que cela représente l'hiver passé et donc une année supplémentaire. Si la pêche avait eu lieu en fin d'automne-début d'hiver et que le bord était hyalin, on ne considérerait pas une année car on supposerait que ce serait le début de l'hiver. En général, lors de cette campagne, tous les otolithes récupérés ont le bord hyalin, sauf les âges 1 qui ont déjà repris leur croissance à cette période.

Annexe 3 : La campagne PELGAS

PELGAS est une campagne halieutique organisée chaque année, par l'IFREMER, au mois de mai à bord du navire Thalassa, depuis 2000. Elle mobilise environ 25 scientifiques et 25 hommes d'équipage. Son but est d'étudier l'écosystème pélagique dans son ensemble afin de comprendre les interactions entre les petits poissons pélagiques (principalement l'anchois) et leur environnement.

Les observations sont réalisées selon un réseau de radiales standardisé, s'étendant sur tout le Golfe de Gascogne (de la côte espagnole jusqu'à la pointe de la Bretagne).

Pour cela, on retrouve différentes activités sur la Thalassa :

- L'observation des prédateurs supérieurs : deux observateurs sont postés, du lever au coucher du soleil, sur le toit du navire. Les observations sont restreintes à 180° vers l'avant du navire. Ils notent tout ce qu'ils peuvent distinguer dans ce rayon : oiseaux et mammifères mais également macrodéchets à la surface de l'océan et même tout organisme qui serait visible de leur position (ex : poissons lunes, méduses, etc). En plus de l'espèce (ou du genre) observée, ils notent leur nombre, l'angle par lequel il a surgi, la distance estimée ainsi que l'heure de l'observation afin de pouvoir retrouver les coordonnées de position exactes.

- La prospection acoustique : permet la détection des bancs de poissons pélagiques et coordonne les opérations de mise en pêche, d'observations hydrologiques et d'observations des prédateurs marins. Lorsque des bancs sont détectés, les coordonnées de la zone à chaluter sont notées et les activités des observateurs de prédateurs et du laboratoire d'hydrobiologie sont suspendues. Le navire fait alors demi-tour et la passerelle dirige le filage du chalut.

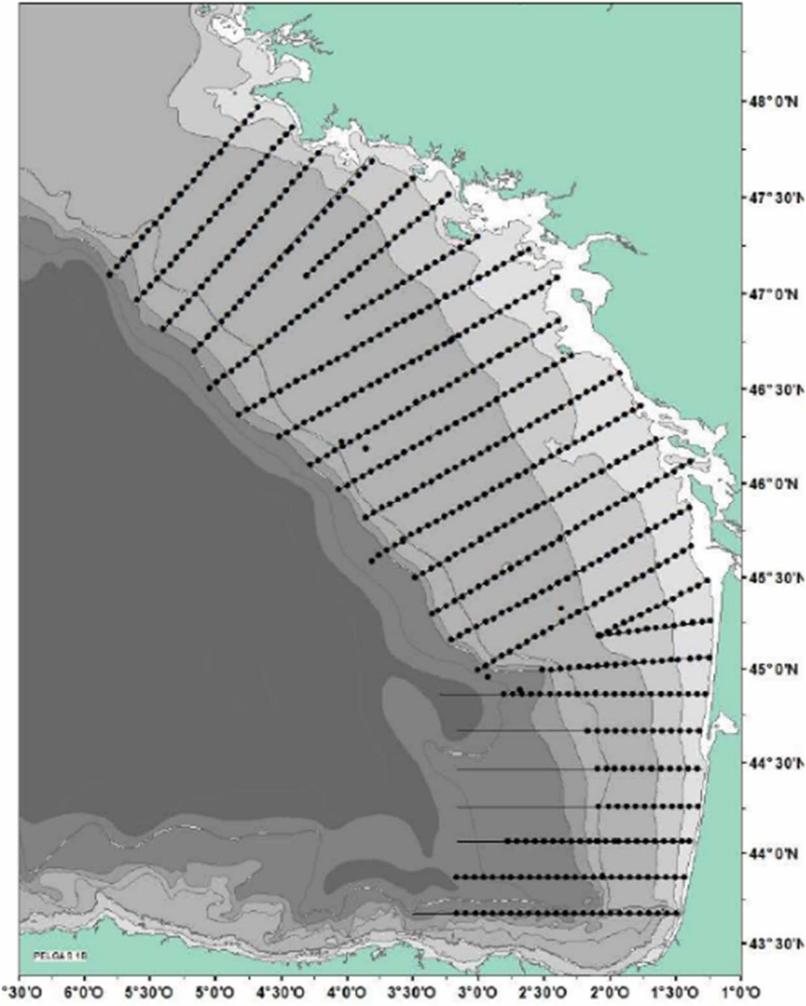
- L'hydrobiologie : 6 à 7 scientifiques se relaient nuit et jour au laboratoire pour effectuer des prélèvements d'eau de mer, d'œufs de poissons et de plancton. Ceux-ci permettent d'étudier le fonctionnement de l'écosystème pélagique dans son ensemble et à chaque niveau trophique afin de connaître les interactions des espèces pélagiques avec leur environnement. Différentes manipulations sont effectuées dans ce laboratoire : les CUFES (Continuous Underwater Fish Eggs Survey) qui sont réalisés tous les 3 milles, il s'agit d'un système de pompage en continu des œufs de poissons, à 5 mètres de profondeur. Des prélèvements d'eau sont réalisés par bathysonde à différentes profondeurs, la nuit, à des stations fixes (en général tous les 10 milles) ; l'eau récupérée est filtrée et conditionnée au

froid en attendant l'analyse des sels nutritifs, azote, phosphore, silicium et sodium, à terre. Un filet à plancton, possédant trois collecteurs, est également utilisé, la nuit, pour récupérer de l'eau de mer à des profondeurs déterminées ; cette eau est tamisée puis filtrée à différentes mailles pour retenir des particules de différentes tailles et différentes espèces de plancton. Un ZooCam est utilisé pour l'identification du plancton, il s'agit d'un instrument d'imagerie/logiciels d'analyse de l'image, permettant d'obtenir une classification semi-automatisée des organismes.

- La pêche et la collecte de paramètres biologiques : tri des pêches (lancées par l'équipe acoustique) par espèce, biométrie, réalisation de relation taille/poids. On récolte également des paramètres biologiques chez l'anchois et la sardine : taille, poids, sexe, maturité, graisse, parasitisme. On extrait également les otolithes de ces deux espèces pour déterminer leur âge. Sur une grande partie de la campagne, un navire de pêche professionnelle accompagne la Thalassa afin d'augmenter le nombre de pêche et ainsi obtenir un jeu de données plus important et donc améliorer la qualité des estimations de populations des différentes espèces pêchées. Grâce à un système de touline, l'équipe de la salle de tri récupère également d'autres échantillons de sardines et d'anchois, ce qui permet d'acquérir davantage de données biologiques et donc aussi d'extraire plus d'otolithes.

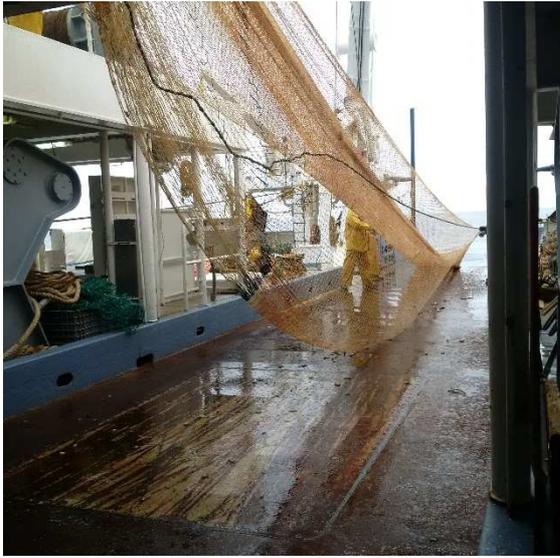
Les espèces les plus couramment observées étaient l'anchois *Engraulis encrasicolus*, la sardine *Sardina pilchardus*, le maquereau commun *Scomber scombrus*, le maquereau espagnol *Scomber colias*, le chinchard commun *Trachurus trachurus*, le sprat *Sprattus sprattus* et également des crabes nageurs *Polybius sp.*. Moins fréquemment, il y avait également le chinchard à queue jaune *Trachurus mediterraneus*, le mullet porc *Liza ramada*, le merlan *Merlangius merlangus*, le merlu commun *Merluccius merluccius*, le bar *Dicentrarchus labrax*, l'orphie *Belone belone*, le poisson lune *Mola mola* et aussi des gélatineux (méduses, salpes) et des larves.

Annexe 4 : Radiales prospectées durant PELGAS 2018, par la Thalassa



(source : ICES, 2018)

Annexe 5 : Etapes et matériel pour traiter une pêche (tri, PELGAS), en photos



1 : remontée du chalut



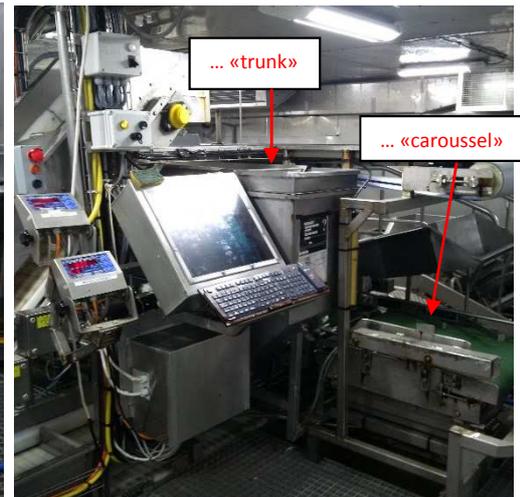
2 : démaillage des poissons et versement dans le trunk



3 : poissons pêchés, dans le trunk



4 : tapis roulant acheminant le poisson du trunk à la balance



5 : balances ...



6 : tapis de tri



Annexe 6 : Etablissement de la relation taille/poids, au $\frac{1}{2}$ cm, avec des anchois *E. encrasicolus* (photo)



Annexe 7 : Echelle de maturité des petits pélagiques

stade	activité	Nom du stade	femelles		Males	
1	Inactif	Immature ou Repos				
2		Développement				
3	Actif	Ponte imminente				
4		Ponte				
5		Post-ponte partielle				
6	inactive	Post-ponte				

Echelle de maturité des petits pélagiques sardine et anchois à partir de janvier 2009

stade	activité	Nom du stade	femelles	Males
1	Inactif	Immature ou Repos	Gonades invisibles ou de très petite taille dans le cas des immatures, ou translucide à très faiblement colorés dans le cas du repos. Même dans ce dernier cas, les gonades sont de petite taille.	
2		Développement	Les gonades occupent 1/4 à 1/3 de la cavité viscérale. Couleur rosée à jaune. Pas d'oocytes visibles.	Les gonades occupent environ 1/3 de la cavité viscérale. Couleur blanchâtre à grisée.
3	Actif	Ponte imminente	Les gonades occupent plus de 3/4 de la cavité viscérale. Apparence opaque avec coloration jaune à orange. Des oocytes opaques sont visibles.	Couleur blanche à crème, d'environ 2/3 de la cavité viscérale. Sous une faible pression, le sperme n'est pas expulsé.
4		Ponte	Les gonades, très larges, occupent toute la cavité viscérale : apparence partiellement ou totalement translucide avec un aspect hydraté/gélatineux. Des oocytes hyalins sont visibles.	Occupation de toute la cavité viscérale, sous une légère pression, le sperme est expulsé.
5		Post-ponte partielle	Taille de 1/2 à 3/4 de la cavité viscérale. Zones hémorragiques, couleur sanguine mais des oocytes sont visibles.	Les gonades occupent jusqu'à 2/3 de la cavité. Coloration brunâtre/rougeâtre.
6	inactive	Post-ponte	Rétrécissement des gonades, taille inférieure aux 2/3 de la cavité. Aspect flasque, aux contours n'étant parfois plus très réguliers. Le côté sanguin diminue peu à peu.	Gonades flasques et vidées avec un aspect hémorragique diminuant peu à peu.

Annexe 8 : Echelle de l'état d'engraissement de la sardine

1	No fat / very low fat	Not fat or a thin thread of fat along the intestine
2	Medium fat	A thicker layer of fat which does not cover the whole intestine
3	Fat	The whole digestive tube covered by a thick layer of fat
4	High fat	Visceral cavity entirely full with fat

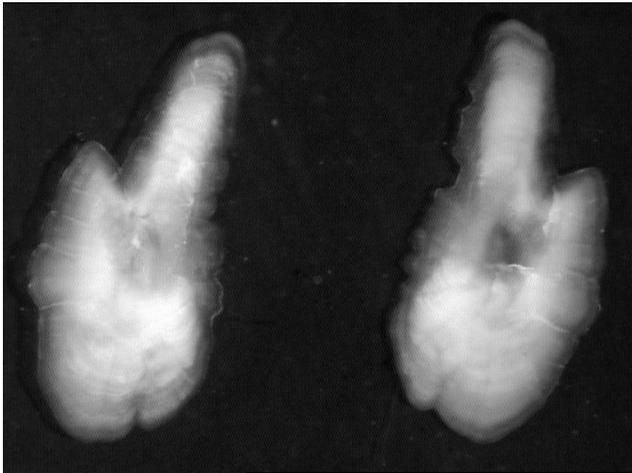
Annexe 18b : Clé de détermination de l'état d'engraissement.

Annexe 9 : Echelle du parasitage de la sardine, par *Anisakis sp.*

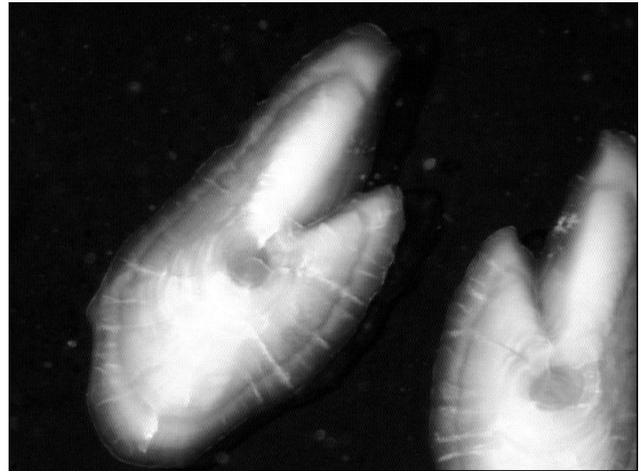
0	Pas d' <i>anisakis sp.</i>
1	1 à 10 <i>anisakis sp.</i>
2	10 à 20 <i>anisakis sp.</i>
3	Plus de 20 <i>anisakis sp.</i>

Annexe 18a : Clé de détermination du parasitage par *anisakis sp.*

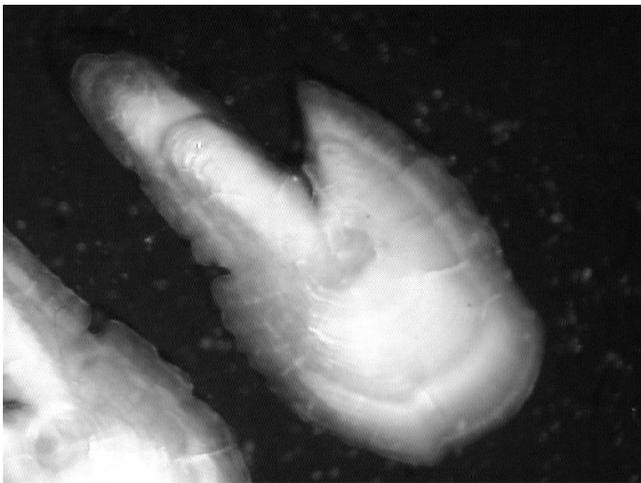
Annexe 10 : Photos d'otolithes représentant les âges 1 à 6



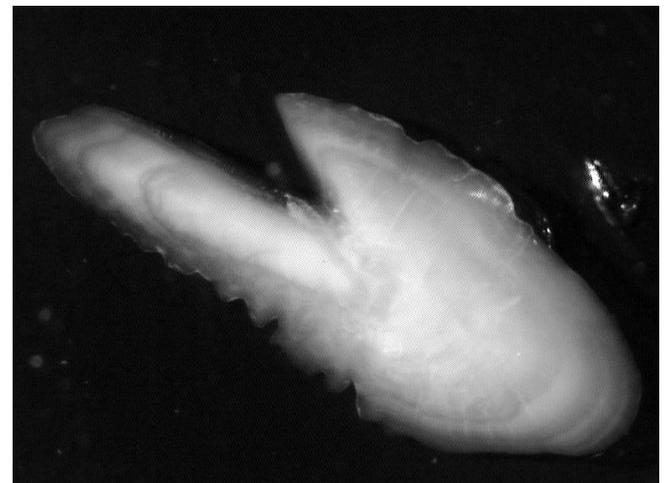
Age 1



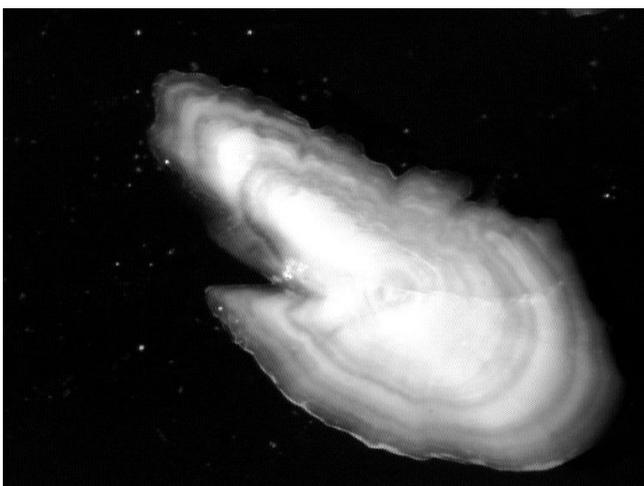
Age 2



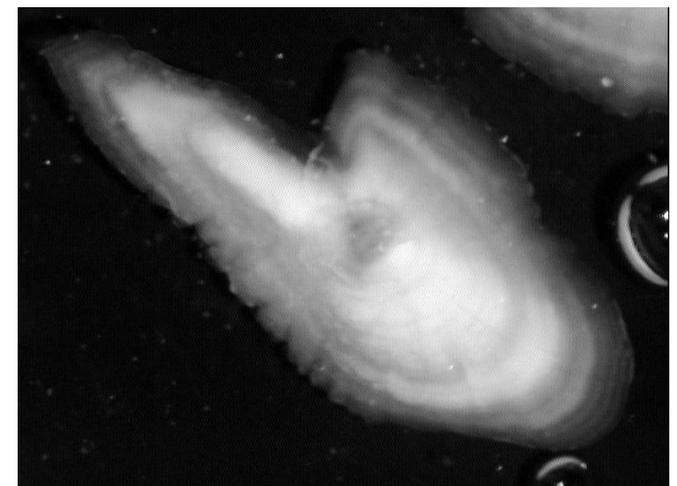
Age 3



Age 4



Age 5



Age 6

Annexe 11 : Extrait du tableau de données

Date	Station	Zone	Chalut	Poisson N°	Longueur cm	Sexe	Poids gr	Maturité	Age	Fiabilité 0/1/2	Bord H/O	Rayons aux vrais anneaux, Radius of true rings					Rayon Long T μm	Rayon Larg T μm
Date	Station	Zone	Trawl	Fish N°	Length cm	Sex	Weight gr	Maturity	determination	Reliability	Edge	R1 μm	R2 μm	R3 μm	R4 μm	R5 μm	Radius T μm	μm
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A1	17,0	F	48	2	1	0	-1	1215,58					1343,23	589,36
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A2	17,0	F	43	2	1	0	-1	1216,58					1335,96	511,96
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A3	17,5	F	50	2	1	0	-1	1319,06					1427,25	638,22
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A4	17,5	F	50	3	1	0	-1	1303,84					1377,83	609,35
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A5	17,5	M	47	2	1	0	-1	1218,34					1286,20	544,29
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A6	18,0	M	49	6	1	0	-1	1359,81					1437,09	621,74
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A7	18,0	F	49	2	1	1	-1	1352,60					1427,12	629,14
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A8	18,0	M	51	5	1	0	-1	1203,72					1309,22	619,98
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A9	18,5	F	55	3	1	0	-1	1252,48					1335,79	584,66
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	A10	18,5	F	56	2	1	0	-1	1248,29					1397,36	616,33
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B1	18,5	M	60	6	2	1	-1	1280,10	1554,54				1624,35	711,77
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B2	19,0	M	58	5	1	0	-1	1339,21					1425,27	626,54
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B3	19,0	M	66	6	2	0	-1	1068,18	1476,74				1529,44	673,58
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B4	19,0	M	67	4	2	0	-1	1261,51	1611,08				1653,68	756,12
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B5	19,5	M	68	4	3	1	-1	1136,38	1452,58	1553,36			1601,25	658,97
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B6	19,5	M	67	5	3	0	-1	1236,41	1433,10	1583,13			1649,77	799,26
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B7	19,5	M	72	5	2	0	-1	1313,89	1538,76				1599,40	726,91
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B8	20,0	F	71	3	2	0	-1	1159,42	1484,06				1552,16	669,41
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B9	20,0	F	72	5	2	2	-1	-1,00	-1,00				-1,00	760,67
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	B10	20,0	M	70	3	2	0	-1	1185,61	1533,49				1579,09	735,50
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C1	20,5	M	76	5	3	1	-1	1165,94	1613,33	1791,73			1815,04	748,27
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C2	20,5	M	75	6	3	0	-1	1237,84	1444,81	1531,33			1579,75	711,51
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C3	20,5	M	79	5	4	0	-1	1214,77	1587,45	1683,33	1774,42		1810,44	816,79
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C4	21,0	M	79	6	3	0	-1	1301,26	1527,89	1615,07			1638,86	704,18
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C5	21,0	F	81	5	2	0	-1	1231,15	1440,42				1503,22	694,99
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C6	21,0	F	76	3	3	0	-1	1178,57	1545,14	1667,34			1703,02	722,78
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C7	21,5	M	79	6	3	2	-1	-1,00	-1,00	-1,00			1636,87	750,54
29/05/03	H0207	G1 (S)	1	C8	21,5	F	86	6	4	1	-1	1159,01	1451,32	1537,60	1590,64		1625,78	809,78

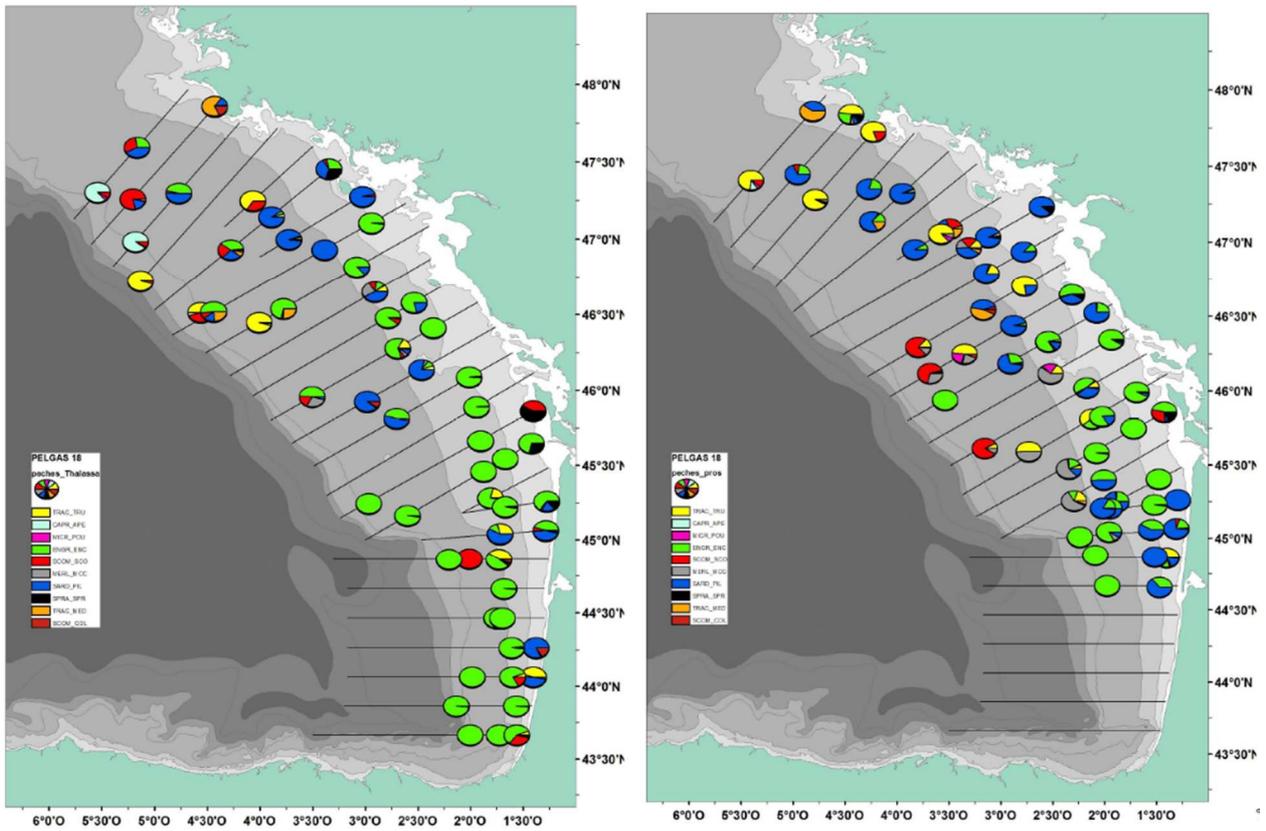
NB : Lorsque l'information manque, il est inscrit « -1 » dans le tableau.

(28 observations / 2328)

Récapitulatif du jeu de données :

	nombre	pourcentage
<i>Otolithes prélevés</i>	2328	100,0%
Lisibilité :		
Otolithes lisibles et mesurables	2186	93,90 %
dont		
Lisibilité bonne (0)	<i>1801</i>	<i>77,36 %</i>
Lisibilité moyenne (1)	<i>384</i>	<i>16,49 %</i>
Otolithes illisibles (2)	142	6,10 %
Âges :		
Otolithes d'âge 1	520	22,34 %
Otolithes d'âge 2	551	23,67 %
Otolithes d'âge 3	445	19,12 %
Otolithes d'âge 4	323	13,87 %
Otolithes d'âge 5 et +	458	19,67 %
Otolithes d'âge indéterminé	31	1,33 %

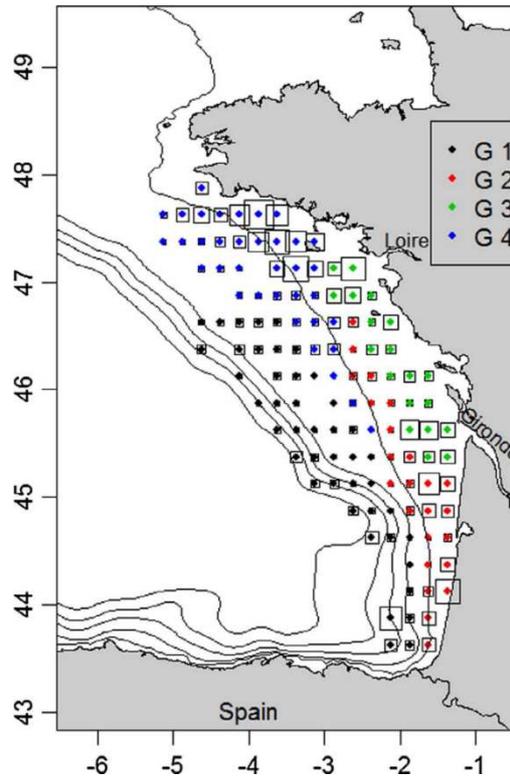
Annexe 12 : Pêches durant la campagne PELGAS de 2018 (ICES, 2018)



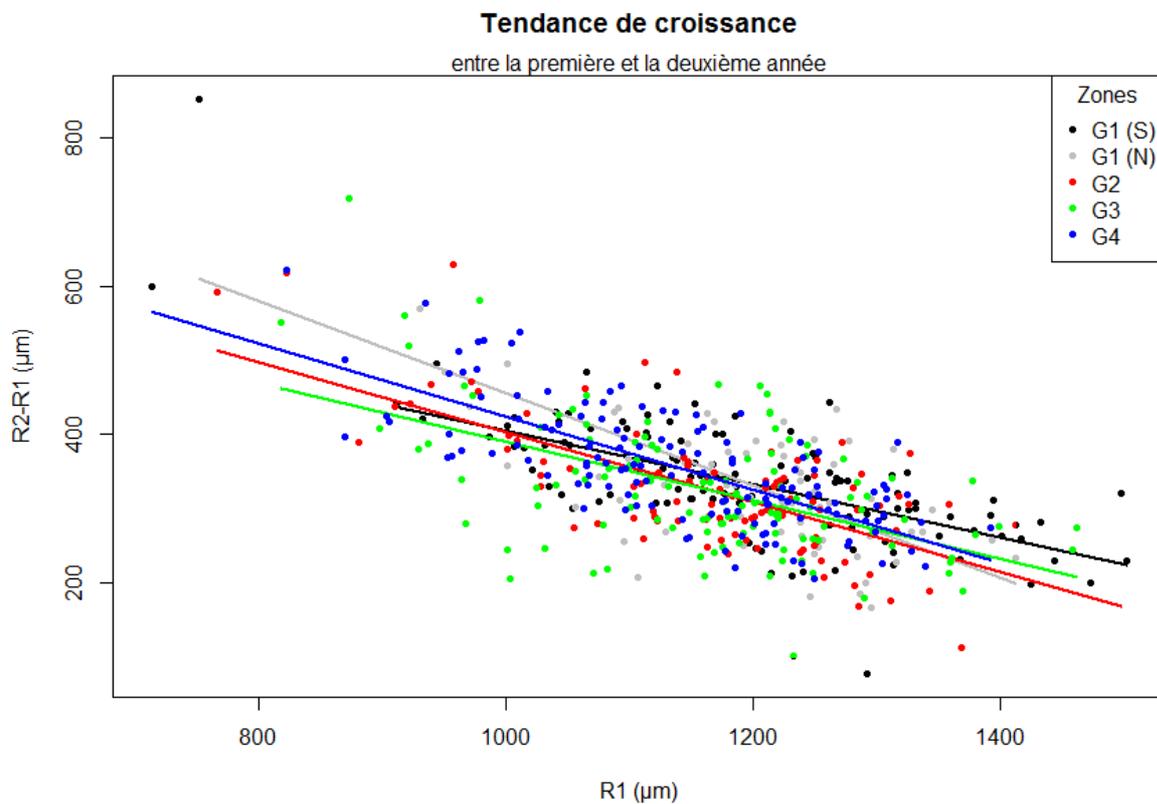
À gauche : par la Thalassa ; à droite : par les pêcheurs professionnels
NB : Les sardines sont en bleues.

Annexe 13 : Compromis des croissances-aux-âges : différenciation des zones

Rappel :

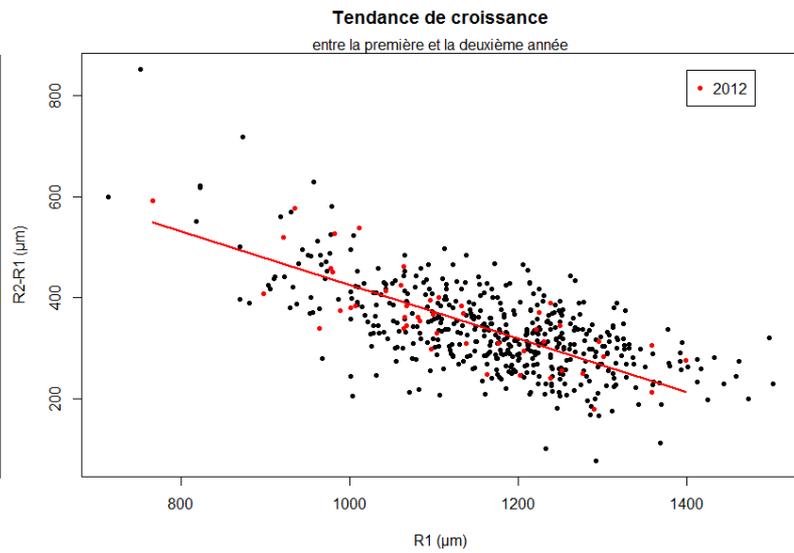
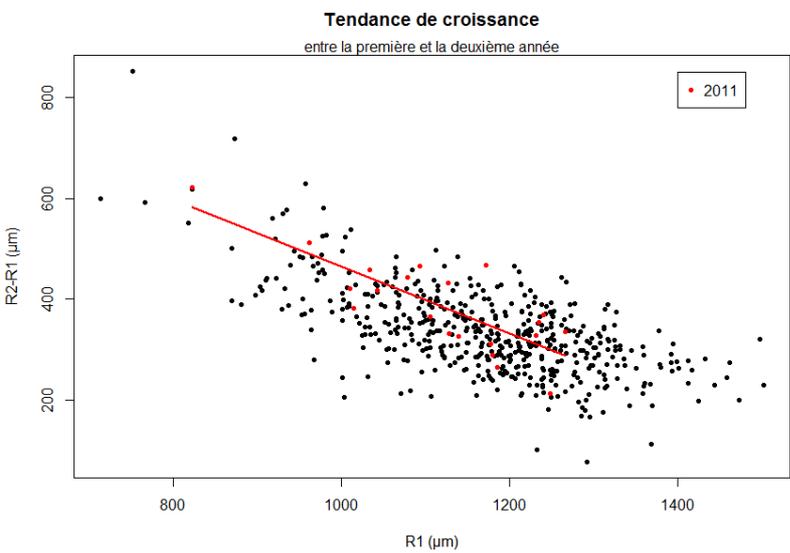
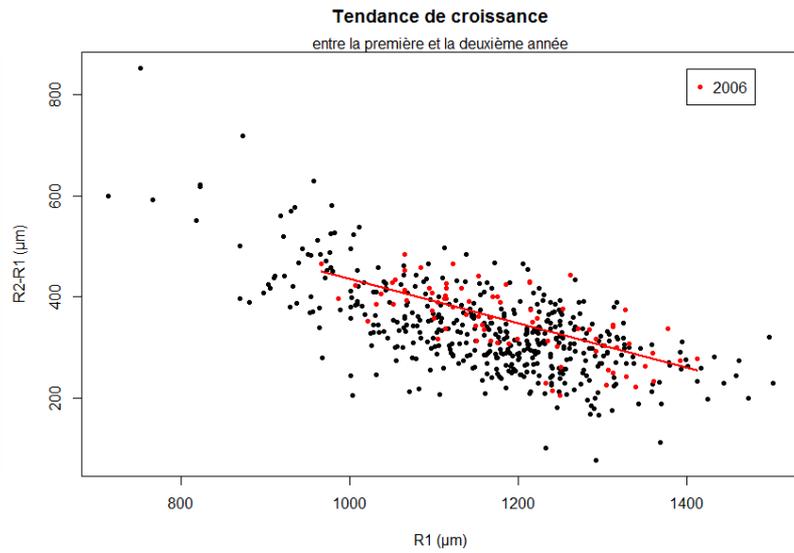
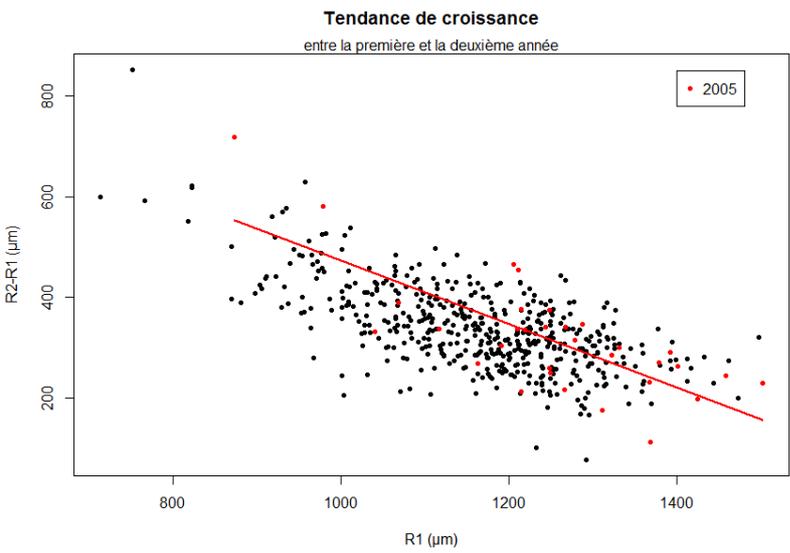
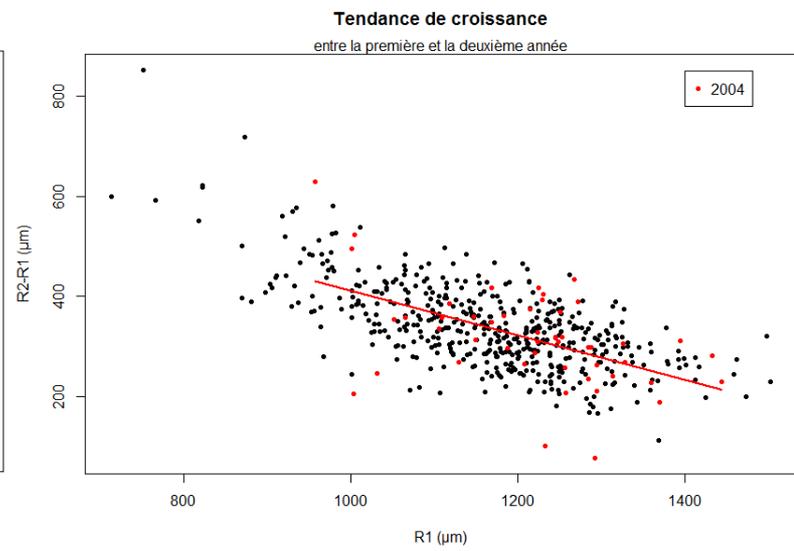
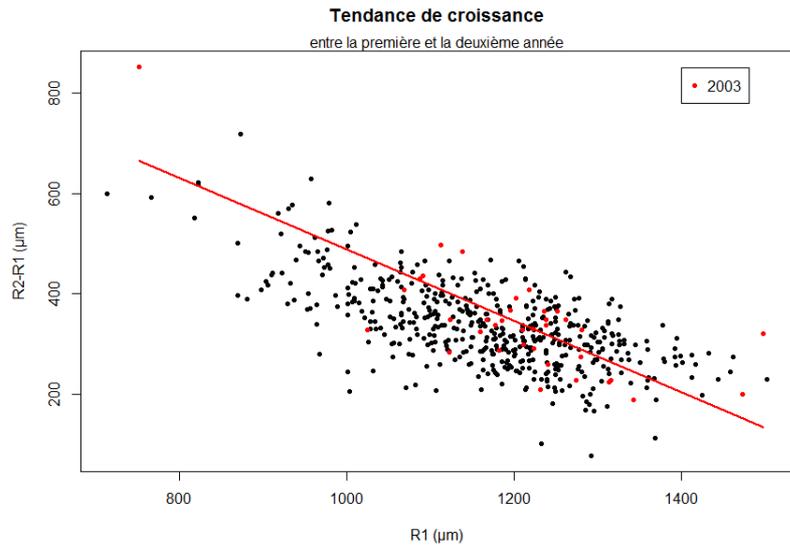


Source : Petitgas *et al*, 2017

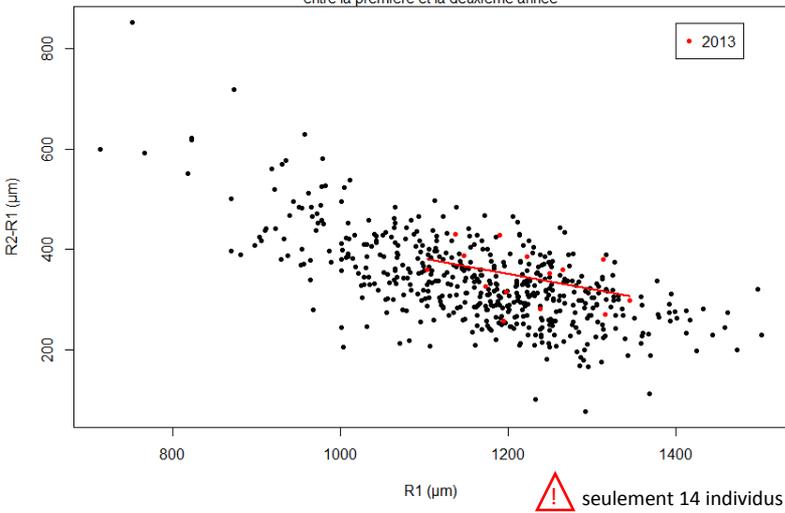


NB : La zone G1 est séparée en deux zones : G1 Sud (S) et G1 Nord (N)

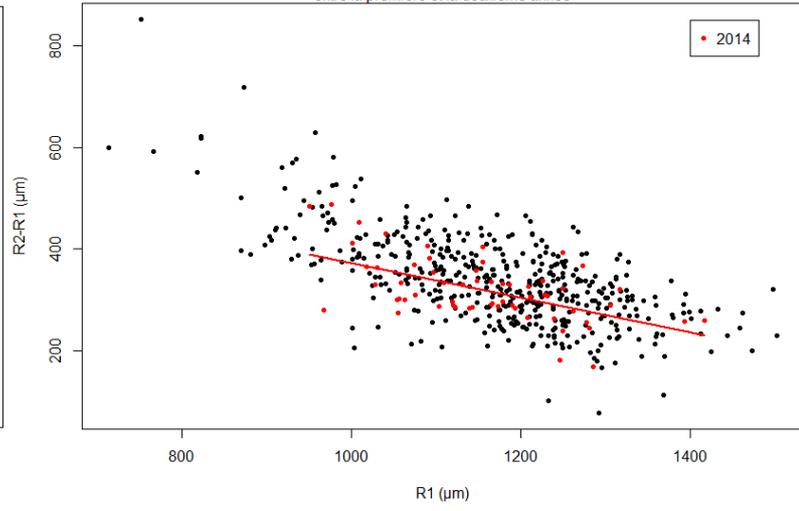
Annexe 14 : Compromis des croissances-aux-âges : différenciation des années



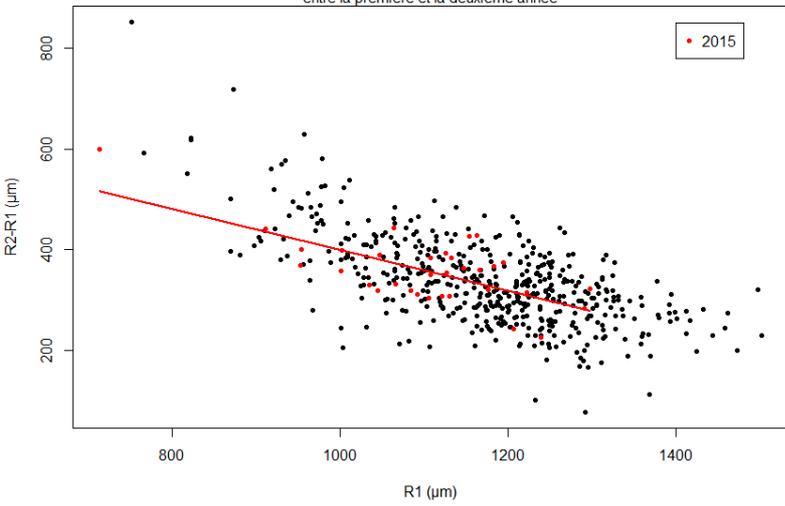
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



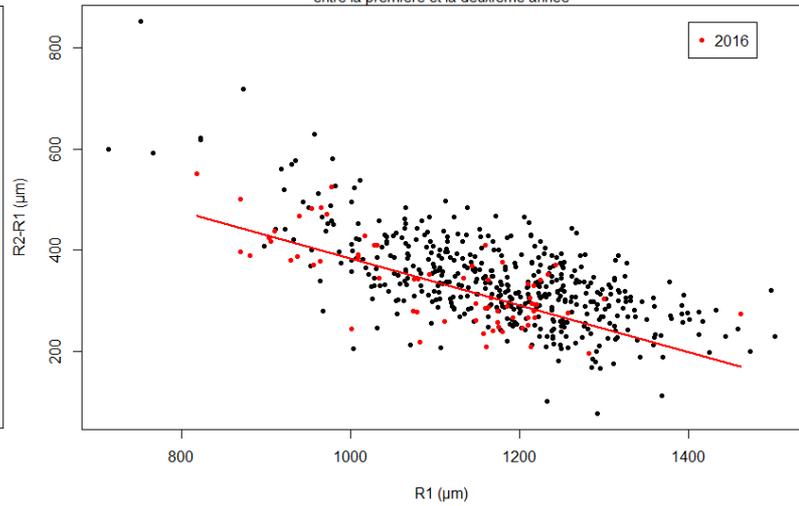
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



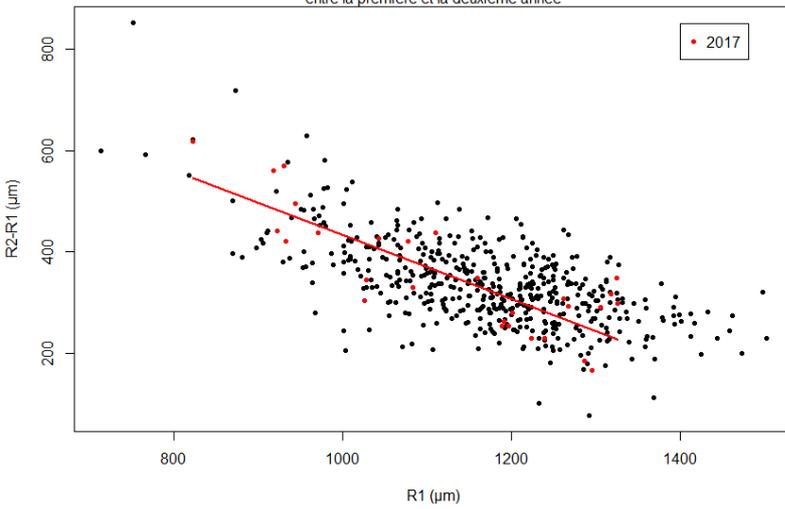
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



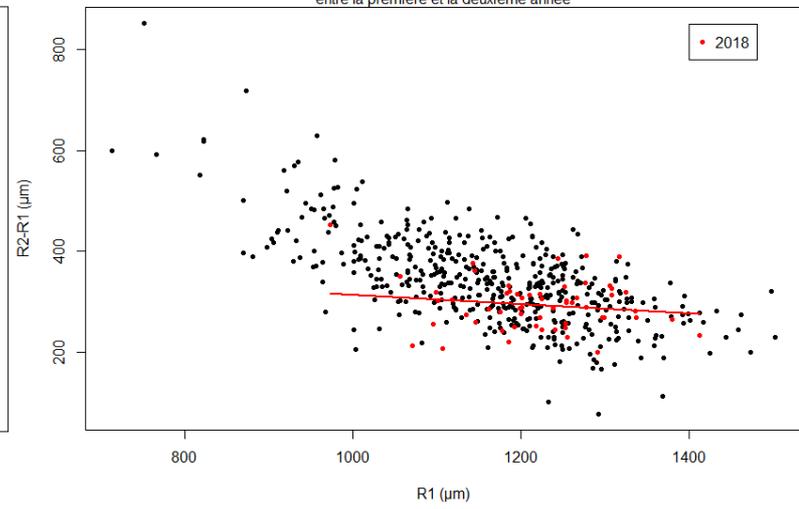
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



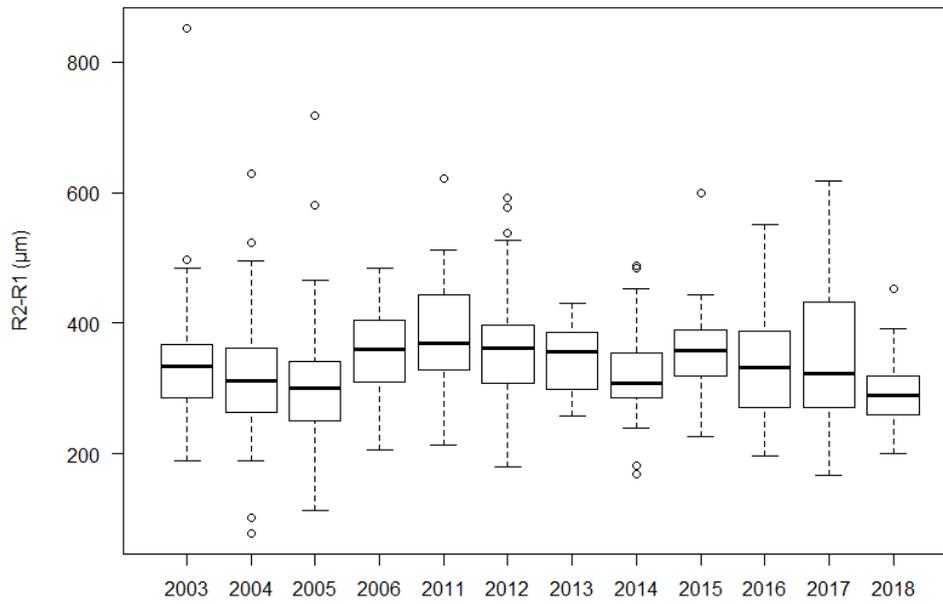
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



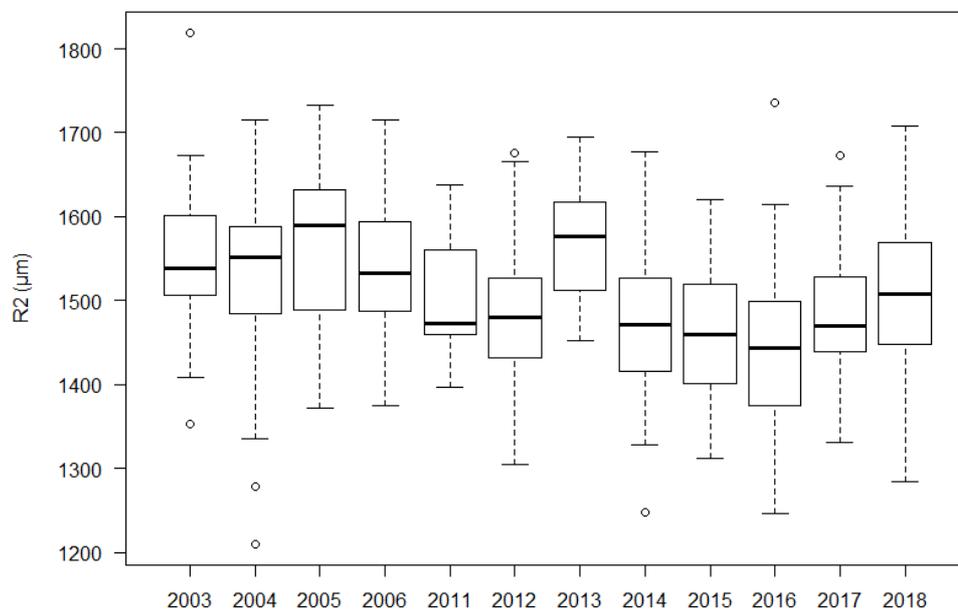
Tendance de croissance
entre la première et la deuxième année



Annexe 15 : Evolution de la croissance des individus d'âge 2



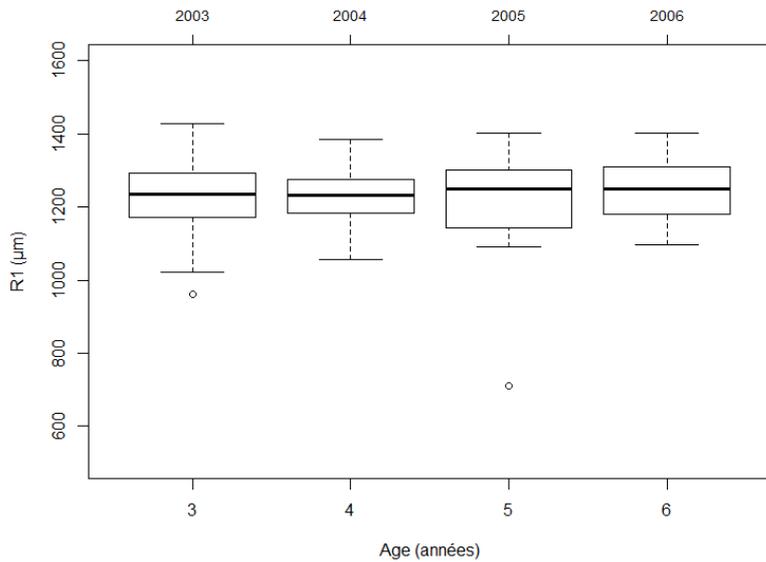
Evolution du R2-R1, des âges 2, au cours des années



Evolution du R2, des âges 2, au cours des années

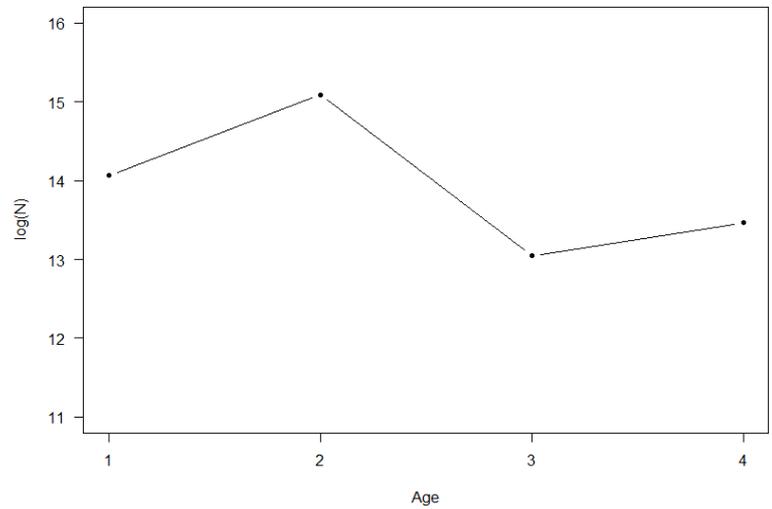
Annexe 16 : Suivi des cohortes

Mortalité sélective, cohorte 2000



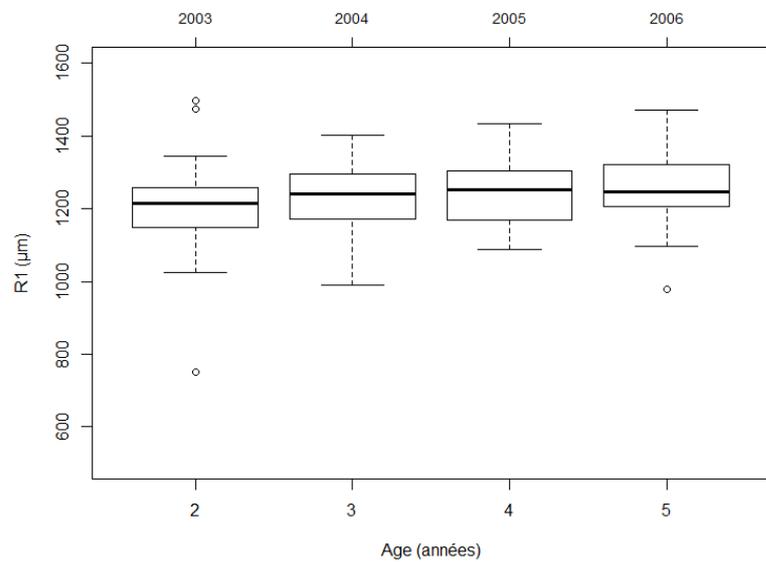
-> Pas de pattern de mortalité sélective

Suivi de la cohorte de 2000, selon les données de PELGAS



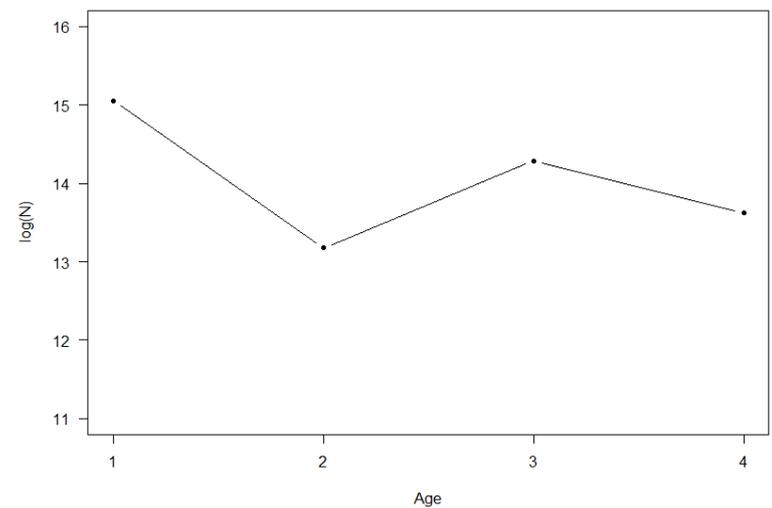
-> cohorte semble mal suivie

Mortalité sélective, cohorte 2001



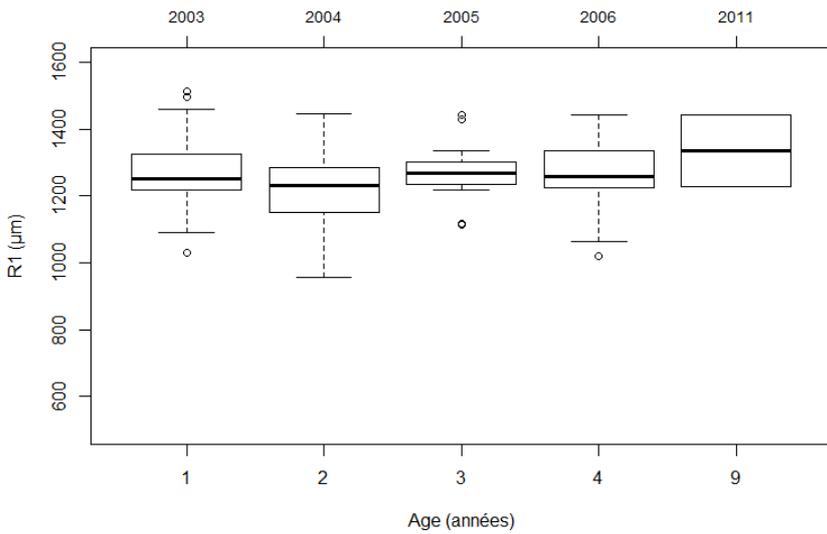
-> mortalité sélective des individus à croissance lente

Suivi de la cohorte de 2001, selon les données de PELGAS



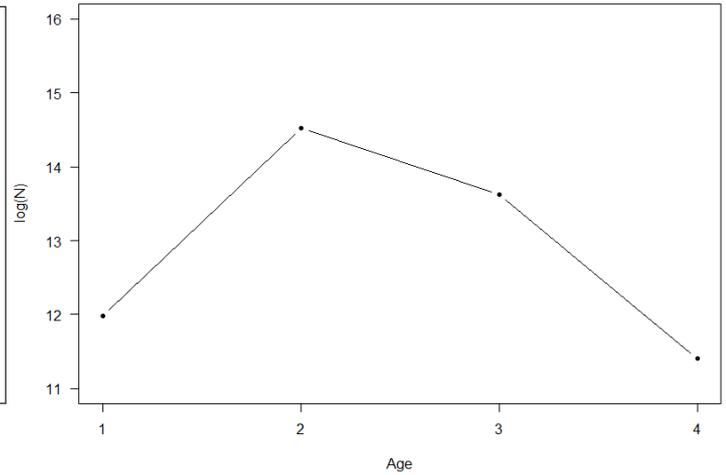
-> cohorte semble mal suivie, surtout âge 2 (2003)

Mortalité sélective, cohorte 2002



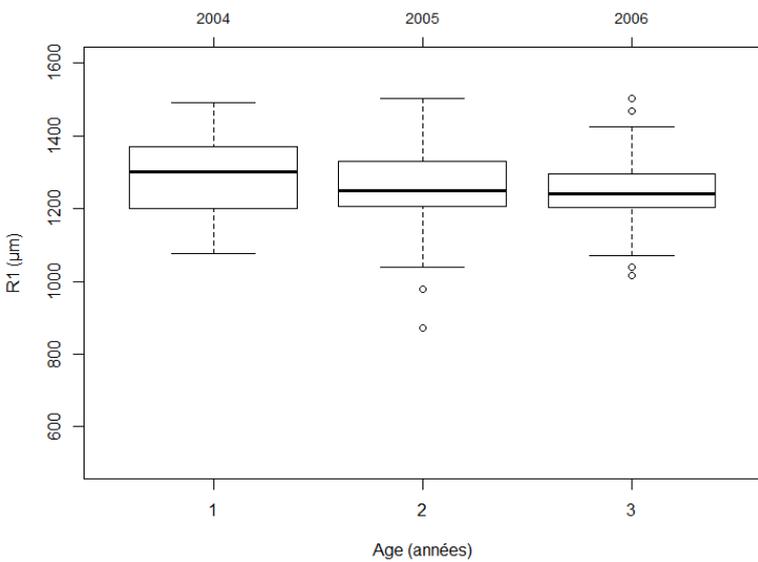
-> pas de pattern de mortalité sélective

Suivi de la cohorte de 2002, selon les données de PELGAS



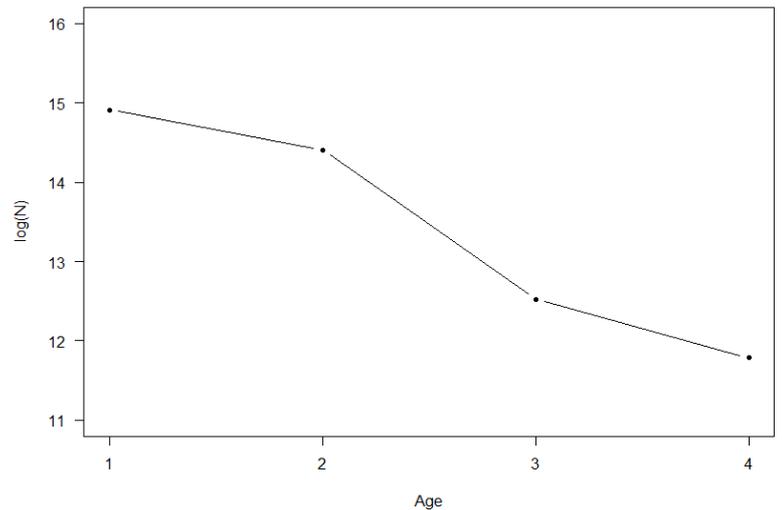
-> cohorte semble mal suivie pour l'âge 1 (2003)

Mortalité sélective, cohorte 2003



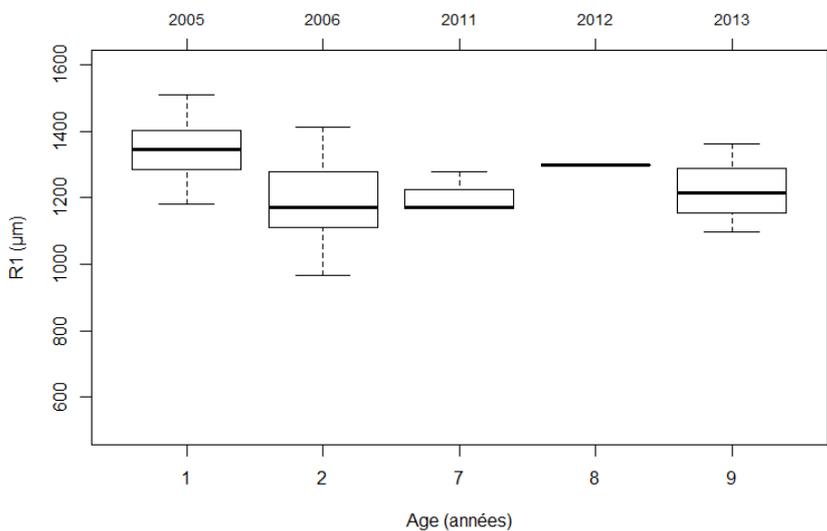
-> mortalité sélective des individus à croissance rapide

Suivi de la cohorte de 2003, selon les données de PELGAS



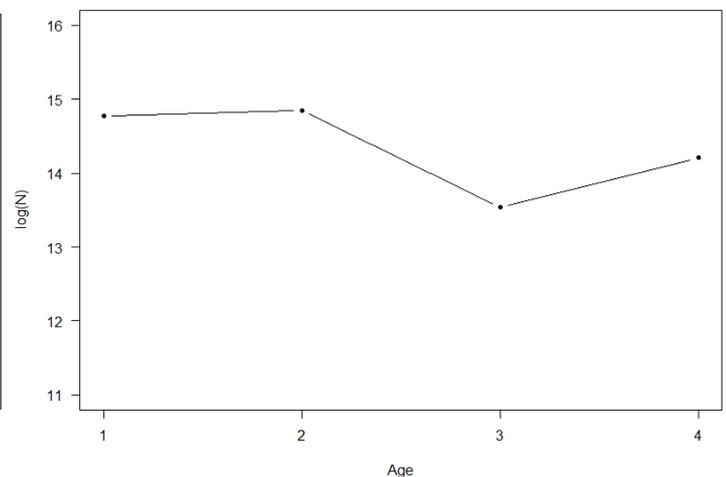
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2004



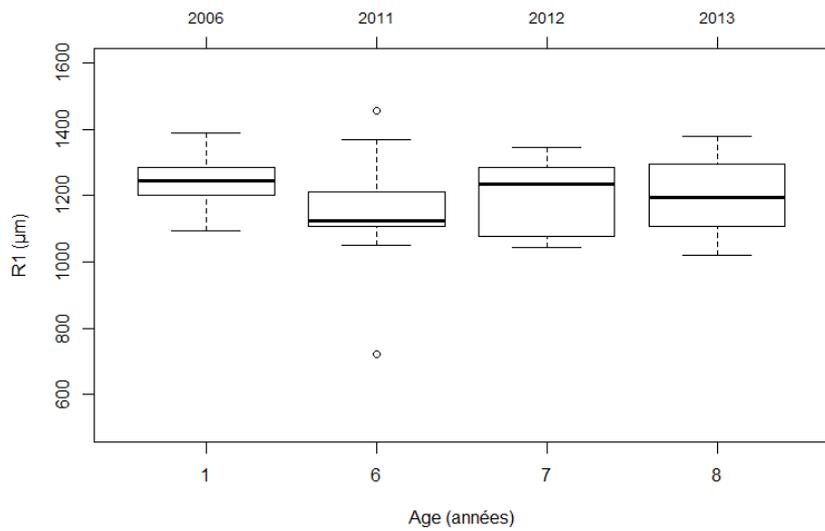
-> mortalité sélective des individus à croissance rapide

Suivi de la cohorte de 2004, selon les données de PELGAS



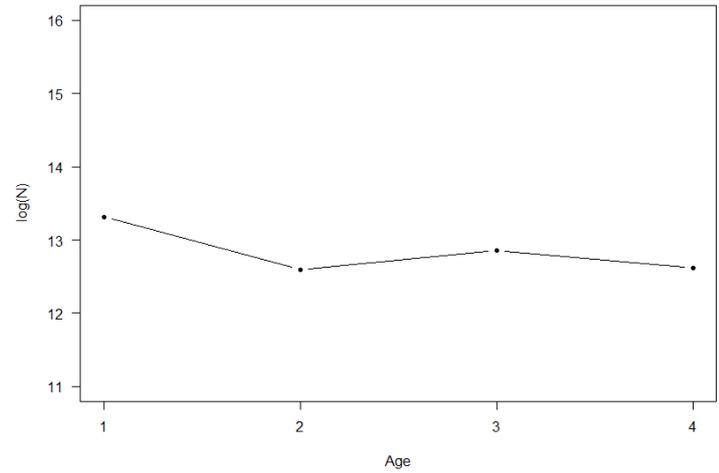
-> cohorte semble mal suivie, surtout âge 3 (2007)

Mortalité sélective, cohorte 2005



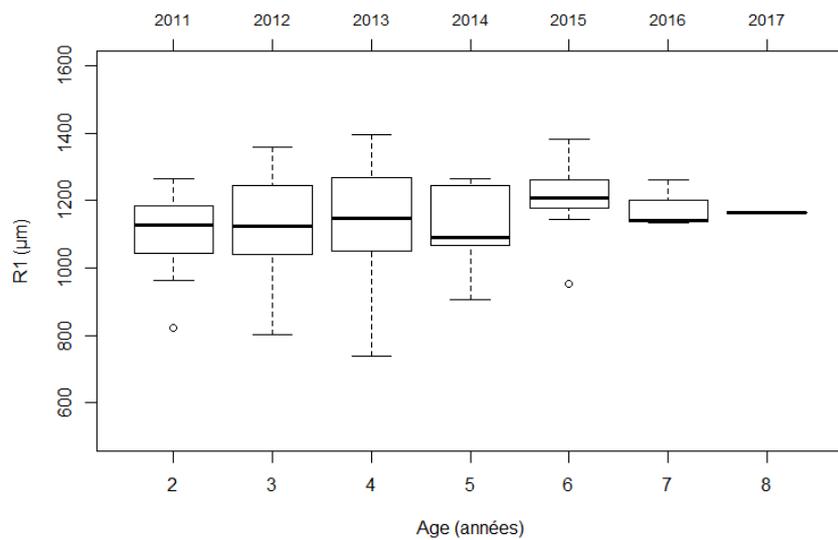
-> mortalité sélective des individus à croissance rapide (mais difficile à dire car on a surtout des âges élevés)

Suivi de la cohorte de 2005, selon les données de PELGAS



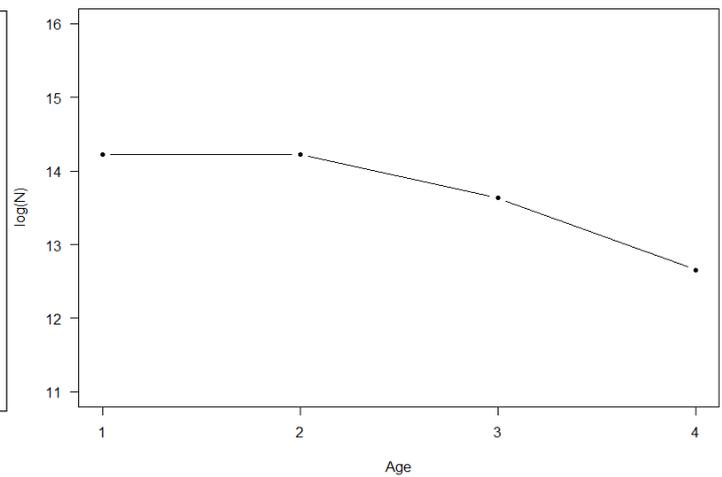
-> cohorte semble mal suivie pour âge 2 (2007)

Mortalité sélective, cohorte 2009



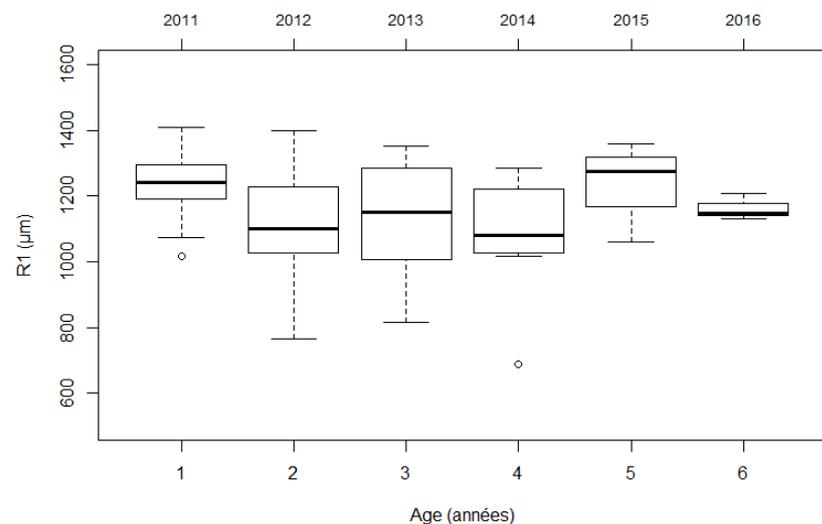
-> mortalité sélective des individus à croissance lente

Suivi de la cohorte de 2009, selon les données de PELGAS



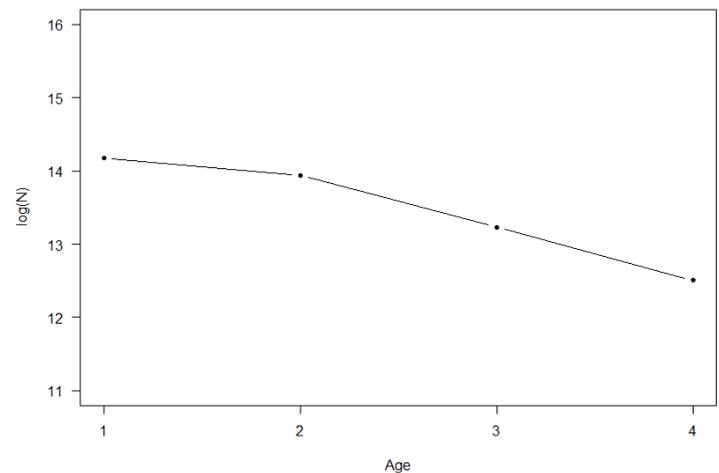
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2010



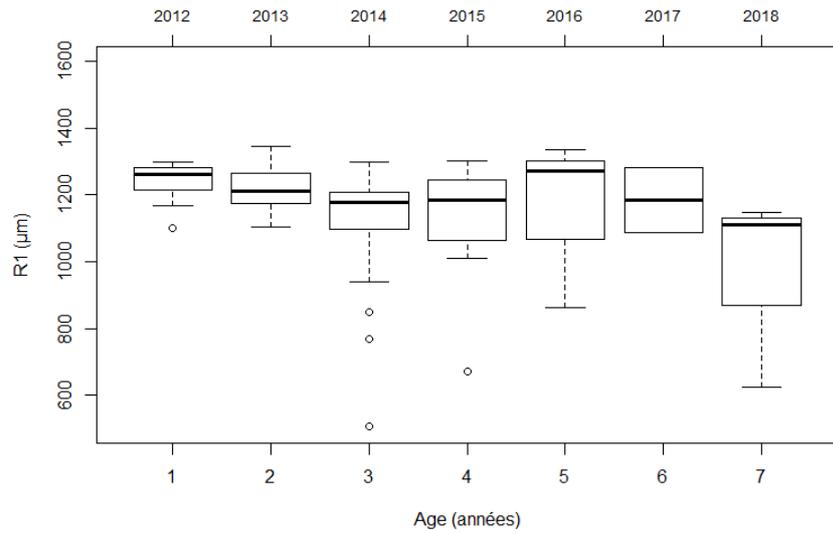
-> mortalité sélective des individus à croissance rapide

Suivi de la cohorte de 2010, selon les données de PELGAS



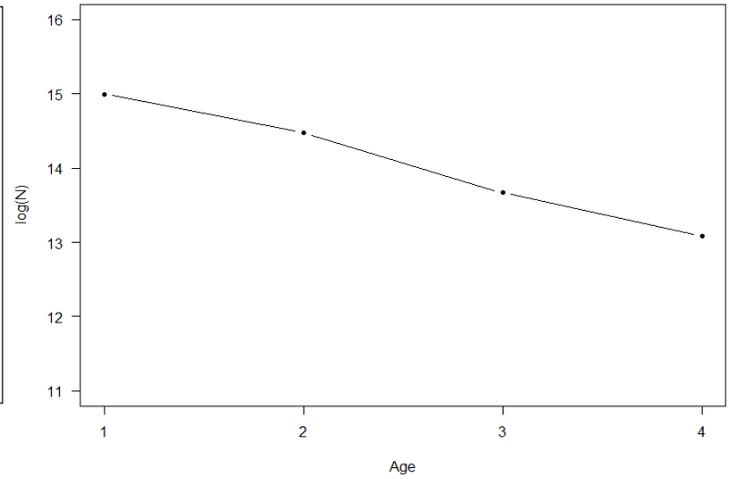
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2011



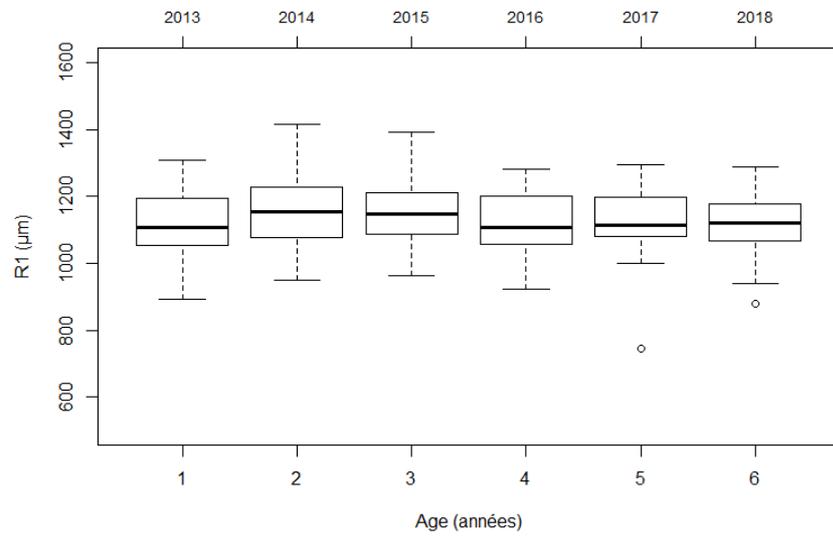
-> mortalité sélective des individus à croissance rapide

Suivi de la cohorte de 2011, selon les données de PELGAS



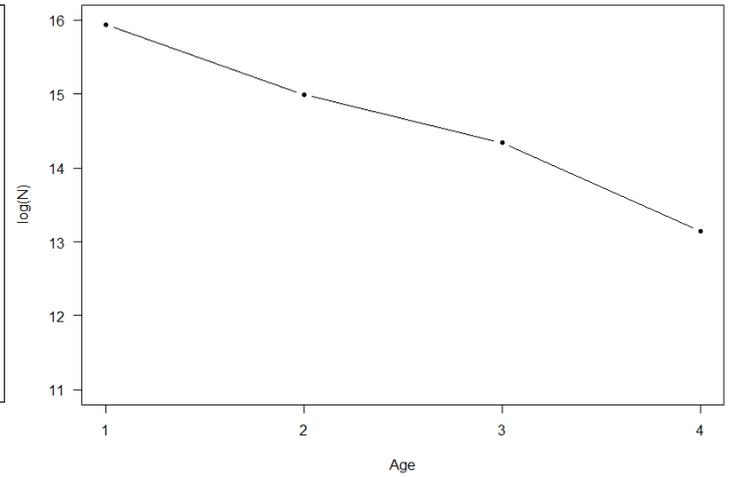
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2012



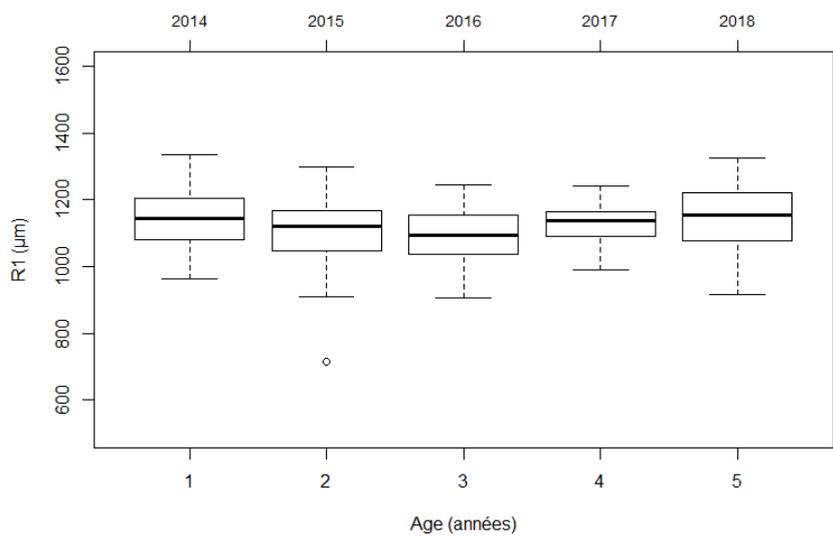
-> pas de pattern de mortalité sélective

Suivi de la cohorte de 2012, selon les données de PELGAS



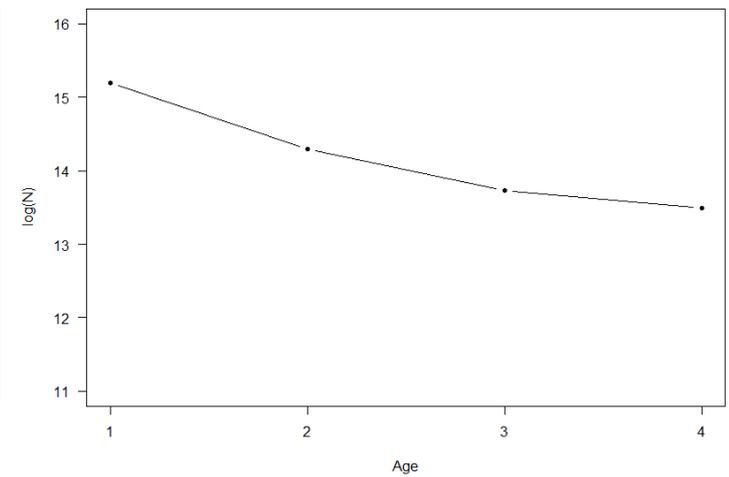
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2013



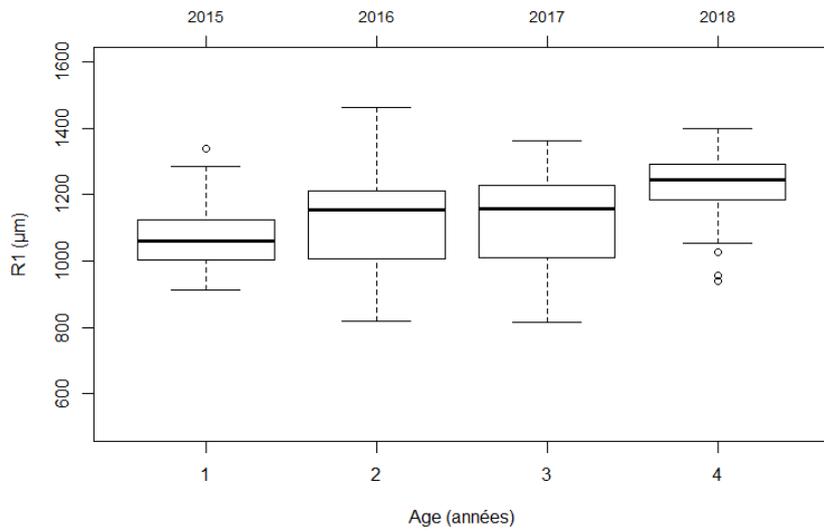
-> pas de pattern de mortalité sélective

Suivi de la cohorte de 2013, selon les données de PELGAS



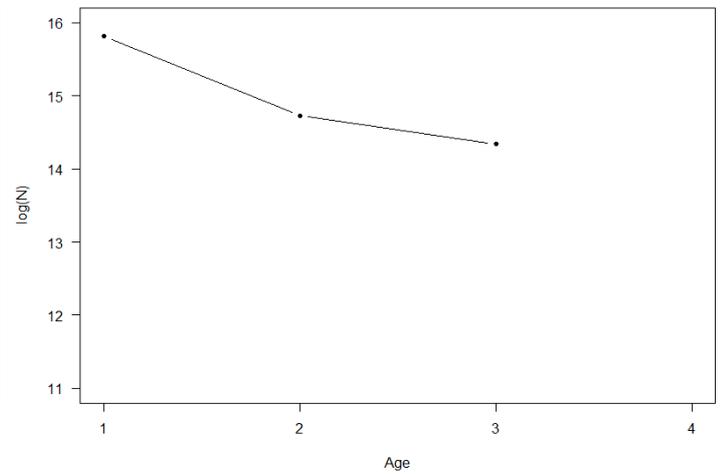
-> cohorte semble bien suivie

Mortalité sélective, cohorte 2014



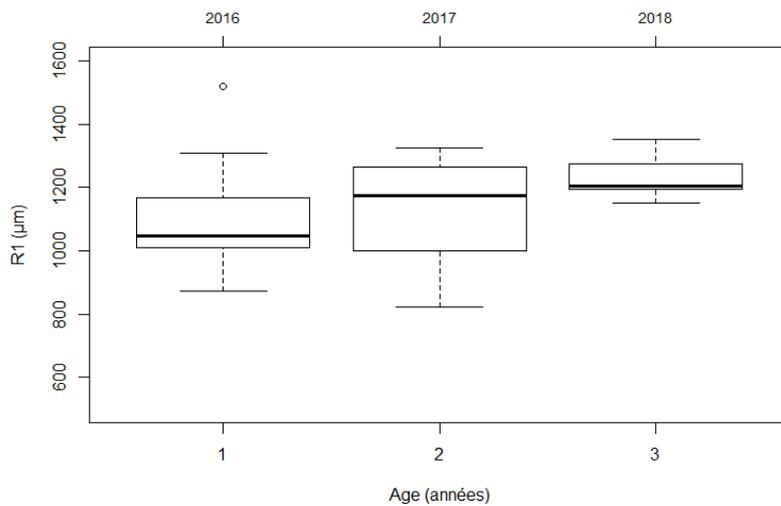
-> mortalité sélective des individus à croissance lente

Suivi de la cohorte de 2014, selon les données de PELGAS



-> cohorte semble bien suivie

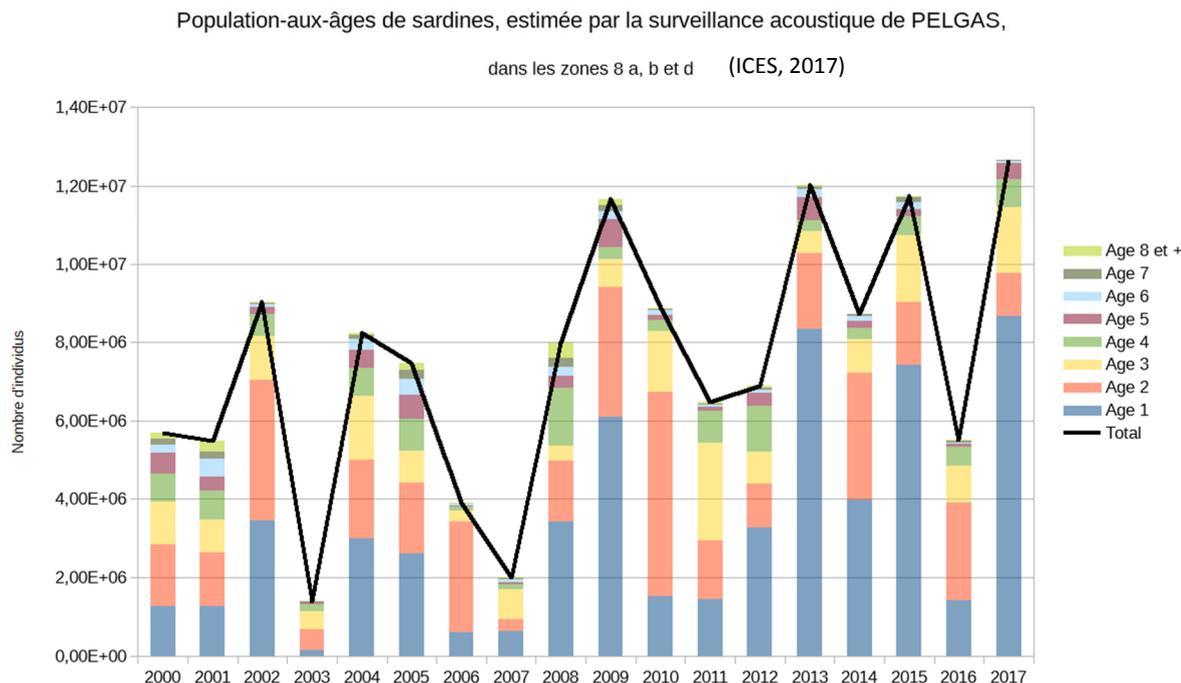
Mortalité sélective, cohorte 2015



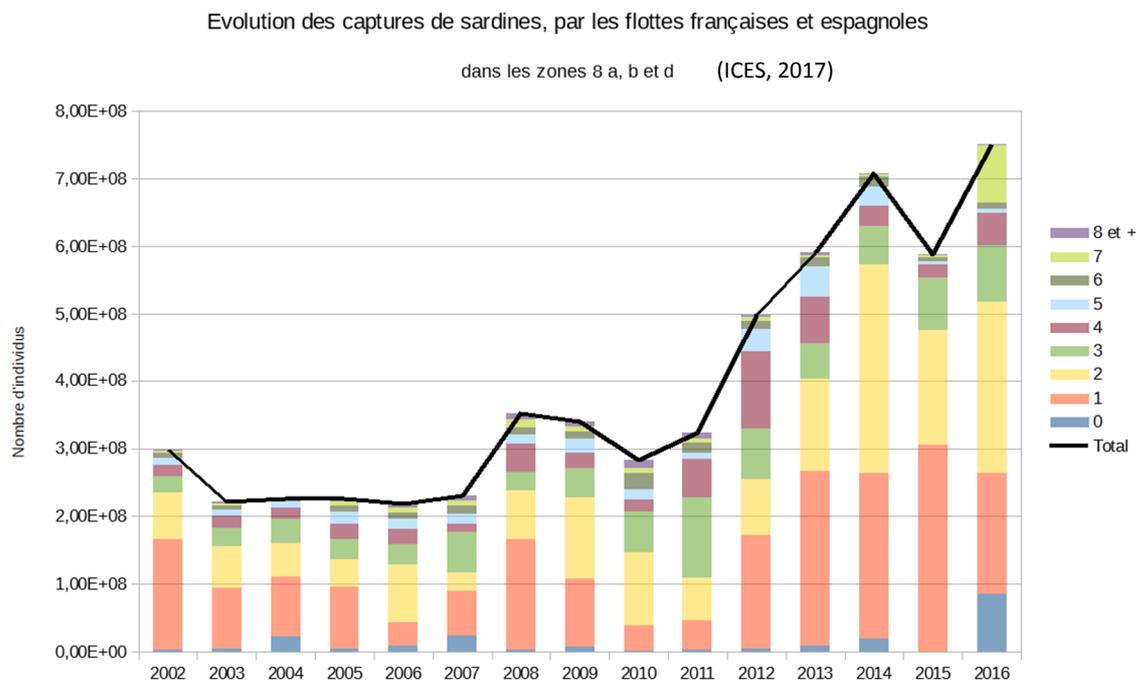
-> mortalité sélective des individus à croissance lente

NB : pas de suivi de la cohorte 2015 car les données s'arrêtent à 2017 (ICES, 2017) et deux années sont insuffisantes pour savoir s'il s'agit d'un bon suivi, ou non.

Annexe 18 : Population-aux-âges de sardines, dans le Golfe de Gascogne

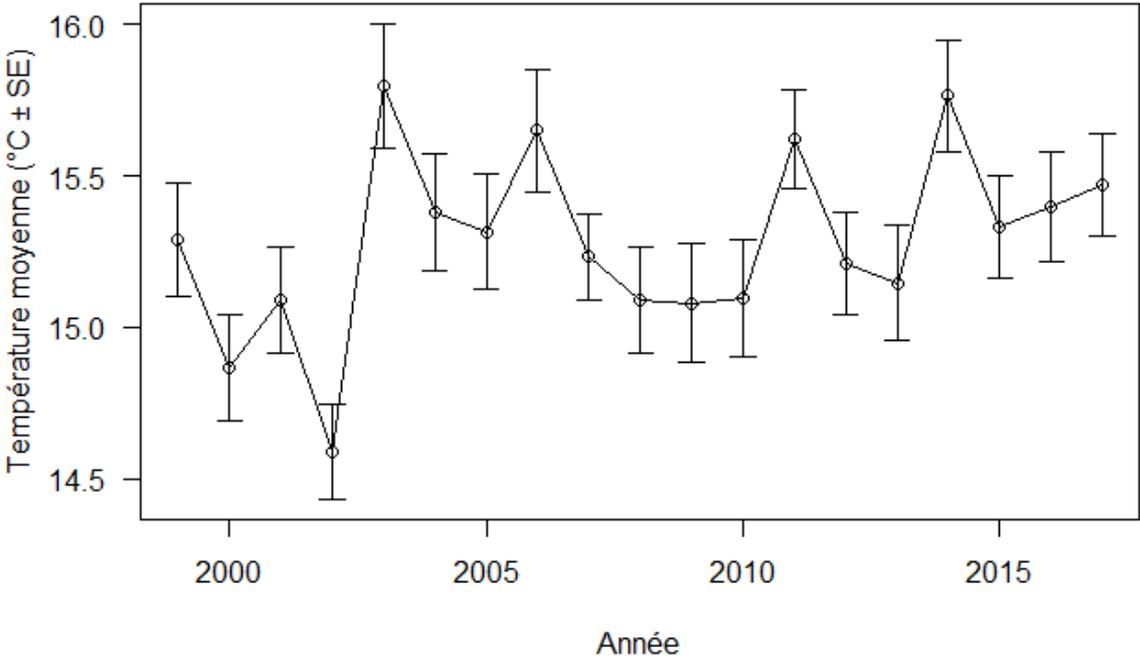


Annexe 19 : Captures-aux-âges de sardines, dans le Golfe de Gascogne

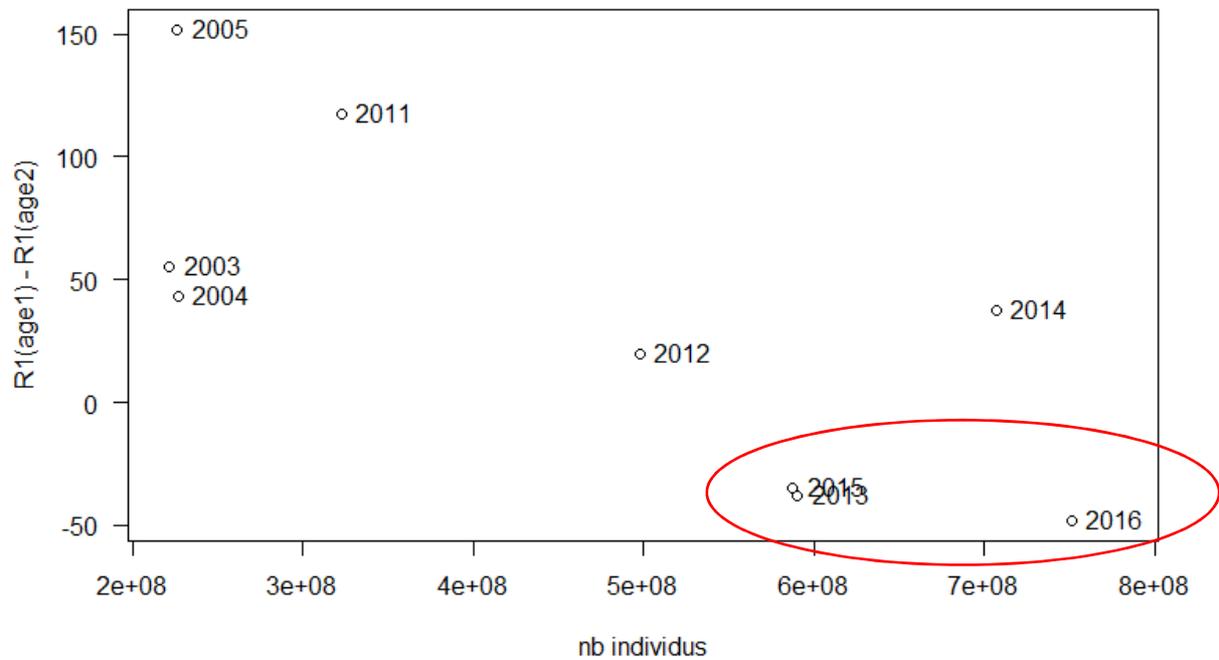


Remarque : la population estimée est inférieure aux captures, cela est sûrement dû à l'estimation par acoustique, qui n'est pas très précise, mais surtout, la prospection n'ayant lieu qu'à un moment donné, il est difficile d'estimer la population sur une année.

Annexe 20 : Evolution de la température annuelle dans le Golfe de Gascogne



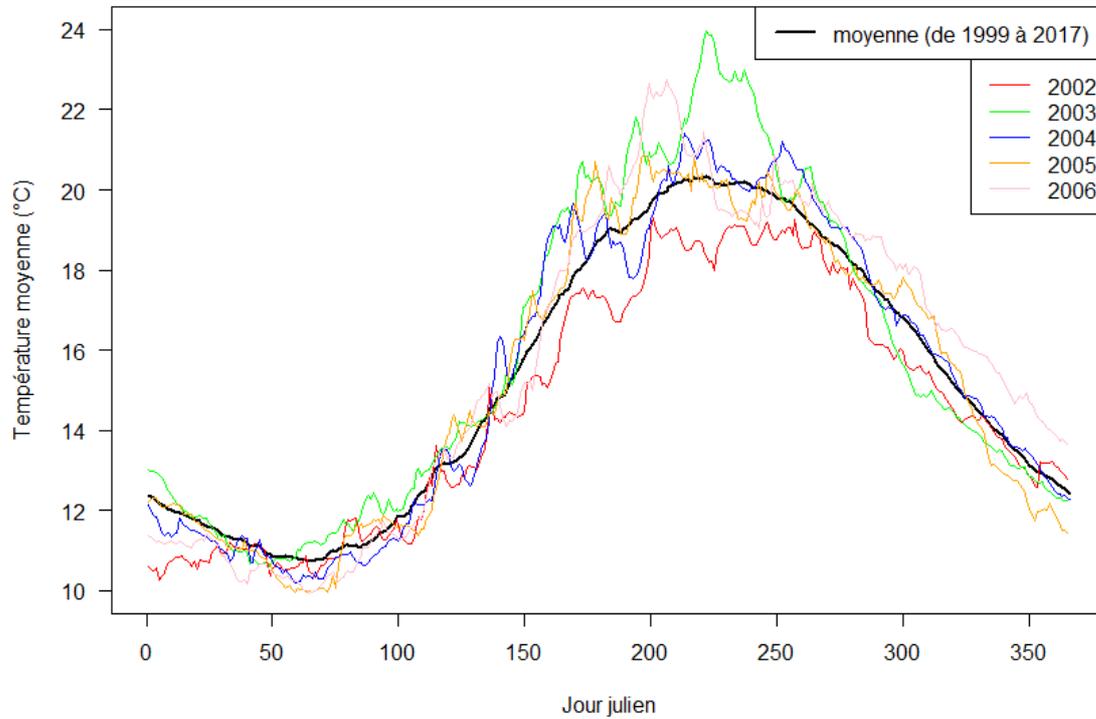
Annexe 21 : Rapport entre la différence des moyennes de R1 (entre âges 1 et 2), et le nombre d'individus capturé, par an (ICES, 2017)



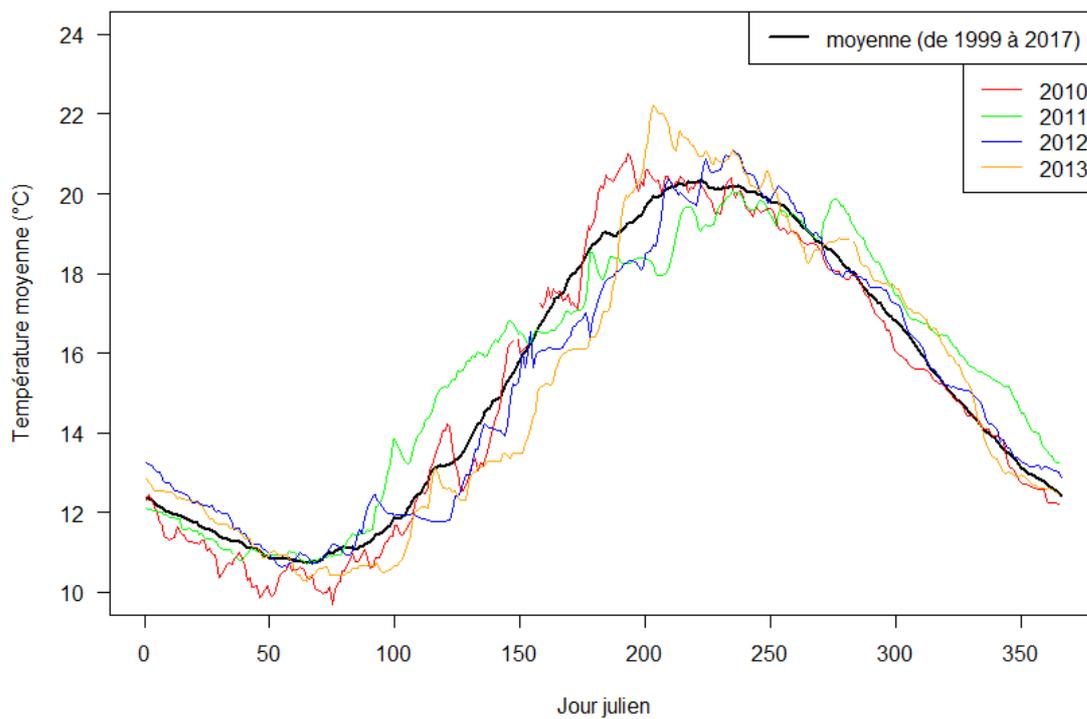
Les années entourées en rouge correspondent à celles présentant une mortalité sélective négative.

Annexe 22 : Evolution de la température moyenne par jour et par an

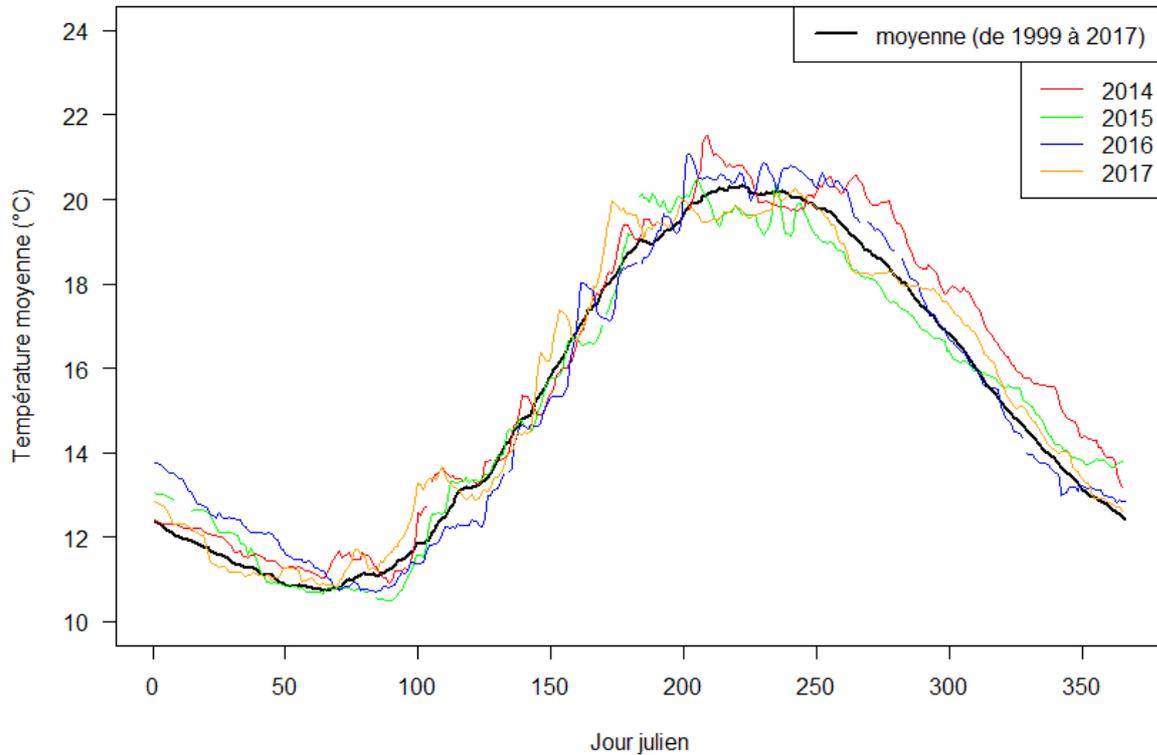
Température moyenne par jour, période ancienne



Température moyenne par jour, période intermédiaire

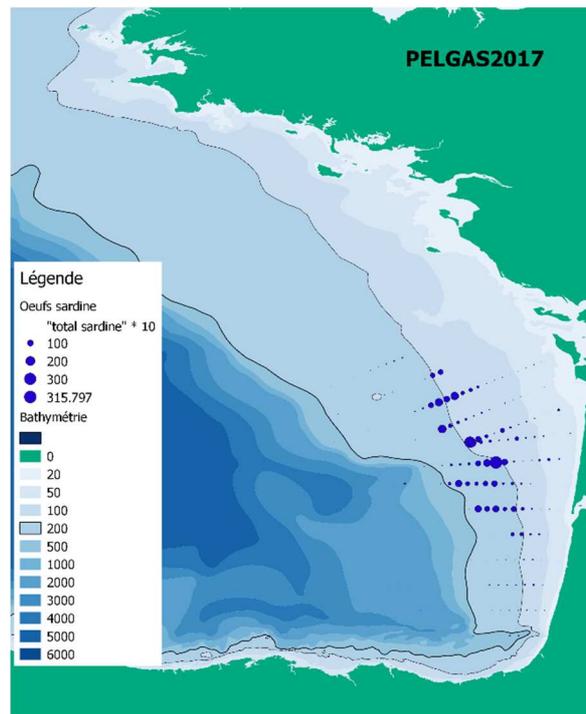


Température moyenne par jour, période récente

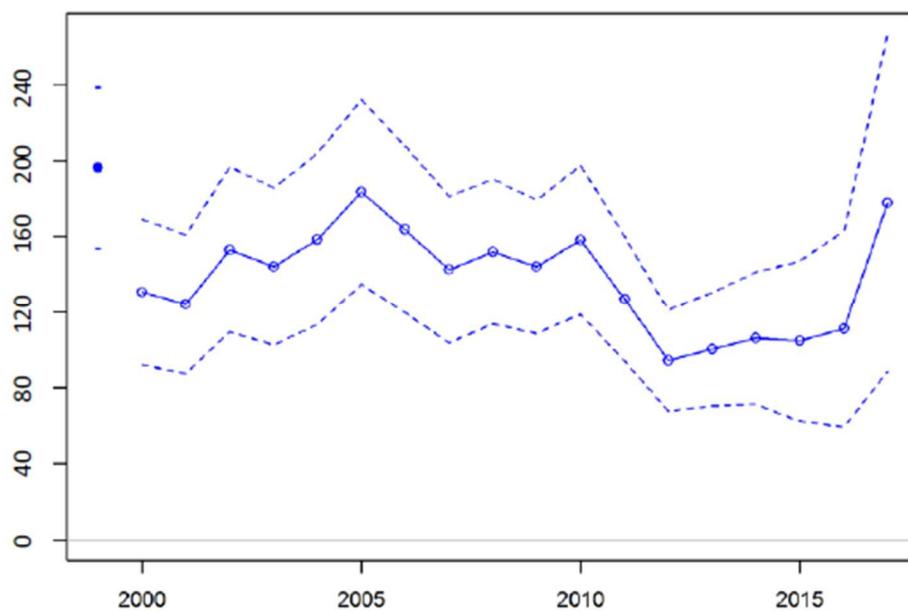


Avec ces représentations, on voit que l'année 2012 est plus froide (par rapport à la moyenne entre 1999 et 2017), surtout en printemps et début été. On remarque également que le printemps 2013 est plus froid mais qu'il y a une forte augmentation de la température en été. Ces températures plus basses ou avec de grandes variations, pouvant impacter le métabolisme des poissons, pourraient expliquer cette perte de croissance. Cependant, les années 2014 et 2015 sont plutôt dans la moyenne, voire légèrement au-dessus (surtout automne 2014). Ce qui n'explique donc pas la faible croissance pendant plusieurs années consécutives.

Annexe 23 : Zones de pontes des sardines (PELGAS 2017)



Annexe 24 : Suivi des pontes de sardines



Biomasse du stock d'œufs de sardine dans le Golfe de Gascogne (zone 8 a, b et d), avec un intervalle de confiance à 95 % (source : ICES, 2017)

Résumé

Chez de nombreuses espèces de poissons exploitées, on observe un déclin de la taille-aux-âges. Les deux principales causes mises en avant sont la diminution de la croissance et la mortalité sélective des grands individus, les deux étant probablement liées aux changements environnementaux et/ou à la pêche. La sardine *Sardina pilchardus* du Golfe de Gascogne est un bon modèle d'étude de ce phénomène puisque c'est une espèce très sensible aux variations environnementales, mais aussi très convoitée par les pêcheurs français et espagnols. Le but de cette étude est de mesurer l'évolution de la croissance des sardines, à travers la lecture de leurs otolithes, afin de comprendre les mécanismes impliqués dans ces changements de taille-aux-âges. Pour cela, les étapes principales sont décrites dans ce rapport : extraction des otolithes durant la campagne PELGAS, mesure de chaque rayon otolithaire faite sur une sélection d'individus, analyse des données en langage R et enfin, comparaison à quelques données environnementales (population estimée, captures par la pêche, température). On a montré que le déclin de croissance n'avait lieu qu'à certaines périodes et que, selon les cohortes, la mortalité sélective n'était pas uniquement subie par les individus à croissance rapide. Il est donc probable que le déclin de la taille-aux-âge soit lié à une diminution de la croissance en première année, mais nous n'avons pas trouvé de corrélation significative avec les paramètres environnementaux étudiés. Cependant, cette étude a été réalisée avec un jeu de données relativement petit et des données environnementales très globales. Elle mérite donc d'être approfondie.

Mots-clés : *Sardina pilchardus*, Golfe de Gascogne, otolithes, croissance, mortalité, sélection

Abstract

In many exploited species, we see a decrease of size-at-ages. Two main hypotheses have been proposed to explain this decline: a decline in growth and the selective mortality of the individuals with fast growth both being due to environmental changes or/and to fishing. The sardine *Sardina pilchardus* of the Bay of Biscay is a good model for the study of this phenomenon because of its high sensitivity to the environmental variations and it sustains two large French and Spanish fisheries. The aim of this study is to measure the changes in the growth of sardines, by the reading of otoliths, and to understand mechanisms involved in this process. The main stages of this study are described in this report: extraction of otoliths during PELGAS, otoliths measurements on a subset of individuals, data analyses in R, and comparing with environmental data (estimated biomass by acoustic, biomass captured, and temperature). We have noted that the decline of growth was only in certain periods and that the strength and direction of the selective mortality is dependent on cohorts. It is therefore likely that the decline in size-at-ages in this species is mainly due to changes in growth at age 1 but we found no significant relationship between growth (and mortality) with the studied environmental parameters. As this study was conducted with a relatively small data set and large scale environmental data, further analyses are required to fully address this issue.

Key words: *Sardina pilchardus*, Bay of Biscay, otoliths, growth, mortality, selection