

Identification des poissons par leurs otolithes en 3D

Manche et mer du Nord

Kélig Mahé, Aurélie Mateos,
Émilie Poisson-Caillault,
Sébastien Couette, Rémi Laffont,
Kirsteen MacKenzie
et Nicolas Andrialovanirina

Avec la collaboration de
Lauriane Poloni et Solène Telliez

Collection *Guide pratique*

Jeux de plateau pour l'agriculture et le paysage.

Penser, concevoir, animer, évaluer, diffuser

S. Dernas, Y. Michelin, N. Blache (coord.), 2023, 176 p.

Atlas des bois résineux de France. Outil d'identification multi-échelle

M.-C. Trouy-Jacquemet, 2023, 240 p.

Infrastructures de données spatiales.

Évaluations économiques : concepts, méthodes et retours d'expérience

H. Rey-Valette, C. Jabbour, P. Maurel, J.-M. Salles, 2022, 120 p.

Élevage de crevettes d'eau douce en Europe.

*Pratiques éco-responsables pour *Macrobrachium rosenbergii**

G. Laval, 2022, 104 p.

Pour citer cet ouvrage : Mahé K., Mateos A., Poisson-Caillaud E., Couette S., Laffont R., MacKenzie K., Andrialovanirina N., *Identification des poissons par leurs otolithes en 3D. Manche et mer du Nord*, Versailles, Éditions Quæ, 78 p.

Ce projet a bénéficié d'un financement accordé par l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO). Ce travail est soutenu par l'École Universitaire de Recherche IFSEA qui bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la Recherche au titre du plan France 2030 portant la référence « ANR-21-EXES-0011 ».



Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées
sous licence CC-by-NC-ND 4.0.



© Éditions Quæ, 2024

ISBN (papier) : 978-2-7592-3865-1

ISBN (PDF) : 978-2-7592-3866-8

ISBN (ePub) : 978-2-7592-3867-5

ISSN : 1952-2770

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com – www.quae-open.com

Sommaire

Introduction	5
Zone d'étude	5
Utilisations des otolithes dans les sciences halieutiques	5
1. Différenciation des espèces par les caractéristiques morphologiques des otolithes	9
Choix des espèces et des prélèvements	10
Méthodologie	10
2. Présentation des espèces	21
Hareng commun	22
Anchois commun	24
Sardine commune	26
Sprat	28
Chinchard commun	30
Bar commun	32
Saint-pierre	34
Maquereau commun	36
Morue commune	38
Tacaud commun	40
Merlan	42
Églefin	44
Grondin rouge	46
Grondin perlon	48
Rouget barbet de roche	50
Sole commune	52
Limande-sole	54
Limande commune	56
Flet commun	58
Turbot	60

Plie commune	62
Barbue	64
Critères d'identification des espèces	66
Forme de l'otolithe liée à son habitat et à son morphotype	71
Conclusion	73
Bibliographie	74
Annexe. Paramètres d'acquisition des images pour chaque espèce de poissons	77

Introduction

Ce guide d'identification des principaux poissons de Manche et de mer du Nord regroupe 22 espèces. Il se veut être un outil pédagogique pour les étudiants et un public averti, mais aussi un outil de référence pour la recherche scientifique qui étudie les otolithes de ces espèces en archéologie ou pour identifier les poissons présents dans les contenus stomacaux de toutes les espèces qui mangent des poissons (phoques, oiseaux, poissons, etc.).

Zone d'étude

La Manche et la mer du Nord forment une région stratégique en Europe du Nord-Ouest d'un point de vue socio-économique et écologique¹. Elle représente une zone économique importante qui concerne de nombreuses activités humaines : tourisme et loisirs, ports internationaux et fret, exploitation de ressources vivantes ou non. Cet espace maritime supporte près de 20% du trafic mondial, ce qui en fait un des plus intenses au monde. Il recèle des réserves très importantes de granulats marins (sable, gravier) et de gaz, convoitées par de nombreux industriels. D'autres activités anthropiques se développent autour des énergies marines renouvelables, comme les éoliennes en mer et les hydroliennes.

La Manche et la mer du Nord soutiennent également une activité de pêche commerciale très importante, tant en quantité de poissons qu'en nombre d'espèces exploitées. Ainsi, parmi les 120 espèces identifiées en Manche-mer du Nord, une vingtaine d'entre elles représentent la quasi-totalité des espèces commerciales exploitées.

Utilisations des otolithes dans les sciences halieutiques

Le suivi des populations de poissons est réalisé chaque année pour atteindre le rendement maximum durable (RMD ou *Maximum Sustainable Yield*, MSY, en anglais) nécessaire à une politique commune des pêches soutenable dans l'avenir. Ainsi, les modèles statistiques utilisés dans le suivi des pêcheries requièrent pour chaque unité de gestion, appelée stock, de connaître la structure en âge et d'évaluer les limites de chacun de ces stocks (Cadrin et Dickey-Collas, 2015). Les pièces calcifiées (écailles, vertèbres, rayons de nageoire, otolithes, etc.), qui présentent une croissance par accréation périodique concentrique successive, permettent de déterminer l'âge. Parmi ces pièces calcifiées, seuls les otolithes, situés dans la cavité de l'oreille interne, sont métaboliquement inertes, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent ni s'altérer ni se

1. Pour plus d'informations sur la zone et le développement des activités humaines, se référer au document stratégique de la façade Manche Est-mer du Nord finalisé par la France : https://www.dirm.memn.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/straegie_de_facade_maritime_memnor_synthese.pdf (consulté le 15/04/2024).

résorber (Casselman, 1987). De plus, l'observation de leur structure interne montre qu'ils se développent selon une périodicité des dépôts de carbonate de calcium allant de la journée à l'année.

Les oreilles (droites et gauches, puisqu'il s'agit de structures paires situées de part et d'autre sous le cerveau) sont constituées d'un réseau de canaux qui relie trois cavités (appelées sacs otiques). Tout ce système est rempli d'un liquide appelé endolymphe (Panfili *et al.*, 2002). Les otolithes sont des concrétions formées en grande partie de carbonate de calcium qui sont présentes dans chaque cavité. La plus grande des cavités présente le plus grand otolithe, appelé *sagitta*. Ce dernier est utilisé pour quasiment toutes les études. Pour cette raison, c'est celui qui est présenté dans ce livre, où il est nommé otolithe. L'otolithe baigne dans la cavité otique, mais est relié à l'encéphale par une membrane appelée *macula* (Panfili *et al.*, 2002). Cette membrane est en contact avec l'otolithe sur sa face proximale (face interne) au niveau d'une gouttière nommée *sulcus acusticus* (figure 1). Cette membrane se répartit en trois parties selon un axe antéro-postérieur avec l'*excisura* (zone délimitée par le rostre et l'antirostre), l'*ostium* et la *cauda*. Les caractéristiques de cette zone sont en lien étroit avec le développement acoustique (détection des ondes sonores) et angulaire (détection des accélérations permettant l'équilibre de l'individu). La forme de l'otolithe, bien que très différente d'une espèce à l'autre, montre généralement une face interne proximale convexe et une face externe distale concave. En se positionnant sur la face interne, le développement de l'otolithe est souvent plus important sur l'axe antéro-postérieur (zone de mesure de la longueur de l'otolithe) par rapport à l'axe dorso-ventral (zone de mesure de la largeur de l'otolithe) (figure 1).

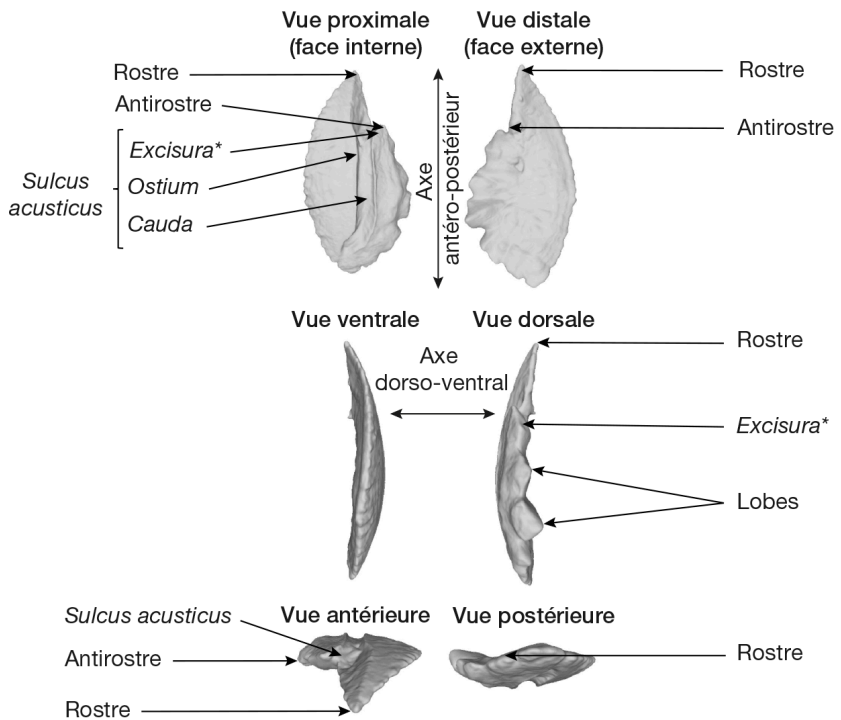


Figure 1. Présentation d'un otolithe droit à partir des différentes vues extraites de l'image en trois dimensions.

* *Excisura* : encoche séparant le rostre de l'antirostre.

Les otolithes, qui évoluent pendant toute la vie des poissons, présentent des signatures chimiques et physiques qui correspondent aux conditions biologiques et environnementales que le poisson a subies (Casselman, 1987). Il a fallu attendre la fin du XIX^e siècle pour que des scientifiques observent ces otolithes et comptent sur leur surface externe des accroissements présentant une périodicité et donc permettant d'estimer l'âge des poissons (Reibish, 1899). Depuis cette date, l'utilisation scientifique des otolithes n'a cessé de croître. Si l'âge et la croissance sont les premières informations extraites de ces otolithes, beaucoup d'autres recherches scientifiques utilisent la forme et la composition chimique de l'otolithe pour discriminer les populations au sein d'une espèce ou retracer les déplacements géographiques des individus. De même, il existe une relation significative entre la croissance du poisson et celle de ses otolithes (Lagardère et Troadec, 1997 ; Fossen *et al.*, 2003 ; Mahé *et al.*, 2017). En mesurant un otolithe d'une espèce, il est donc possible de connaître la taille du poisson auquel il appartenait. Ainsi, Campana et Thorrold (2001) ont estimé que près de 800 000 otolithes furent utilisés au niveau mondial durant la seule année 1999, pour connaître les structures en âge des espèces de poissons commerciaux, ce qui représentait une somme de l'ordre de 8 millions de dollars canadiens. De même, en 2010, un bilan européen des pièces calcifiées fournies par les différents pays pour suivre les stocks des eaux européennes était de 759 403 (CIEM, 2011). Ainsi, chaque année dans le monde, le nombre de pièces calcifiées analysées, essentiellement des otolithes, est supérieur au million.

L'utilisation de la forme externe de l'otolithe, au sein d'une espèce, s'est fortement développée dans la recherche pour mieux comprendre les populations de poissons et leurs limites géographiques. Cette forme intègre toutes les variations de conditions environnementales et de forçage climatique durant la vie du poisson et les caractéristiques génétiques des parents. Ces différences de forme de l'otolithe peuvent être attribuées à des différences géographiques liées à l'activité métabolique des organismes, cette dernière étant elle-même le résultat des facteurs environnementaux et de la composante génétique propre à chaque individu (Gauldie et Nelson, 1990 ; Smith, 1992 ; Begg et Brown, 2000). Cette utilisation de la forme de l'otolithe comme méthode pour discriminer les stocks s'est développée depuis les années 1990 avec en particulier les études de Pontual et Prouzet (1987) et Campana et Casselman (1993). Depuis les années 1990, les scientifiques ont développé un engouement certain à utiliser la forme de l'otolithe comme méthode de discrimination de stocks de poissons avec près de 50 articles scientifiques par an lors de ces dernières années. Le suivi réalisé chaque année par un groupe d'experts internationaux (Groupe de travail sur les méthodes d'évaluation des stocks, *Stock Identification Methods Working Group* en anglais, mis en place par le Conseil international pour l'exploration de la mer, CIEM) montre que l'analyse de forme des otolithes devient la principale méthode employée pour définir et valider les limites des stocks, devant l'analyse génétique. Ceci peut s'expliquer par les avancées récentes en matière d'analyse d'images et de traitement des données, en particulier avec le développement des outils statistiques tels que R (R Core Team, 2023), ou Shape (développé par Iwata et Ukai, 2002) qui permettent de réaliser des études par un plus grand nombre et à faible coût en comparaison avec l'approche des traceurs génétiques, en montrant des résultats généralement comparables. Depuis le début des années 1980, les otolithes sont également utilisés pour appréhender l'écologie des poissons, en se basant sur leur composition chimique. En effet, la chimie de l'otolithe est le reflet des facteurs exogènes (chimie de l'eau, profondeur, température, disponibilité trophique, facteurs de stress, pollutions

chroniques ou accidentelles, etc.) et endogènes (ontogénie, métabolisme, reproduction, santé, etc.) (Radtke et Shafer, 1992). En comparant la chimie de l'otolithe à la composition chimique de l'eau de différents endroits, il est possible de retracer le parcours géographique qu'a réalisé le poisson pendant sa vie en connaissant le temps passé dans chaque endroit si les compositions chimiques sont suffisamment distinctes.

1. Différenciation des espèces par les caractéristiques morphologiques des otolithes

La forme externe des otolithes permet d'identifier les différentes espèces de poissons auxquelles ils appartiennent. Ainsi, ces analyses sont utilisées lors d'études archéologiques (Disspain *et al.*, 2016 ; Agiadi, 2022) ou ciblées sur les relations proies-prédateurs au sein d'un réseau trophique (Lowry, 2011 ; Stock *et al.*, 2021 ; Quigley *et al.*, 2023). Entre les espèces (c'est-à-dire au niveau interspécifique), il a été démontré qu'il n'existait pas de lien entre la taille des individus et la taille de leurs otolithes (Campana, 2005). C'est ainsi que des poissons pélagiques² comme le thon ou l'espadon peuvent présenter des otolithes de petite taille ; et à l'inverse, certaines petites espèces récifales peuvent avoir des otolithes de grande taille (Campana, 2005). De même, les poissons présentant des qualités de nage rapide tendent à avoir des otolithes plus allongés que ceux d'espèces benthodémersales³ (Volpedo *et al.*, 2008 ; Tuset *et al.*, 2015).

La forme externe du poisson évolue du stade d'œuf à celui d'adulte. Sa morphologie change donc au cours de sa vie. Ce processus de développement s'appelle l'ontogénie. Si les facteurs génétiques et environnementaux sont des sources d'explications de la forme de l'otolithe, ce principe d'ontogénie joue lui aussi un rôle. Ainsi, pour un même individu, la forme de l'otolithe évolue au cours de sa vie. Il faut donc tenir compte du stade de vie. Dans cet ouvrage, plusieurs individus, répartis le long de gradient de tailles observées dans le milieu naturel, par espèce, couvrant les différents stades de vie (juvéniles, jeunes adultes, adultes déjà reproduits, etc.) sont présentés et analysés (figure 2).

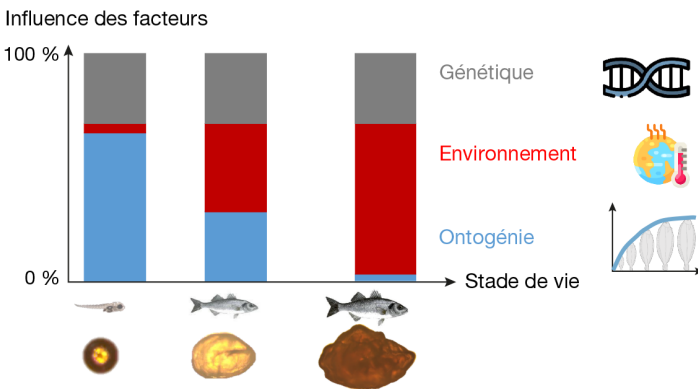


Figure 2. Influence des facteurs potentiels (ontogénie, environnement, hérédité génétique) sur la forme du poisson et de son otolithe à chaque stade de vie.

2. Les poissons pélagiques évoluent essentiellement en haut de la colonne d'eau, c'est-à-dire à proximité de la surface.

3. Les espèces benthiques vivent en bas de la colonne d'eau, c'est-à-dire à proximité du fond, et se nourrissent principalement d'animaux dans ou sur le fond. Les espèces benthodémersales vivent à proximité du fond, mais peuvent également être une partie du temps au milieu de la colonne d'eau.

Choix des espèces et des prélèvements

Puisque l'exploitation commerciale ne concerne très majoritairement qu'une vingtaine d'espèces parmi les 120 identifiées en Manche-mer du Nord, les 22 espèces de poissons les plus exploitées commercialement ont été retenues en prenant de trois à cinq individus par espèce afin de pouvoir comparer les otolithes au sein d'une espèce ou entre les espèces. Le choix du nombre d'individus permet à l'ensemble de la gamme de tailles de chaque espèce d'être représentée de manière précise. Pour les stades adultes, il s'agit d'individus de différentes tailles, sans se limiter aux mâles ou aux femelles. Parmi ces espèces, il y a deux morphotypes différents que sont les poissons plats, fortement en interaction avec le fond, et les poissons ronds ayant une interaction moins forte avec le fond. De plus, ces espèces vivent différemment dans la colonne d'eau : certaines sont pélagiques et d'autres benthiques. Tous les prélèvements d'individus ont été réalisés par l'institut Ifremer, en particulier l'équipe de l'unité halieutique Manche-mer du Nord, à travers des campagnes scientifiques réalisées sur le navire océanographique Thalassa. Ces échantillons ont été prélevés en Manche et mer du Nord dans le cadre du suivi international des populations de poissons permettant d'évaluer l'état de santé des populations commerciales de poissons. Les deux campagnes scientifiques menées par l'Ifremer chaque année pour la France couvrant la Manche et la mer du Nord ont été utilisées : *International Bottom Trawl Survey* (IBTS, en janvier et février) et *Channel Ground Fish Survey* (CGFS, en septembre et octobre).

Méthodologie

Acquisition des images en 3D

Principe général de la microtomographie à rayons X

La technique utilisée pour l'acquisition des images des différents otolithes s'appelle la microtomographie⁴ à rayons X. Il s'agit d'une technique non destructive et non invasive, utilisée pour la caractérisation de la microstructure des matériaux denses et poreux. Ainsi, cette technique est employée dans des secteurs variés comme le domaine médical, celui des matériaux, de l'archéologie ou encore le domaine agroalimentaire. La microtomographie à rayons X permet d'avoir accès à la géométrie 3D d'un échantillon à partir d'images acquises en 2D. En effet, l'appareil réalise l'acquisition de multiples radiographies lors de la rotation de l'objet d'un certain nombre de tours. Un logiciel de reconstruction transforme alors les images en 2D en une image volumique en 3D.

La figure 3 présente schématiquement le principe de l'acquisition en microtomographie à rayons X. L'échantillon est placé dans la chambre d'acquisition de l'appareil, les rayons X traversent l'échantillon. En fonction de la densité de l'échantillon, ces rayons sont plus ou moins atténués et sont recueillis en sortie par un détecteur qui permet d'obtenir une radiographie de l'échantillon. La rotation de l'échantillon sur lui-même rend possible l'acquisition de multiples radiographies prises sous différents angles.

4. Le terme « microtomographie » provient de la source de rayons X, un tube scellé avec un foyer d'un diamètre de l'ordre du micromètre.

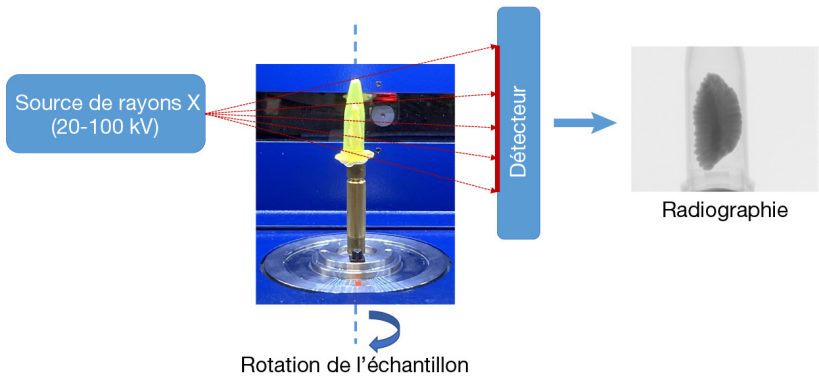


Figure 3. Schéma du principe de la microtomographie à rayons X.

L'acquisition par microtomographie est définie en fonction de plusieurs paramètres spécifiques.

Les paramètres de tension (en kilovolt) et d'intensité (en milliampère) d'un générateur à rayons X contrôlent l'énergie maximale et la quantité de photons X émis par la source. Ainsi, la puissance des rayons X envoyés est déterminée par le couple tension / intensité de courant en fonction de la densité de l'échantillon. Plus cette dernière est grande, plus la puissance des rayons X nécessaire à la détection de l'objet par le capteur sera élevée.

Un filtre peut être positionné entre la source et l'échantillon afin de durcir le faisceau de rayons X. Le filtre permet d'éliminer les photons de plus faible énergie et de conserver les photons de plus forte énergie, qui traverseront mieux l'échantillon. Il peut être en aluminium ou en cuivre, par exemple. Le choix de l'utilisation ou non d'un filtre dépend de la densité de l'échantillon. En effet, les échantillons denses sont difficiles à traverser par le rayonnement X. Il est alors nécessaire d'en augmenter la puissance. Cependant, si la puissance des rayons X est élevée, le détecteur reçoit une trop grande quantité de photons (qui ne sont pas absorbés par l'objet), ce qui crée du bruit sur l'image. En éliminant les photons de plus faible énergie, les photons parasites ne seront pas détectés et l'image sera moins bruitée. L'utilisation de filtres est donc recommandée lorsque les échantillons sont denses. En revanche, l'utilisation de filtres implique une augmentation du temps d'exposition, et donc du temps d'acquisition. Le pas de rotation de l'échantillon est le degré de rotation qu'effectue l'objet entre chaque prise de radiographie. Cet angle choisi, ainsi que le nombre de tours de l'échantillon, conditionnent également le temps d'acquisition de l'image (qui peut aller de quelques minutes à plusieurs heures). Par exemple, si un pas de rotation de $0,2^\circ$ est choisi avec une rotation totale de 360° , ce seront 1 800 radiographies de l'échantillon qui seront acquises (une tous les $0,2^\circ$), et deux fois moins si une rotation de 180° est choisie. Néanmoins, même si le temps d'acquisition est plus long, une rotation de 360° sur l'ensemble de l'échantillon permet une meilleure reconstruction de l'image en 3D pour un échantillon hétérogène. Un compromis entre qualité de l'image, détails et temps d'acquisition a été réalisé pour chaque espèce (annexe).

La résolution nominale, exprimée en voxel⁵ ou en micromètre, définit la taille minimale des éléments observables de l'objet (par exemple, si la résolution

5. Voxel : unité de taille en imagerie 3D. Il est l'équivalent du pixel en imagerie 2D.

nominale est de $10\ \mu\text{m}$, aucun élément de moins de $10\ \mu\text{m}$ ne peut être observé). La résolution nominale appliquée est fonction de la taille de l'échantillon. En effet, plus un échantillon est petit, plus il peut être approché de la source, et meilleure est la résolution nominale.

Une fois l'acquisition terminée, un logiciel de reconstruction d'images permet de générer des coupes virtuelles en 2D de l'échantillon, à partir des radiographies. Un empilement de sections en 2D est ainsi obtenu. Ces coupes virtuelles contiennent les informations de densité de l'échantillon en niveaux de gris. À partir de cet empilement de sections, un autre logiciel permet ensuite de construire une image 3D en rendu volumique (figure 4). Notez que les images 3D obtenues à cette étape donnent uniquement lieu à une visualisation 3D de l'échantillon scanné, et que des étapes supplémentaires (voir *Segmentation*) sont nécessaires pour obtenir des images 3D exploitables pour la caractérisation morphologique des objets étudiés.

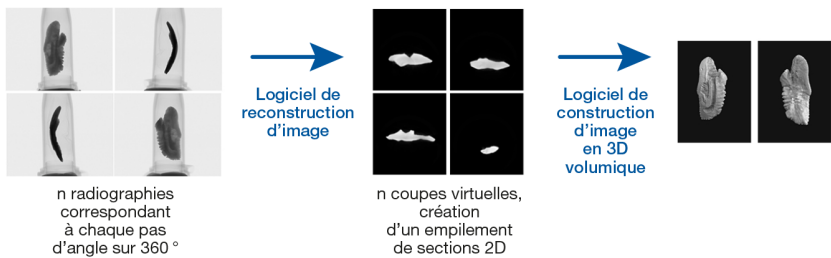


Figure 4. Schéma représentant la reconstruction d'image acquise par microtomographie à rayons X.

Matériel pour l'acquisition d'images d'otolithes

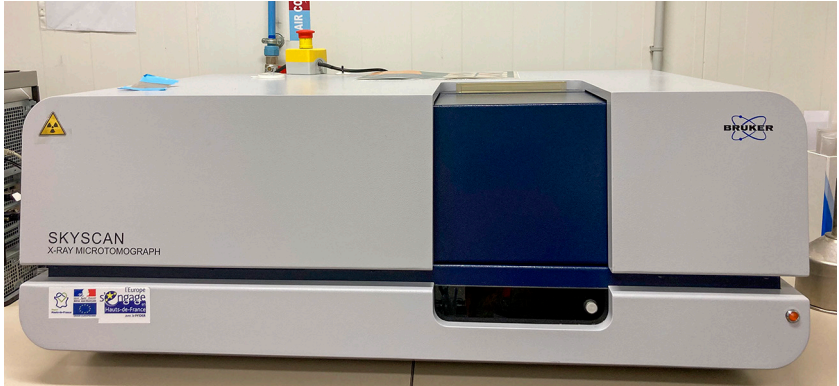
La liste ci-dessous ne donne qu'un aperçu non exhaustif des appareils de microtomographie à rayons X qu'il est possible d'employer pour scanner des otolithes. Cette liste a été établie à partir des appareils possédés par les laboratoires participant à l'étude présentée dans cet ouvrage.

SKYSCAN 1174 DE BRUKER



Depuis 2014, le laboratoire Biogéosciences s'est équipé d'un appareil de microtomographie à rayons X, le Skyscan 1174. Cet instrument plutôt basique est idéal pour de petits échantillons de faible densité, mais possède un temps d'acquisition assez long (environ 45 minutes). La puissance du tube limitée à 50 kV avec un détecteur de 1,3 mégapixel permet de générer des images 3D avec une taille de voxel minimale de 6 μm (dans des conditions optimales). Les échantillons peuvent mesurer jusqu'à 50 mm de long, et 30 mm de diamètre.

SKYSCAN 1275 DE BRUKER



L'équipe artoise de l'UMRt BioEcoAgro a fait l'acquisition en 2018 d'un microtomographe Skyscan 1275 de marque Bruker. Celui-ci possède un tube scellé avec un diamètre de foyer de 5 μm pouvant délivrer une tension allant de 20 à 100 kV. Il permet une acquisition rapide pour des échantillons ayant un diamètre pouvant atteindre 96 mm, et d'une hauteur maximale de 120 mm. Il peut être utilisé pour diverses applications.

EASYTOM S 150 - RX SOLUTIONS



Acquis en 2023 par le laboratoire Biogéosciences, cet instrument offre des caractéristiques améliorées : une résolution spatiale plus élevée, des temps d'acquisition plus courts ainsi que le balayage d'échantillons de plus grande taille que le Skyscan 1174. Des images de haute qualité peuvent être acquises à l'aide d'une source de rayons X à haute énergie (150 kV) et d'un capteur plan

de 1920×1536 pixels, sensible et de grand format. Cela permet de générer des images 3D avec une taille minimale de voxel de $6 \mu\text{m}$ (dans des conditions optimales). Les échantillons peuvent mesurer jusqu'à 400 mm de long pour 200 mm de diamètre, et peser jusqu'à 5 kg .

L'appareil utilisé pour l'étude des otolithes présentée dans cet ouvrage est le microtomographe Skyscan 1275 de marque Bruker de l'UMRt BioEcoAgro.

Pour chaque espèce étudiée, trois à cinq otolithes appartenant à des individus de tailles (et donc d'âges) différentes ont été scannés. Les otolithes ont été placés sur des supports en polystyrène et maintenus par du ruban adhésif, ces derniers ayant la particularité d'être radiotransparents (c'est-à-dire qu'ils ne se voient pas sur une radiographie). Ce dispositif est ensuite introduit dans un microtube en plastique qui est lui-même fixé sur le porte-objet de l'appareil (figure 5).

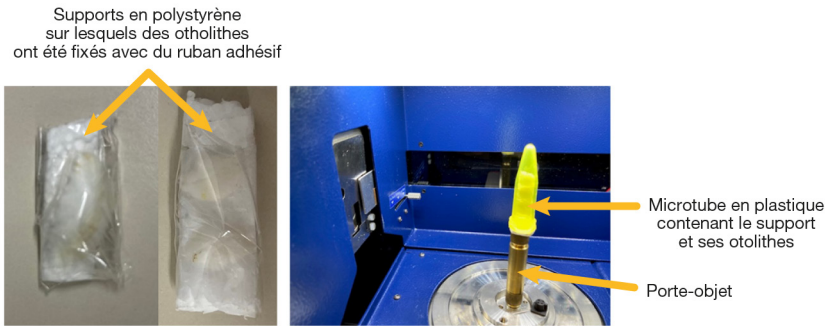


Figure 5. Préparation des otolithes pour l'acquisition d'images à l'aide d'un microtomographe à rayons X.

À gauche, photographie d'otolithes fixés sur un support en polystyrène avec du ruban adhésif ; à droite, photographie du dispositif permettant l'acquisition d'image dans le microtomographe Skyscan 1275.

Le réglage des paramètres d'acquisition des images dépend de l'espèce. En effet, les otolithes n'ont pas tous la même taille ni la même densité. Un filtre aluminium de $0,5 \text{ mm}$ ou 1 mm d'épaisseur est nécessaire pour l'acquisition des images. La résolution nominale utilisée est de $10 \mu\text{m}$ pour la grande majorité des échantillons, mais peut atteindre $24 \mu\text{m}$ pour les otolithes les plus grands (annexe). L'acquisition est faite sur 360° avec un pas d'angle de $0,3^\circ$, générant 1200 radiographies par otolithe. Dans ces conditions, la durée d'acquisition pour chaque échantillon est d'environ 40 minutes.

Reconstruction des images

Le logiciel NRecon (v.1.7.3.1) est utilisé pour reconstruire les coupes transversales des otolithes à partir des radiographies acquises par le microtomographe. Le programme utilise l'algorithme de Feldkamp, une formule de convolution et de rétroprojection permettant la reconstruction d'une fonction de densité tridimensionnelle à partir d'un ensemble de projections bidimensionnelles. En effet, les radiographies acquises par la microtomographie sont des équivalences en niveau de gris des densités des matériaux (les densités élevées sont codées par des niveaux de gris élevés, c'est-à-dire tirant vers le blanc). L'algorithme compile cet ensemble d'images en un volume de densités, puis crée des coupes dans le plan transversal de ce volume, à intervalles réguliers. Cette étape de reconstruction est automatisée et permet également l'optimisation de paramètres tels que l'alignement du volume, la correction d'artefacts ou la sélection de zones d'intérêt. Les images de coupes sont enregistrées au format TIFF.

Segmentation

L'étape de segmentation des coupes virtuelles a pour but de distinguer, dans le volume 3D résultant de ces coupes, des zones d'intérêts correspondant aux objets étudiés. En l'occurrence, il s'agit de distinguer les voxels représentant les otolithes, des voxels de l'arrière-plan sur des critères simples de niveaux de gris (l'otolithe étant dense par rapport à l'arrière-plan, les voxels le constituant seront donc clairs) et d'adjacence (l'otolithe constituant un objet continu). Cette étape de segmentation est réalisée à l'aide du logiciel 3DSlicer (v.4.10.2). Un seuillage des niveaux de gris des voxels (*threshold* en anglais) est réalisé afin de sélectionner la totalité des voxels constituant les otolithes (figure 6). La surface de cet ensemble de voxels sélectionnés est ensuite extraite sous forme d'un maillage 3D (*mesh 3D*). Ce type d'objet modélise une surface 3D sous forme d'un nuage de points (vertex) reliés entre eux par une triangulation.

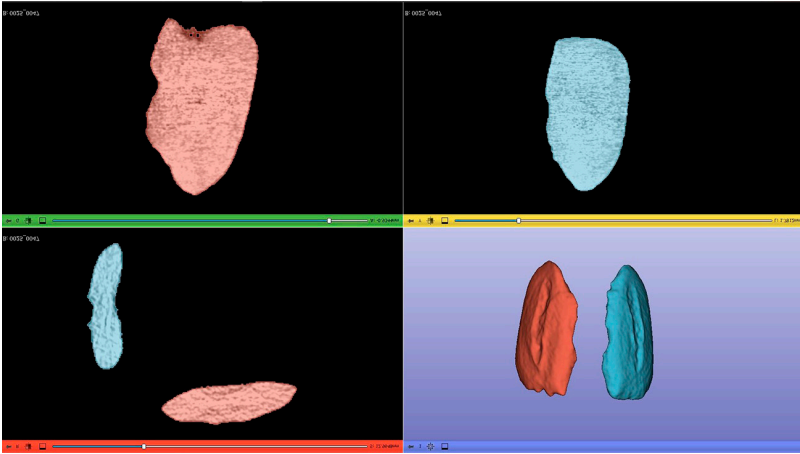


Figure 6. Ouverture des coupes d'un otolithe sous Slicer 3D.

Les coupes sont visualisées selon trois plans orthogonaux (dans les trois fenêtres à fond noir). Après une segmentation de l'otolithe par seuillage, la surface 3D de l'otolithe est modélisée sous forme de maillage (dans la fenêtre à fond bleu).

Extraction des données de forme de l'otolithe

Harmoniques sphériques

Les surfaces 3D des otolithes, modélisées sous forme de maillages issus de la segmentation des volumes 3D acquis par microtomographie, sont ensuite analysées par des outils de morphométrie géométrique (voir, par exemple, Claude 2008 pour un aperçu des différents outils). Cette discipline, employée dans les sciences de l'évolution (biologie et paléontologie), a pour but de quantifier les variations morphologiques des organismes (dans leur ensemble ou en s'attachant à certaines parties) par des moyens mathématiques (géométrie et statistique), et d'appréhender les causes de ces variations morphologiques (relation avec des facteurs environnementaux, par exemple), leur évolution temporelle (de l'échelle de temps développemental à l'échelle de temps paléontologique) et leur diversité (actuelle ou passée).

Parmi les outils proposés par la morphométrie géométrique, nous avons ici utilisé la méthode des harmoniques sphériques (acronyme anglais : Spharm ; Shen *et al.*, 2009) pour caractériser les morphologies 3D des surfaces des

otolithes. Cette méthode fait partie de l'approche plus large de la morphométrie géométrique appelée analyse de contour, essentiellement employée en 2D, qui s'attache à décrire le contour 2D par des fonctions mathématiques de type séries de Fourier (Claude, 2008). Le contour est d'abord discrétisé par une série de points, caractérisés par leurs coordonnées x et y . Les variations de ces coordonnées le long du contour sont ensuite traitées comme des signaux par les fonctions de Fourier. Ces fonctions se composent d'une somme de termes sinusoïdes (sinus ou cosinus) à fréquence croissante. Les termes à basse fréquence décrivent les aspects généraux du contour 2D (c'est-à-dire de la forme 2D), et les termes à haute fréquence les détails plus fins de ce contour. La combinaison de ces termes à différentes fréquences (grâce à leur somme) décrit le contour 2D dans son ensemble (à la fois les aspects généraux et les détails locaux). À ces termes sinusoïdes sont associés des coefficients qui donnent un poids plus ou moins important à tel ou tel terme. Entre différents contours, ce sont ces coefficients (poids) qui traduisent des différences d'aspect entre les contours 2D (donc des différences de formes). Pour que ces coefficients soient comparables d'un individu à l'autre, un certain nombre de standardisations ou normalisations préalables à leurs calculs sont nécessaires. Ainsi, chaque contour est décrit par un nombre identique de points espacés de manière régulière. Les contours sont aussi standardisés par leurs positions, leurs tailles et leurs orientations qui n'informent pas sur des différences de formes entre individus. De plus, le calcul de ces séries de Fourier et des coefficients reste sensible au sens de parcours des contours (horaire ou antihoraire) ainsi qu'à la définition d'un point de départ sur ce parcours : ces deux aspects doivent aussi être standardisés entre individus.

Pour les surfaces 3D, le principe général de la méthode Spharm reste le même que celui décrit pour les contours en 2D :

- discrétisation des surfaces 3D au moyen des vertex des maillages ;
- approximation de ces surfaces 3D par le calcul d'harmoniques sphériques qui décrivent les variations en x , y et z de ces surfaces (figure 7) ;
- calcul de coefficients issus de ces fonctions harmoniques sphériques décrivant les détails plus ou moins fins des surfaces selon la fréquence de leurs harmoniques (figure 8).

La méthode va essentiellement se différencier au niveau des standardisations préalables et nécessaires au calcul de ces coefficients. Sans rentrer dans leurs détails, comprenons, par exemple, que le choix binaire de parcourir un contour 2D dans le sens horaire ou antihoraire n'a plus de signification pour une surface 3D. Ainsi, pour rendre homologues les surfaces entre elles, la méthode Spharm passe par une cartographie des vertex des surfaces 3D sur une sphère de référence, tout en les identifiant de manière unique et homologue entre elles (figure 9). Ces étapes vont correspondre en 3D à la standardisation des contours (nombre de points et point de départ) et de leurs parcours (horaire ou antihoraire) en 2D.

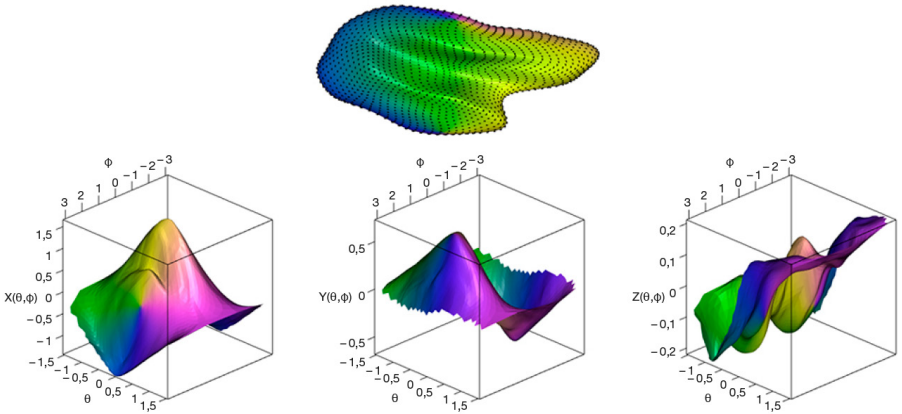


Figure 7. Représentation des trois signaux $X(\theta, \Phi)$, $Y(\theta, \Phi)$, et $Z(\theta, \Phi)$ qui seront traités par l'analyse Spharm et décomposés en harmoniques sphériques.

Le maillage de la surface de l'otolithe de sardine (en haut) se caractérise par les coordonnées cartésiennes X, Y et Z des vertex (points noirs) qui le composent. Chacun de ces vertex a une correspondance unique avec chacun des vertex de la sphère de référence (figure 9). Les coordonnées des vertex de cette sphère peuvent s'exprimer sous forme de coordonnées sphériques (r, θ, Φ) : à chaque couple (θ, Φ) de la surface de la sphère correspond un vertex unique de cette sphère, qui peut lui-même se cartographier de manière unique sur la surface de l'otolithe. Les trois graphiques de la ligne inférieure représentent ainsi respectivement les variations X, Y et Z des vertex du maillage de l'otolithe pour chaque couple (θ, Φ) des vertex de la surface de la sphère de référence. Le dégradé de couleur symbolise l'homologie des vertex entre les surfaces.

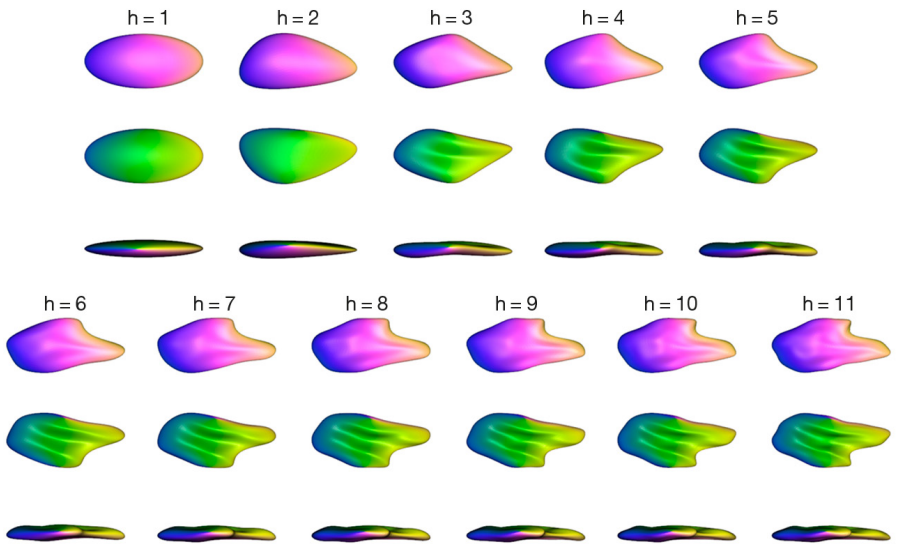


Figure 8. Visualisation de l'effet du nombre d'harmoniques (h) utilisées pour reconstruire le contour d'un otolithe de sardine.

Ce nombre varie par colonne, de 1 à 11 harmoniques. Notons que la surface de l'otolithe est reconstruite d'autant plus précisément que le nombre d'harmoniques considérées est important. Toutefois, à partir d'un certain nombre d'harmoniques (environ neuf ici), le niveau de détail ajouté en augmentant ce nombre devient négligeable. Le dégradé de couleur symbolise l'homologie des vertex entre les surfaces. Trois vues orthogonales de l'otolithe sont reportées.

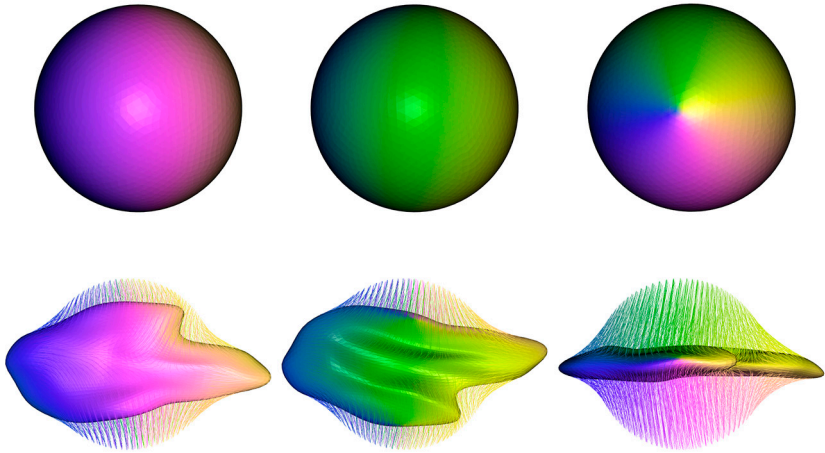


Figure 9. Visualisation de la cartographie de la surface d'un otolithe de sardine (modélisée sous forme de maillage) sur la sphère de référence utilisée lors de l'analyse Spharm.

Le dégradé de couleur symbolise l'homologie des vertex entre les deux surfaces. De la même manière, les segments partants du maillage de l'otolithe représentent comment les vertex de la sphère se projettent sur les vertex de l'otolithe. Trois vues orthogonales sont reportées. Pour un ensemble de surfaces 3D, la méthode Spharm estime également une surface moyenne (reflétant une morphologie moyenne d'otolithe). C'est sur cette surface 3D moyenne, prise comme référence, que sont alignées les surfaces individuelles. Pour les analyses effectuées par la suite, la méthode Spharm a été appliquée en utilisant onze harmoniques et en simplifiant (par décimation) chaque maillage individuel à 1 000 vertex. Au préalable, six points remarquables (figure 10) ont dû être placés sur chaque maillage (pour les préorienter), et les maillages d'otolithes gauches ont été symétrisés pour obtenir des formes droites.

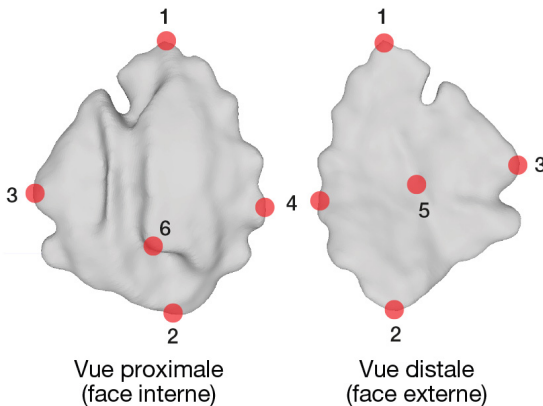


Figure 10. Volumes 3D de l'otolithe en face interne et externe avec six points remarquables (points rouges).

1 : rostre ; 2 : *postrostrum* ; 3 : extrémité du dorsal ; 4 : extrémité du ventral ; 5 : milieu de la face externe de l'otolithe ; 6 : sommet du *sulcus acusticus*.

Traitement multivarié

Pour synthétiser et visualiser les principaux motifs de variation de forme des otolithes entre les espèces, les coefficients issus de l'analyse Spharm pour chaque individu ont été traités par une analyse en composantes principales (ACP). Cette analyse statistique multivariée permet de construire de nouvelles

variables (appelées composantes principales ou CP), non corrélées entre elles, construites à partir des variables initiales (ici, les coefficients Spharm), et résumant chacune un aspect donné de la variance initiale contenue dans les données. Ces composantes sont ordonnées selon la quantité de variance qu'elles expliquent (la première CP résumant plus de variance que la seconde, elle-même plus que la troisième, et ainsi de suite). À partir d'une série de variables initiales partiellement corrélées entre elles (ce qui est souvent le cas en morphométrie), il est attendu que la variance initiale contenue dans une grande quantité de variables puisse être résumée efficacement par seulement quelques CP. Il est ainsi possible de visualiser, au moyen de graphiques bivariés de CP, la dispersion des individus selon ces CP, et de visualiser les différences ou ressemblances morphologiques entre ces individus. Chaque composante résumant un aspect de variation morphologique, nous pouvons également visualiser cet aspect de variation au moyen de maillages 3D théoriques (ne reflétant pas directement un individu réel) calculés aux extrémités de chacune des CP, ce qui permet d'interpréter les variations de formes expliquées par chaque CP, et partant, les différences ou ressemblances morphologiques entre les individus.

Ces analyses statistiques ainsi que le traitement Spharm ont été effectués à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2020, version 4.0.3).

Métriques de taille de l'otolithe

À partir des maillages 3D des otolithes, un certain nombre de métriques de taille ont été estimées. Ainsi, pour calculer respectivement la longueur, la largeur et la hauteur de l'otolithe, les distances entre les points 1 et 2, puis 3 et 4, puis 5 et 6 ont été calculées (figure 10). De plus, la surface et le volume de l'otolithe ont été estimés avec les fonctions `vcgArea` et `vcgVolume` du package `Rvcg` de R (Schlager, 2017).

2. Présentation des espèces

Le choix de l'ordre de présentation des espèces a été fait pour que les espèces ayant les otolithes les plus ressemblants soient présentées de manière consécutive. Ce classement a été réalisé selon quatre critères :

- le morphotype : les poissons ronds puis les poissons plats ;
- l'habitat traduisant la position du poisson dans la colonne d'eau : les espèces pélagiques (évoluant près de la surface), les espèces démersales (évoluant dans la partie centrale de la colonne d'eau) puis les espèces benthiques (évoluant sur le fond et en relation étroite avec celui-ci) ;
- la taxonomie : les espèces ont été regroupées selon les ordres et les familles auxquels elles appartiennent ;
- l'ordre alphabétique : en dernier lieu, l'ordre alphabétique a été respecté pour les espèces d'un même morphotype, d'un même habitat et ayant la même classification taxonomique.

Chaque espèce est présentée en double page.

La page de gauche concerne la présentation de l'espèce : ses caractéristiques biologiques, l'environnement dans lequel elle évolue et les grands traits de son cycle de vie. Toutes les informations ont été extraites des deux rapports de synthèse coordonnés par l'Ifremer (Mahé *et al.*, 2007 ; Carpentier *et al.*, 2009).

La page de droite concerne la description détaillée de l'otolithe : sa description générale, les différentes vues extraites de la reconstruction 3D de l'otolithe gauche des individus répartis dans la gamme de tailles des captures, la longueur affichée (longueur totale mesurée de l'extrémité de la tête à celle de la queue), les relations entre les métriques de l'otolithe (longueur, largeur, hauteur, surface et volume) et la longueur totale du poisson, ainsi que l'évolution de l'otolithe au cours de la vie de l'espèce pour pouvoir identifier les différences entre les stades de vie au sein d'une même espèce.

Hareng commun

Nom latin : *Clupea harengus*

Nom anglais : *Atlantic herring*

Ordre : Clupéiformes

Famille : Clupeidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le hareng commun est présent dans les eaux du plateau continental de l'Atlantique Nord, depuis la mer Blanche et l'Islande jusqu'au détroit de Gibraltar.

■ Environnement

Poisson pélagique. La nuit, les harengs vivent en surface ou entre deux eaux et le jour, ils se regroupent sur le fond. Le hareng est présent depuis la surface jusqu'au fond sur tout le plateau continental (de 0 à 200 m de profondeur). Il y a une corrélation positive entre la bathymétrie et la taille du poisson. Ainsi, les poissons les plus gros sont en général dans les eaux les plus profondes. Le hareng a une préférence pour les sédiments graveleux et sableux.

■ Biologie et cycle de vie

Le hareng atteint sa première maturité sexuelle entre 4 et 5 ans et vers 30 cm. Il pond à proximité du fond (5 à 20 m de profondeur). En Manche-Est, le littoral de Fécamp à Dunkerque est une grande frayère pour le hareng. La saison du frai en Manche orientale commence fin novembre, atteint son point culminant en décembre pour décroître en janvier et prendre fin en février. Le nombre d'œufs pondus est directement lié à la taille de la femelle. Les œufs tombent sur le fond et adhèrent au substrat. Les larves se retrouvent, dès le mois d'avril, près des côtes françaises entre Boulogne-sur-Mer et Dieppe. Les juvéniles remontent en mer du Nord pour redescendre en Manche en automne dès qu'ils pourront se reproduire.

En mer du Nord, il existe trois sous-populations qui migrent pour se reproduire. Ainsi, la sous-population appelée stock des Downs se déplace en mer du Nord, mais aussi en Manche-Est. Les poissons qui fraient en mer du Nord centrale, le long des côtes anglaises et autour du banc Dogger, et ceux qui fraient dans les Downs partagent les mêmes aires d'alimentation au centre de la mer du Nord, mais se séparent pour, chaque année, se reproduire. Après la ponte, les géniteurs migrent vers le centre de la mer du Nord pour s'y nourrir pendant l'été. En automne, les harengs qui fraient dans les Downs reprennent la direction du sud, pour réapparaître en Manche au cours du mois de novembre.

Le hareng se nourrit essentiellement de zooplancton (copépodes, amphipodes et mysidacés) dont il suit les migrations verticales journalières. Il choisit une proie selon sa taille, mais aussi selon la saison.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout oblongue à elliptique. Légèrement lobé sur la totalité du contour avec l'âge. Le rostre est proéminent, tout comme l'antirostre qui représente un tiers de la taille du rostre. L'*ostium* est plus long que la *cauda*, qui est très peu profonde. De moyenne à petite taille en comparaison aux autres espèces de même taille.

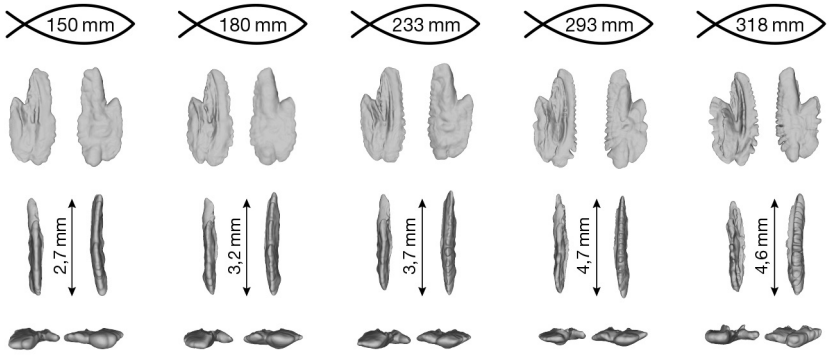


Figure 11. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du hareng commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

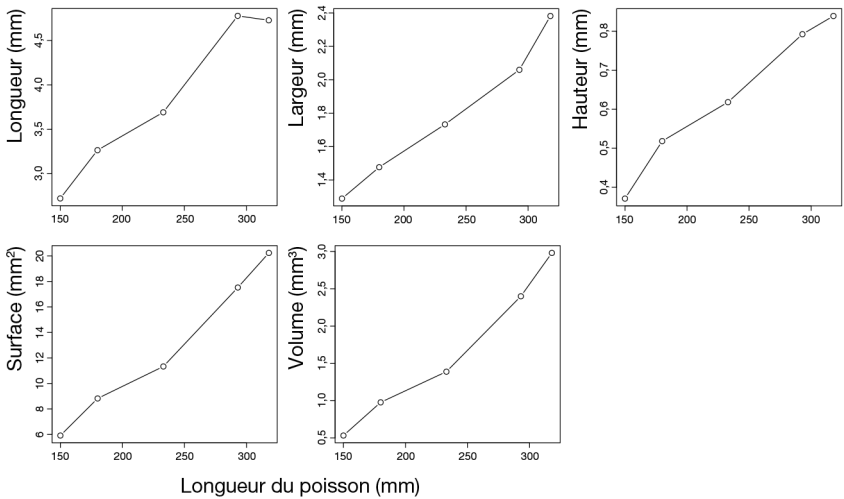


Figure 12. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du hareng commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 15 et 32 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,7 et 4,6 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement proche de celle du poisson. Cependant, la morphologie de l'otolithe du hareng présente un contour qui évolue, étant de plus en plus dentelé et donc complexe. De même, le *sulcus* croît de la partie antérieure vers la partie postérieure, en particulier au niveau de la *cauda*.

Anchois commun

Nom latin : *Engraulis encrasicolus*

Nom anglais : *European anchovy*

Ordre : Clupéiformes

Famille : Engraulidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

L'anchois commun est distribué dans l'Atlantique Nord-Est, du Maroc aux mers du Nord et Baltique et en mers Méditerranée et Noire. Il est particulièrement abondant sur les côtes espagnoles et dans le golfe de Gascogne. Au xx^e siècle, il existait une pêcherie d'anchois dans la mer de Wadden, située à l'est de la mer du Nord, qui a complètement disparu depuis 1962. À l'inverse, depuis quelques années, des anchois sont présents au nord-ouest de la mer du Nord et en Manche.

■ Environnement

Poisson pélagique grégaire, c'est-à-dire qu'il vit en bancs dans la colonne d'eau. Il est présent de la côte jusqu'à 150 m de fond. Son mode de vie est davantage lié aux caractéristiques des masses d'eaux qu'à des profondeurs ou des latitudes particulières. Ainsi, au nord-ouest de la mer du Nord, l'apparition d'anchois est directement liée à l'augmentation de la température, qui permet la présence d'espèces phytoplanctoniques « chaudes », particulièrement des calanoïdes copépodes, dans des aires géographiques situées très au nord. De plus, certaines années de fortes chaleurs, il peut être observé plus au nord que sa distribution géographique usuelle, jusqu'à la Scandinavie. De même, selon les années, les anchois de mer Celtique peuvent migrer en Manche. Enfin, l'abondance et la croissance de l'anchois sont corrélées aux facteurs de température et de production primaire.

■ Biologie et cycle de vie

L'anchois atteint sa première maturité sexuelle à 11,5 cm dans le golfe de Gascogne, ce qui correspond à un âge d'un an. Toujours dans le golfe de Gascogne, il se reproduit d'avril à août, les poissons les plus âgés commençant dès avril, suivis des plus jeunes en mai. La reproduction a lieu à cette période, car les températures élevées offrent des conditions favorables de nutrition.

Il pond par lots à raison d'environ 30 pontes dans la saison, soit une tous les 3 à 4 jours. La ponte s'effectue entre 22 h et 2 h du matin, très près de la surface. Une fois pondus, les œufs puis les larves dérivent au gré des courants (migration passive). Après la ponte, d'août à novembre, les anchois ont une forte croissance (75 % de la croissance annuelle).

L'anchois se nourrit principalement de zooplancton, en particulier de petits crustacés comme les copépodes, de larves de mollusques et d'œufs et alevins de poissons.

■ Description de l'otolithe

De forme elliptique et allongée. Le rostre est proéminent et pointu; l'antirostre aussi, mais il est plus court et moins pointu. Rostre et antirostre sont convexes sur les deux faces. L'*ostium* est plus long que la *cauda*, et il a une forme d'entonnoir. La *cauda* est linéaire et fermée. Le *sulcus* est fortement dentelé.

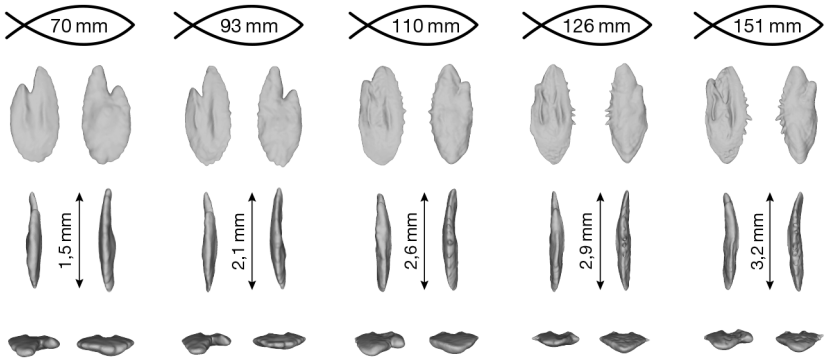


Figure 13. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de l'anchois commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

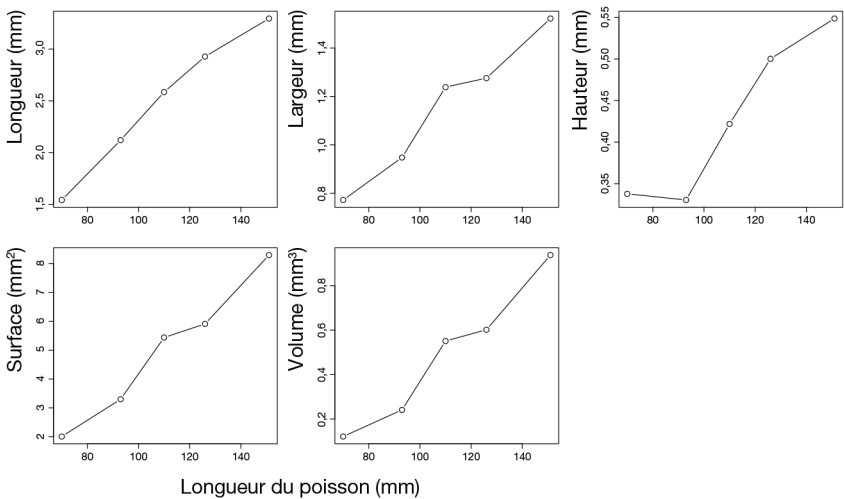


Figure 14. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de l'anchois commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 7 et 16 cm pour des otolithes présentant des longueurs entre 1,5 et 3,2 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance comparable à celle du poisson. L'otolithe d'anchois présente une augmentation rapide de sa longueur et de sa largeur. À l'inverse, la hauteur de l'otolithe augmente dès que le poisson dépasse 10 cm. Remarquez que la forme change, avec des otolithes montrant un *excisura* très marqué pour les poissons entre 7 et 10 cm. Cette zone est ensuite beaucoup moins marquée chez les adultes, mais la forme externe devient plus dentelée.

Sardine commune

Nom latin : *Sardina pilchardus*

Nom anglais : *European pilchard*

Ordre : Clupéiformes

Famille : Clupeidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

La sardine commune vit en Atlantique Nord-Est, de la Norvège et de l'Écosse jusqu'au Sénégal. La sardine atlantique septentrionale est pêchée au nord jusqu'aux limites des eaux irlandaises et au sud de la mer du Nord. Cependant, les deux zones de pêche importantes sont d'une part, les côtes du golfe de Gascogne et d'autre part, la Manche. Elle est présente et pêchée également en Méditerranée.

■ Environnement

Poisson pélagique grégaire. La sardine vit en bancs qui peuvent être de très grande taille, localisés près de la surface pendant la nuit (de 15 à 40 m de la surface) et plus profonds le jour (de 30 à 50 m de la surface), depuis les eaux côtières jusqu'à 120 m de fond. La répartition de la sardine est fortement conditionnée par la température. Ainsi, au nord-ouest de la mer du Nord, l'apparition de la sardine est directement liée à l'augmentation de la température, qui permet la présence d'espèces phytoplanctoniques « chaudes », particulièrement des calanoïdes copépodes, dans des aires géographiques situées très au nord. De plus, la sardine atlantique septentrionale est divisée en deux groupes qui diffèrent par leur phénotype directement lié aux conditions environnementales (température et salinité) lors de leur développement larvaire.

■ Biologie et cycle de vie

La sardine atteint sa taille de première maturité sexuelle vers 19 cm en Manche. La croissance est similaire entre les mâles et les femelles. La sardine se reproduit pendant les remontées d'eaux profondes (appelées *upwelling*) qui agissent sur la température et sur la disponibilité en proies. La reproduction a lieu lorsque la température est comprise entre 10 et 16 °C.

En Manche, la zone de reproduction change de l'ouest vers l'est de mars à août, puis on assiste à un retour des sardines vers l'ouest de septembre à novembre. Ceci se traduit par deux pics d'abondance d'œufs en Manche Est de mai à juin, puis d'octobre à novembre. Les œufs, puis les larves, sont transportés par les courants, mais aussi par les *upwellings*.

Dans l'océan Atlantique Nord, deux sous-populations ont été identifiées avec la sardine ibérique (encore appelée sardine atlantique), de Gibraltar aux côtes nord de l'Espagne, et la sardine atlantique septentrionale, du sud du golfe de Gascogne jusqu'à sa limite nord de distribution.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout elliptique. Lobé sur la marge ventrale. Le rostre est proéminent, tout comme l'antirostre, mais ce dernier est beaucoup plus court. L'*ostium* est plus long que la *cauda*, qui est très peu profonde. Marge ventrale assez droite. De moyenne à petite taille en comparaison aux autres espèces de même taille.

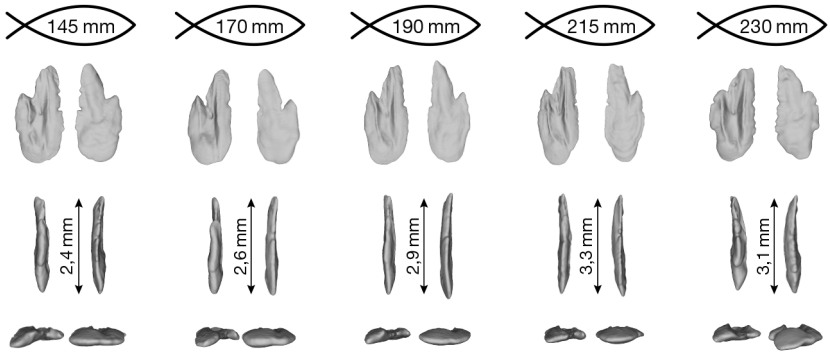


Figure 15. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la sardine commune, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

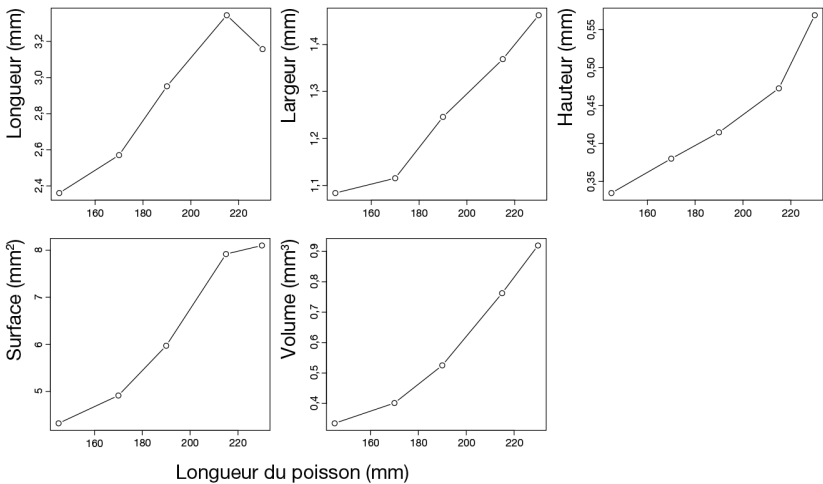


Figure 16. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la sardine commune.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 14 et 23 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 3,1 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement proche de celle du poisson. De plus, la morphologie de l'otolithe ne change pas beaucoup au cours de la vie de la sardine.

Sprat

Nom latin : *Sprattus sprattus*

Nom anglais : *Sprat*

Ordre : Clupéiformes

Famille : Clupeidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le sprat est présent en Atlantique Nord-Est, des îles Lofoten au golfe de Gascogne, Manche, mer du Nord, mer Baltique, nord de la Méditerranée et mer Noire.

■ Environnement

Poisson pélagique côtier (depuis la surface jusqu'à 50 m de profondeur), vivant parfois très près des côtes et pénétrant dans les estuaires (surtout les jeunes individus). Il se tient à proximité du fond pendant le jour et remonte à la surface pendant la nuit.

■ Biologie et cycle de vie

Le sprat forme des concentrations très importantes et effectue de grandes migrations entre les aires de nutrition pendant l'hiver et les lieux de ponte au printemps et en été.

Il atteint sa première maturité sexuelle entre 8 et 10 cm en mer du Nord. La reproduction se déroule à partir de janvier en Manche. Toujours en Manche, les larves se distribuent largement sur toute la zone à l'exception des caps du Pas-de-Calais et des côtes sud de la Normandie.

Les alevins de sprat se nourrissent de diatomées, d'œufs et de larves de copépodes. Les adultes, quant à eux, mangent du zooplancton, principalement des crustacés planctoniques (copépodes).

■ Description de l'otolithe

De forme ovale. Irrégulier sur la marge ventrale. Plus court et arrondi que ceux des autres clupéidés. Le rostre est proéminent. L'antirostre est aussi assez développé, mais arrondi. Le *sulcus* est assez profond avec un *ostium* plus long que la *cauda*. De moyenne à petite taille en comparaison aux autres espèces de même taille.

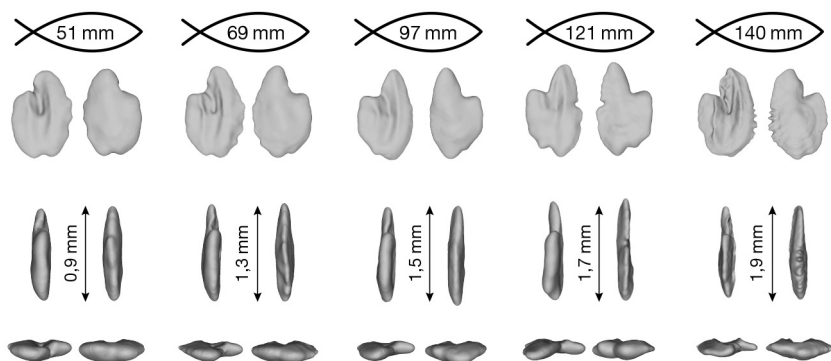


Figure 17. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du sprat, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

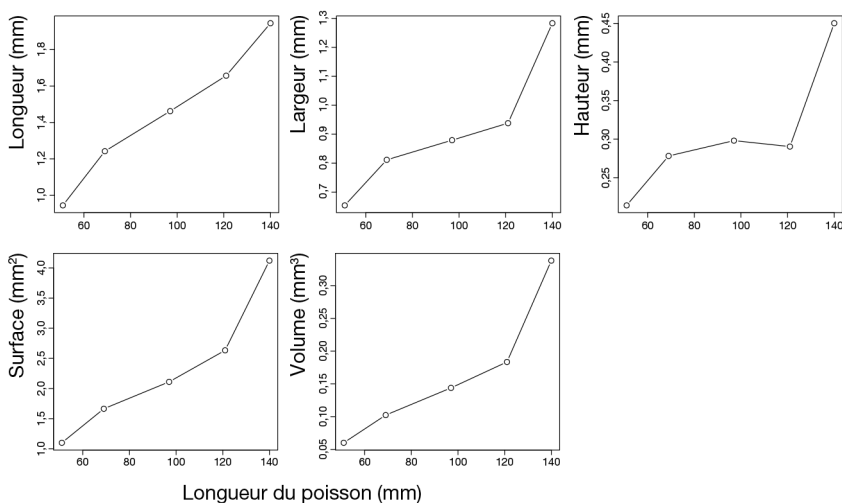


Figure 18. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du sprat.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 5 et 14 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 0,9 et 1,9 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Les bords plus ou moins arrondis peuvent se denteler pour les grands individus. Au fur et à mesure de la vie du sprat, la zone entre le rostre et l'antirostre avec l'*excisura* se creuse.

Chinchard commun

Nom latin : *Trachurus trachurus*

Nom anglais : *Atlantic horse mackerel*

Ordre : Carangiformes

Famille : Carangidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le chinchard commun est présent dans les eaux du plateau continental de l'Atlantique Nord-Est, depuis l'Islande jusqu'aux îles du Cap Vert. En Manche orientale et en mer du Nord, ce poisson est une espèce considérée comme abondante. Il se retrouve également dans les mers Méditerranée, de Marmara et plus rarement en mer Noire.

■ Environnement

Poisson pélagique et grand migrateur. Le chinchard commun vit entre deux eaux ou sur le fond. Il est présent sur le talus continental et généralement à moins de 200 m de profondeur.

■ Biologie et cycle de vie

Le chinchard se reproduit dès l'âge de 3 ans pour le mâle (20-22 cm) et vers 4 ou 5 ans pour la femelle (26-30 cm), le long du plateau continental, au large de la côte ouest de l'Irlande, en mer Celtique, dans le golfe de Gascogne, ainsi qu'au voisinage de la péninsule ibérique. Il se reproduit en Manche Est-sud mer du Nord de fin mai à juillet. Dans le golfe de Gascogne, la période de reproduction est située de mars à juillet au nord du 46^e parallèle, et de janvier à août au sud.

Après avoir frayé, le chinchard migre en direction du nord, le long de la pente du talus continental, pendant les mois de juin et juillet. Il remonte alors par la Manche puis la mer du Nord en longeant les côtes néerlandaises et danoises, où il pond en juillet et août. Jusqu'en septembre, il demeure au large des côtes norvégiennes. D'octobre à fin novembre, il migre vers le sud en passant par la mer du Nord puis la Manche.

À la fin de leur première année de vie, les chinchards, atteignant une taille d'environ 10 cm, se rassemblent dans la partie supérieure de la colonne d'eau et forment des bancs à l'écart des plus gros poissons.

■ Description de l'otolithe

De forme lancéolée, avec un rostre pointu proéminent et un petit antirostre. Marge dorsale lisse et assez linéaire, et marge ventrale irrégulière et convexe. Le *sulcus* est présent de la marge antérieure jusqu'à proximité de la marge postérieure. La *cauda* est deux fois plus longue que l'*ostium*, et courbée vers la marge ventrale peu profonde. De taille assez importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

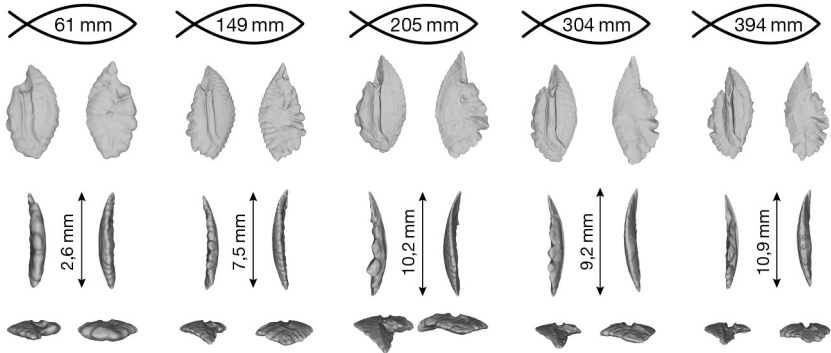


Figure 19. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du chinchard commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

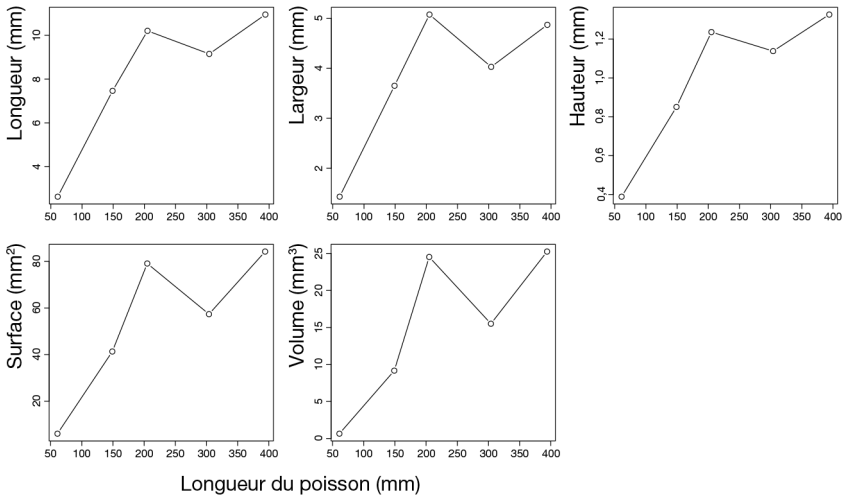


Figure 20. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du chinchard commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 6 et 40 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,6 et 10,9 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus rapide que celle du poisson. L'otolithe de chinchard montre une augmentation rapide de tous ces paramètres morphologiques pour la gamme de tailles de 6 à 20 cm, puis la taille de l'otolithe ne varie plus beaucoup. Si la taille de l'otolithe change, sa morphologie même ne fluctue pas beaucoup en comparant les cinq poissons pourtant de tailles très différentes.

Bar commun

Nom latin : *Dicentrarchus labrax*

Nom anglais : *European seabass*

Ordre : Eupercaria

Famille : Moronidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le bar commun est présent dans l'Atlantique Nord-Est, de 30° Nord (côtes du Maroc) à 60° Nord (sud de la Norvège). On le trouve en mer d'Irlande, mer du Nord et mer Baltique, et il colonise toute la mer Méditerranée ainsi que la mer Noire.

■ Environnement

Poisson benthodémersal côtier, fréquent notamment le long des côtes rocheuses. C'est un poisson euryhalin, parce qu'il est capable de supporter de grandes variations de salinité : de 0,5 ppm à plus de 40 ppm.

■ Biologie et cycle de vie

Le bar atteint sa taille de première maturité sexuelle entre 35 et 40 cm. Il se reproduit en Manche Ouest en début de saison de reproduction (mi-février), il se décalerait progressivement vers l'est jusqu'à la fin juin. Les œufs pélagiques de bar mettent 2 à 5 jours pour éclore en Manche. Arrivées en zone côtière, les larves y passeraient environ 30 jours, temps nécessaire pour atteindre le stade de développement correspondant à une taille de 10 mm. Cette dimension leur permettrait de pénétrer alors dans les zones estuariennes, puis de s'y développer.

En effet, tout au moins en Manche et autour des îles britanniques, les juvéniles restent dans leur estuaire pendant au moins les trois premières années de leur vie. Ainsi, les bars commenceraient à migrer à partir de 4 ans. Les larves et les juvéniles sont inféodés à des fonds peu importants, généralement inférieurs à 5 m, les adultes sont présents dans des eaux plus profondes, mais relativement côtières. Ainsi, des alevins et des juvéniles ont pu être observés dans des baies et des estuaires, d'une part en Manche, et d'autre part dans le golfe de Gascogne.

Les bars adultes quittent leurs aires de répartition estivales dès septembre-octobre, et se rendent sur les aires d'hivernage situées plus au sud (principalement en Manche Ouest) et dont les eaux restent plus chaudes. Dès février, ils entament leur remontée vers le nord ou le nord-est, en direction des zones d'alimentation estivales qu'ils atteignent vers mai-juin. Les déplacements importants que l'on peut qualifier de migrations annuelles ont donc lieu en période hivernale. À l'opposé, les déplacements estivaux semblent beaucoup plus réduits et limités à la bande côtière. Ce schéma annuel migratoire est admis pour le bar commun autour des îles britanniques.

Le bar est un prédateur carnassier vorace qui peut ingérer des proies de grande taille. Il chasse aussi bien de jour que de nuit, sur le fond ou entre deux eaux. À noter qu'il est également susceptible d'adopter un comportement herbivore.

■ Description de l'otolithe

De forme ovale à oblongue. Légèrement lobé sur la marge dorsale, qui est assez linéaire. La marge ventrale possède la forme d'un V peu profond. Le rostre est proéminent et long, avec un antirostre court, mais aussi assez développé. Côté proximal très convexe et côté distal très concave. *Cauda* assez profonde, courbée. De taille assez grande en comparaison aux autres espèces de même taille.

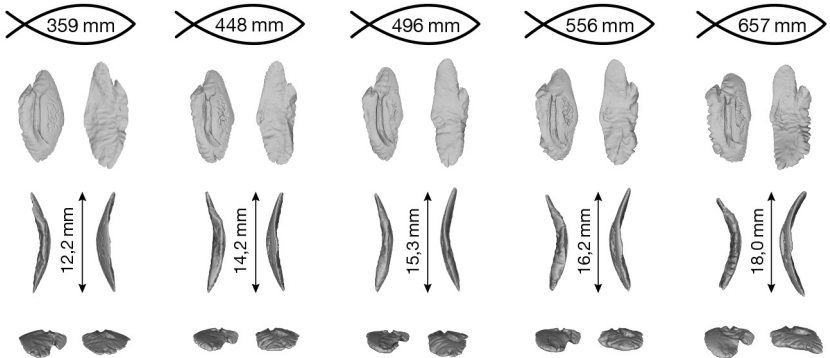


Figure 21. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du bar commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

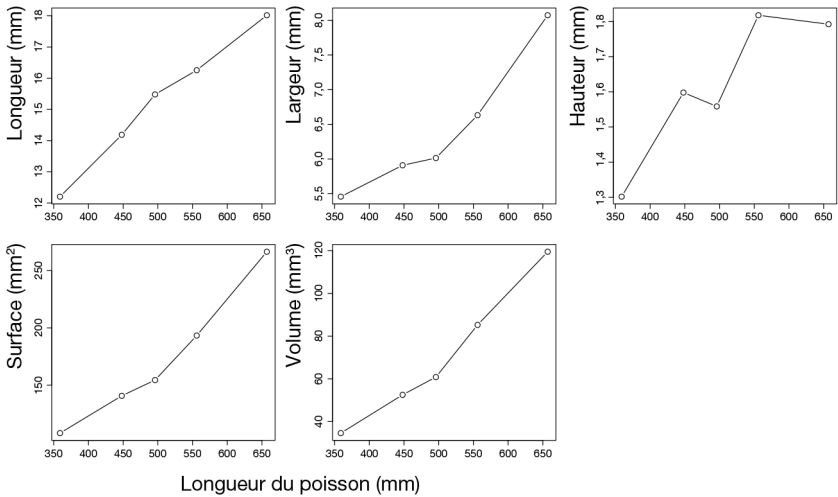


Figure 22. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du bar commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 35 et 66 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 12,2 et 18 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Pour les bars de plus de 50 cm, les otolithes présentent des hauteurs plus importantes dues essentiellement à la face proximale, qui devient de plus en plus convexe.

Saint-pierre

Nom latin : *Zeus faber*

Nom anglais : *John Dory*

Ordre : Zéiformes

Famille : Zeidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le saint-pierre apparaît comme une espèce à vaste distribution. Il est présent en Atlantique Est, de l'Afrique du Sud aux îles Féroé et à la Norvège, en Méditerranée, en mer Noire, dans l'océan Indien, en Nouvelle-Zélande, au Japon et en Corée.

■ Environnement

Poisson démersal, fréquentant surtout les fonds meubles et vaseux. Il vit sur le plateau et le talus continental de la côte jusqu'à 600 m de fond. Au-delà de 100 m de profondeur, ce ne sont que des individus de grande taille (>30 cm) qui sont présents pendant l'hiver. Les concentrations maximales de ce poisson ont été observées à des profondeurs comprises entre 50 et 120 m.

■ Biologie et cycle de vie

Le saint-pierre commence à se reproduire dès qu'il atteint une taille comprise entre 30 et 35 cm. La reproduction a lieu entre juin et août dans le golfe de Gascogne, en mer Celtique, en mer d'Irlande et en Méditerranée, alors qu'elle ne se produit qu'en fin d'hiver en Mauritanie. Les œufs sont pélagiques. Les zones de nurseries ne sont pas connues en Manche et mer du Nord. Cependant, des juvéniles ont été observés en Manche, sur les côtes ouest de l'Écosse et en mer du Nord. Ces observations montrent que les juvéniles sont essentiellement répartis près de la côte.

Le saint-pierre se nourrit généralement de petits poissons, mais aussi de céphalopodes et de crustacés.

■ Description de l'otolithe

De forme trilobée, avec des constrictions antérieure et postérieure faisant apparaître trois lobes dans trois directions différentes et une petite crête colliculaire au niveau du *sulcus* entre la *cauda* et l'*ostium*. Cette forme ne peut pas être confondue avec celle d'un otolithe d'une autre espèce. Marges lisses.

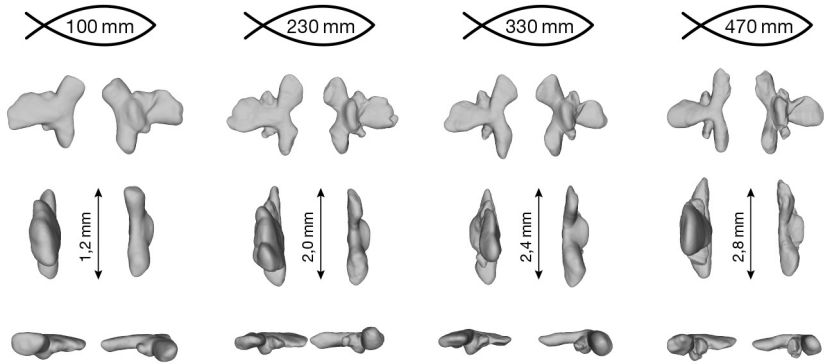


Figure 23. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du saint-pierre, représentée par quatre individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

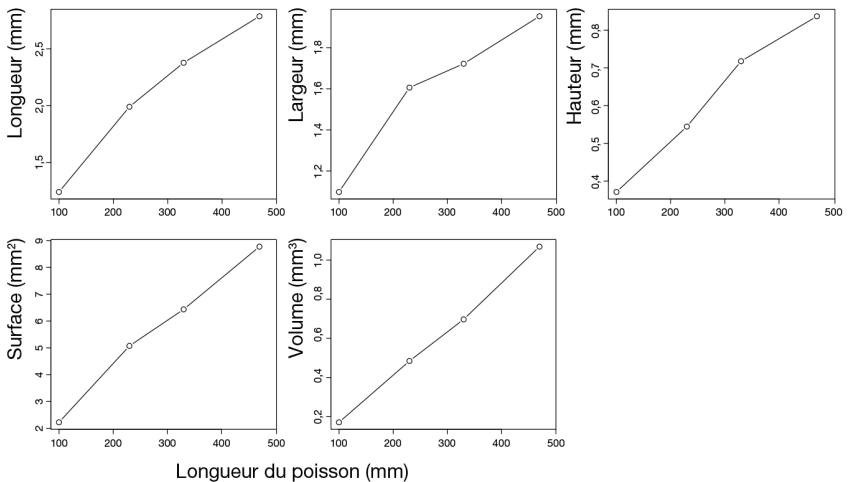


Figure 24. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du saint-pierre.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 47 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 1,2 et 2,8 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus lente que celle du poisson. Chez le saint-pierre, l'otolithe n'évolue pas dans sa forme caractéristique au long de sa vie, seule sa taille augmente. Ainsi, l'otolithe est trilobé dans trois directions de croissance différentes, avec des croissances en longueur, largeur et hauteur relativement proportionnelles au cours de la vie du poisson.

Maquereau commun

Nom latin : *Scomber scombrus*

Nom anglais : *Atlantic mackerel*

Ordre : Scombriformes

Famille : Scombridae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le maquereau est présent dans les eaux du plateau continental de l'Atlantique Nord-Est, généralement depuis l'Islande et les côtes norvégiennes au nord, jusqu'aux côtes de l'Afrique au sud. Il vit également en mers Méditerranée et Noire. Enfin, en Atlantique Nord, on le trouve au large des côtes du continent nord-américain.

■ Environnement

Poisson pélagique qui vit sur des fonds de 0 à 250 m, mais il est présent dans la colonne d'eau surtout entre la surface et 40 m de profondeur.

■ Biologie et cycle de vie

Le maquereau atteint en moyenne sa première maturité sexuelle dans le golfe de Gascogne dès 2 ans, ce qui est généralisable à l'Atlantique Nord-Est. Il se reproduit du sud, sur les côtes situées au nord-ouest de l'Espagne, jusqu'au nord, le long des côtes norvégiennes. La période de reproduction se déroule de mars à juillet. La ponte est plus précoce dans le sud que dans le nord, car elle dépend de la température de surface qui doit être comprise entre 13 et 15,5°C. Les juvéniles grandissent à la côte, dont ils ne s'éloignent qu'à l'automne, pour entamer la migration vers les zones d'hivernage, sauf dans les eaux côtières de Cornouaille où ils restent pendant leurs premiers hivers.

Le maquereau est un grand migrateur qui se nourrit essentiellement de zooplancton. C'est un excellent nageur, car sa vitesse de nage peut atteindre 6 m.s⁻¹. Il est de nature grégaire et la taille des bancs de maquereaux peut varier de 1 à 7 tonnes. Les migrations du maquereau sont directement liées à celles des copépodes, ce qui explique en partie ses migrations verticales durant la journée. Il existe deux populations principales dans l'Atlantique Nord-Est : celle de la mer du Nord qui hivernerait sur la fosse norvégienne (à la fin de l'hiver, les maquereaux migrent essentiellement vers le centre de la mer du Nord et le Skagerrak pour se reproduire) et celle de la mer Celtique qui hivernerait d'une part au sud-est de la Cornouaille anglaise et à l'ouest de la Manche occidentale et d'autre part au nord de l'Écosse. En février-mars, tous ces maquereaux se rejoignent pour se reproduire le long de l'isobathe des 200 m entre le sud de l'Irlande et l'ouest de la Bretagne.

■ Description de l'otolithe

De forme lancéolée, avec un rostre très préminent et un antirostre émoussé. Marge ventrale assez linéaire, et marge ventrale irrégulière et convexe. Le *sulcus* est présent sur toute la longueur. La *cauda* est profonde, large, courbée vers la marge ventrale et ouverte. L'*ostium* est très large et ouvert. De taille moyenne en comparaison aux autres espèces de même taille.

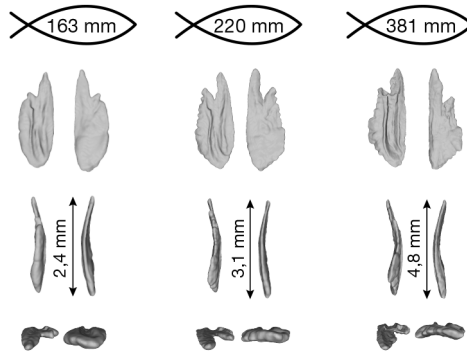


Figure 25. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du maquereau commun, représentée par trois individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

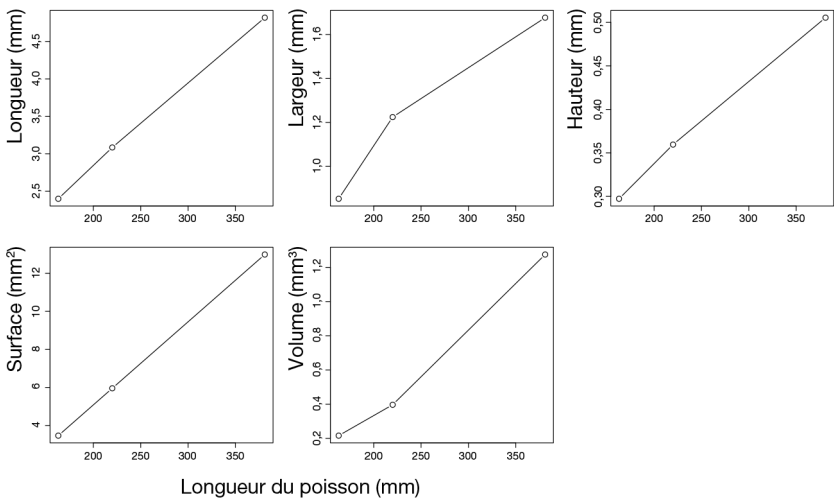


Figure 26. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du maquereau commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 16 et 39 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 4,8 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement comparable à celle du poisson. L'otolithe évolue au cours de la vie du maquereau pour trois aspects : les bords plus ou moins arrondis peuvent se denteler pour les grands individus ; la zone entre le rostre et l'antirostre avec l'*excisura* est de plus en plus marquée ; le *sulcus* se creuse et s'élargit.

Morue commune

Nom latin : *Gadus morhua*

Nom anglais : *Atlantic cod*

Ordre : Gadiformes

Famille : Gadidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

La morue commune (ou cabillaud) est présente dans l'Atlantique Nord. À l'Ouest, elle se répartit de l'Islande jusqu'aux côtes est et ouest du Groenland et sur les côtes du Canada et jusqu'en Caroline avec le Cap Hattetas. À l'Est, son aire de répartition couvre depuis la Bretagne et la mer Celtique jusque dans la mer de Barents et en mer Baltique.

■ Environnement

Poisson benthodémersal qui ne vit en bancs que le jour, mais pouvant aussi se trouver en pleine eau, vivant entre 0 et 600 m avec de fortes concentrations entre 150 et 200 m. Espèce boréale se répartissant dans les eaux marines à saumâtres ayant des températures comprises entre 0 et 20 °C. En mer du Nord, elle est capturée dans des eaux allant de 20 m dans la partie septentrionale à 200 m dans le nord-ouest. Ces eaux présentent des températures proches de 6 °C et une salinité comprise entre 29 et 35 ‰. En Manche orientale, elle est pêchée d'une part dans le nord dans le détroit du Pas-de-Calais, et d'autre part en baie de Seine. Ces eaux présentent une température de l'ordre de 17 °C et une salinité de 33 à 35 ‰. Les juvéniles ont été observés essentiellement près de la côte sur des fonds constitués de sédiments fins.

■ Biologie et cycle de vie

La morue atteint sa première maturité sexuelle en Manche à 59 cm pour les femelles, et à 53 cm pour les mâles (Dorel, 1986). Si 23 % des individus âgés de 3 ans sont sexuellement matures, ce pourcentage atteint 62 % pour les poissons âgés de 4 ans (CIEM, 2006). En Manche Est et au sud de la mer du Nord, la période de ponte s'étale de janvier à avril avec un maximum à la fin du mois de février (Van der Land *et al.*, 1990). Les œufs pélagiques éclosent après une douzaine de jours pour donner des larves qui resteront pélagiques durant 2 à 5 mois, avant de migrer vers le fond. La croissance des alevins est rapide. Les frayères sont connues en Manche Est, principalement dans les eaux côtières du sud de l'Angleterre ainsi qu'au large de Dieppe et en baie de Seine (Bennet *et al.*, 1993 ; CIEM, 2002).

Adulte, c'est un prédateur actif se nourrissant d'invertébrés (crustacés décapodes, céphalopodes, vers) et de petits poissons à l'aube ou au crépuscule. Le jour, la morue forme des bancs, qui se désagrègent la nuit. La plupart des populations ont des aires de ponte et de nutrition distinctes, impliquant des migrations saisonnières.

■ Description de l'otolithe

De forme elliptique, avec un rostre oblongue et une partie postérieure pointue. Absence de l'antirostre. Lobé sur la totalité du contour, l'otolithe est concave sur la face proximale et convexe sur la surface distale. Le *sulcus*, de forme linéaire, est présent sur plus que 90 % de la surface proximale. De taille importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

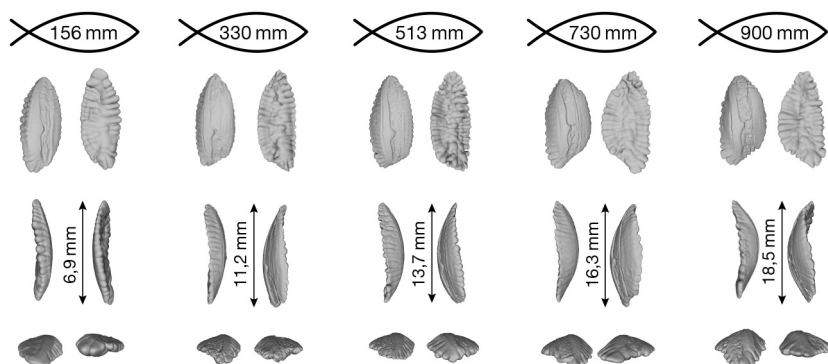


Figure 27. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la morue commune, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

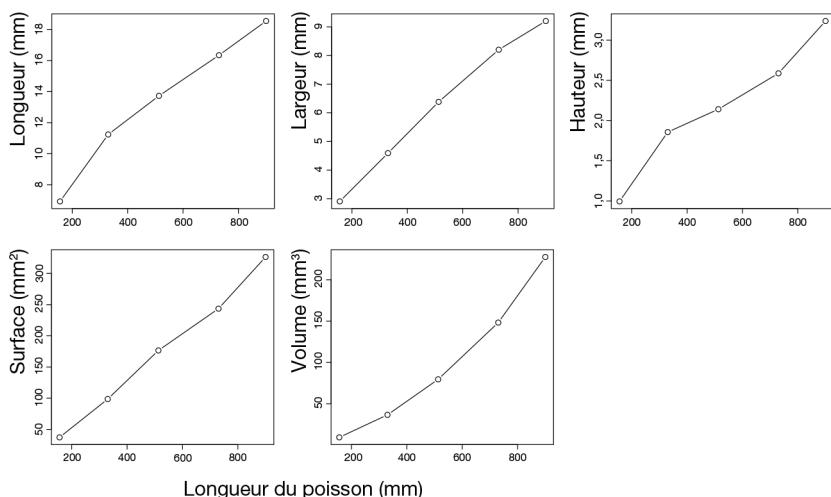


Figure 28. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la morue commune.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 15 et 90 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 6,9 et 18,5 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance moins rapide que celle du poisson. La morphologie de l'otolithe ne change pas beaucoup au cours de la vie de la morue, seuls les lobes de la face externe distale semblent plus marqués pour les poissons plus grands.

Tacaud commun

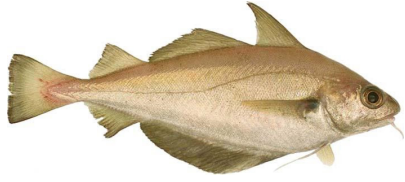
Nom latin : *Trisopterus luscus*

Nom anglais : *Pouting*

Ordre : Gadiformes

Famille : Gadidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le tacaud commun est une espèce présente en Atlantique Nord-Est, du sud de la Norvège jusqu'au Maroc, et au nord-ouest de la Méditerranée, de l'Espagne jusqu'à la Grèce en comprenant la mer Adriatique. Le tacaud commun est particulièrement abondant en Manche et dans le sud de la mer du Nord ainsi que dans le golfe de Gascogne.

■ Environnement

Poisson démersal, il affectionne des eaux peu profondes, depuis la surface près des côtes jusqu'à des profondeurs de 100 à 150 m, rarement au-delà. Dans le golfe de Gascogne, il est présent sur les fonds sableux de la plate-forme continentale, mais ses fortes concentrations coïncident avec la présence de roches ou d'épaves autour desquelles cette espèce se regroupe.

■ Biologie et cycle de vie

Le tacaud commun se reproduit à partir de 1 an (20 à 25 cm), dans la partie centrale de la Manche sur des fonds supérieurs à 50 m. La période de reproduction s'étale de janvier à avril au nord du golfe de Gascogne, de février à juin en Manche-Est et de mars à juillet en mer du Nord. Les œufs pélagiques ont une période d'incubation de 10 à 12 jours avant de devenir des larves. Ces dernières migrent vers le fond. Les juvéniles ainsi formés vivent près des côtes. En Manche-Est, la baie de Seine est identifiée comme une nourricerie pour cette espèce. Le tacaud commun peut pénétrer à l'intérieur des estuaires et des lagunes semi-fermées en fonction de la température et la salinité. À l'âge adulte, il vit en bancs et les seuls déplacements connus sont ceux effectués vers le large pour se reproduire puis revenir à la côte pendant la phase de repos sexuel.

Au cours de sa première année de vie, le tacaud se nourrit essentiellement de crustacés comme les crevettes et les crabes verts. Les tacauds adultes se nourrissent toujours de crustacés, mais aussi de poissons, de mollusques céphalopodes et d'annélides polychètes.

■ Description de l'otolithe

Forme en fuseau, avec un rostre très court et émoussé, une marge antérieure oblique, et une marge postérieure très pointue. Absence de l'antirostre. Lobé sur marge ventrale et surface distale. Le *sulcus* est présent de la marge antérieure à la marge postérieure. Sa forme est assez linéaire, et fermée aux deux extrémités. De taille importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

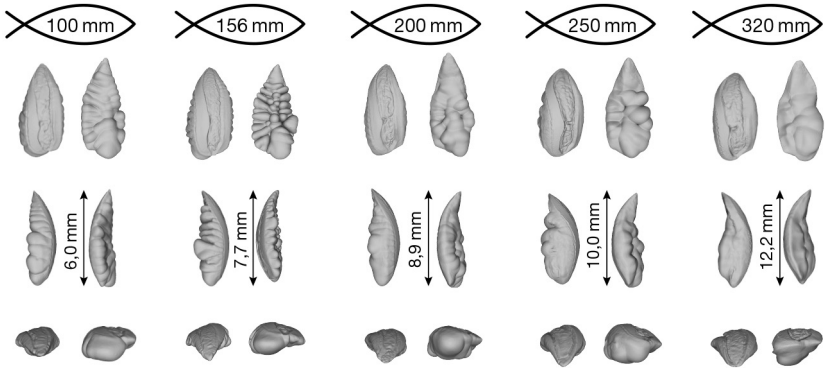


Figure 29. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du tacaud commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

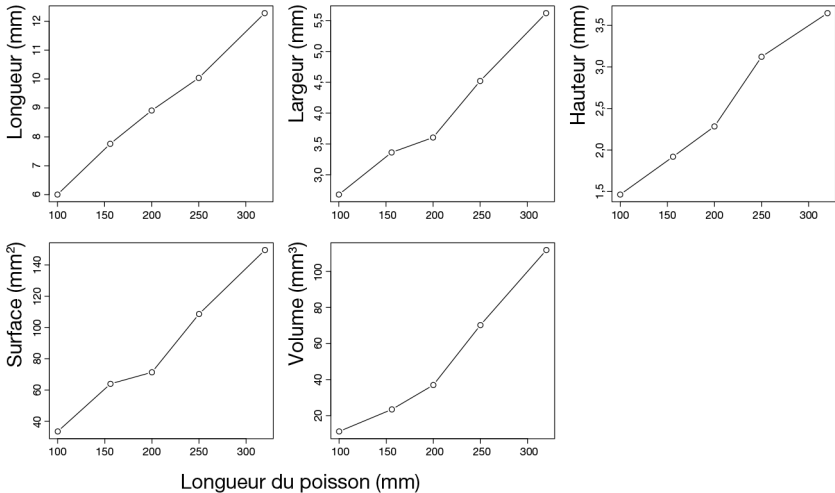


Figure 30. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du tacaud commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 32 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 6 et 12,2 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Au cours de la vie du tacaud, la forme de l'otolithe n'évolue pas beaucoup avec un rostre relativement pointu, une hauteur particulièrement importante pour un otolithe de cette taille et une surface externe distale présentant des lobes plus ou moins nombreux et plus ou moins proéminents.

Merlan

Nom latin : *Merlangius merlangus*

Nom anglais : *Whiting*

Ordre : Gadiformes

Famille : Gadidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le merlan est rencontré dans les eaux de l'Atlantique Nord-Est, depuis le nord de la Norvège et de l'Islande jusqu'à l'Irlande, où il est plus rare. Il est abondant en mer du Nord, en mer d'Irlande et en Manche. En Manche orientale-mer du Nord, les merlans se déplacent vers la Manche Est et le sud de la mer du Nord, de janvier à mars, pour revenir dans la partie méridionale du centre de la mer du Nord entre juin et octobre.

■ Environnement

Poisson benthodémersal, c'est-à-dire qu'il vit près du fond. Il se répartit sur des fonds graveleux ou vaseux entre 10 et 200 m, avec un maximum entre 30 et 100 m.

■ Biologie et cycle de vie

Le merlan commence à se reproduire vers ses 2 ans, ce qui correspond à une taille de 20 à 30 cm. En Manche orientale, la période de reproduction commence en décembre-janvier pour s'intensifier en février et se terminer vers le mois de juin. Les zones de reproduction sont identifiées au centre de la Manche et sur des fonds de 40 à 80 m dans le golfe de Gascogne. Les œufs puis les larves, après une dizaine de jours d'incubation, constituent la phase de vie pélagique du merlan. Les larves migrent vers la côte. Les nourriceries en Manche sont bien identifiées, tant sur les côtes qu'à l'intérieur des estuaires, comme le canal de Bristol et les estuaires français.

Le régime alimentaire du merlan est essentiellement composé de poissons et de crustacés. Chez les juvéniles, les crustacés sont les proies préférentielles. À l'âge adulte, les poissons représentent l'essentielle de l'alimentation du merlan. Aucune étude sur le régime alimentaire du merlan n'a pu mettre en évidence un phénomène de cannibalisme.

■ Description de l'otolithe

De forme allongée et étroite rappelant un fuseau, avec un rostre arrondi et oblongue et une partie postérieure très pointue. Absence de l'antirostre. Lobé sur la totalité du contour, sauf la partie caudale postérieure qui est plus lisse, quelle que soit la taille. De taille importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

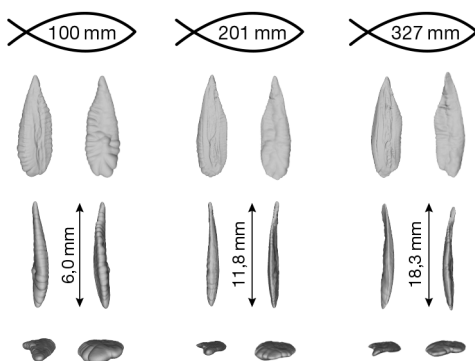


Figure 31. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du merlan, représentée par trois individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

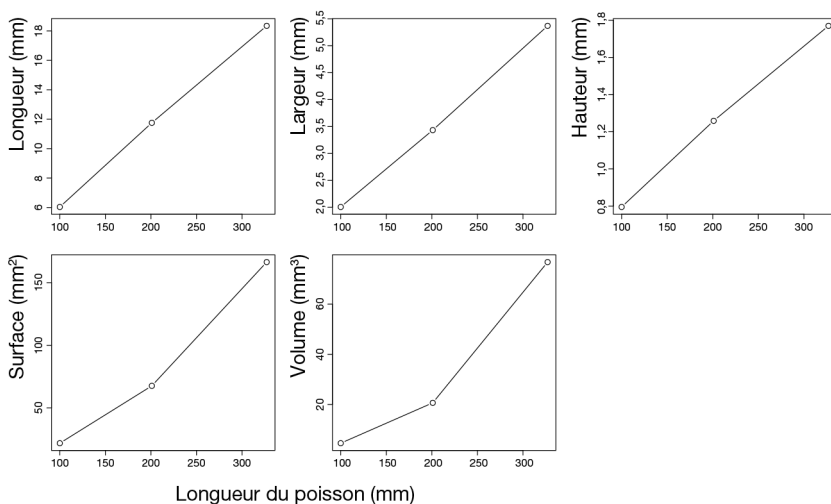


Figure 32. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du merlan.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 33 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 6,0 et 18,3 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance similaire à celle du poisson. La morphologie de l'otolithe change un peu avec des lobes de la face externe distale qui s'atténuent au cours de la vie du merlan.

Églefin

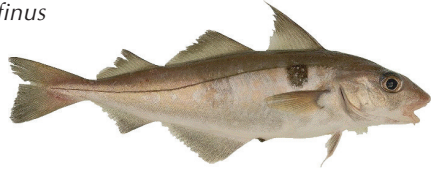
Nom latin : *Melanogrammus aeglefinus*

Nom anglais : *Haddock*

Ordre : Gadiformes

Famille : Gadidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

L'églefin est présent dans l'Atlantique du Nord-Est, du Portugal au Spitzberg (océan Arctique), ainsi qu'en mer de Barents et autour de l'Islande. En mer du Nord, on le trouve surtout au nord du Dogger Bank.

■ Environnement

Poisson benthodémersal vivant généralement à des profondeurs comprises entre 10 et 400 m, et parfois dans la colonne d'eau. Les adultes se trouvent plus fréquemment entre 80 et 200 m, sur des rochers, du sable, du gravier ou des coquillages et dans des eaux de températures comprises entre 4 et 10°C.

■ Biologie et cycle de vie

L'églefin se reproduit dès qu'il atteint sa maturité sexuelle, entre 30 et 35 cm. Sa reproduction est discontinuée entre janvier et juillet. Il pond des œufs, à 100-150 m de fond, de février à juillet dans le nord de la mer du Nord, avec un pic de ponte observé fin mars ou début avril.

Il vit en bancs et migre pour se nourrir et se reproduire. L'églefin peut effectuer de grandes migrations. Il se nourrit principalement de petits organismes vivant sur le fond, notamment de crustacés, de mollusques, d'échinodermes, de vers et de poissons (lançons, capelans, harengs, etc.).

■ Description de l'otolithe

De forme ovale, avec un rostre oblique et une partie postérieure pointue. Absence de l'antirostre. Légèrement lobé sur la totalité du contour, il est fortement convexe sur la face proximale. La marge dorsale est linéaire. Le *sulcus* est présent sur plus que 90% de la surface proximale. De taille importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

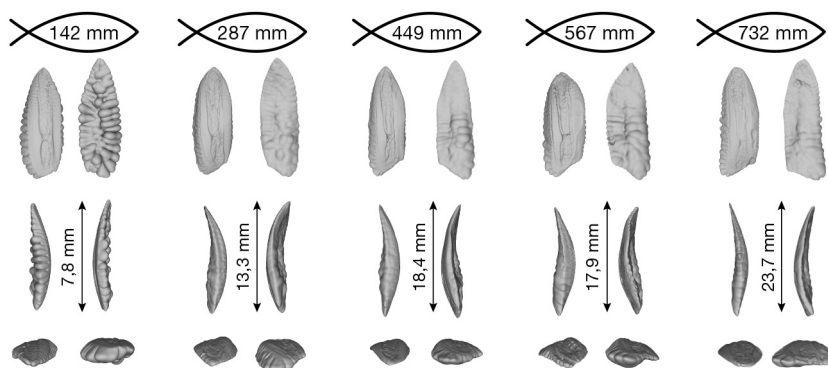


Figure 33. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de l'églefin, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

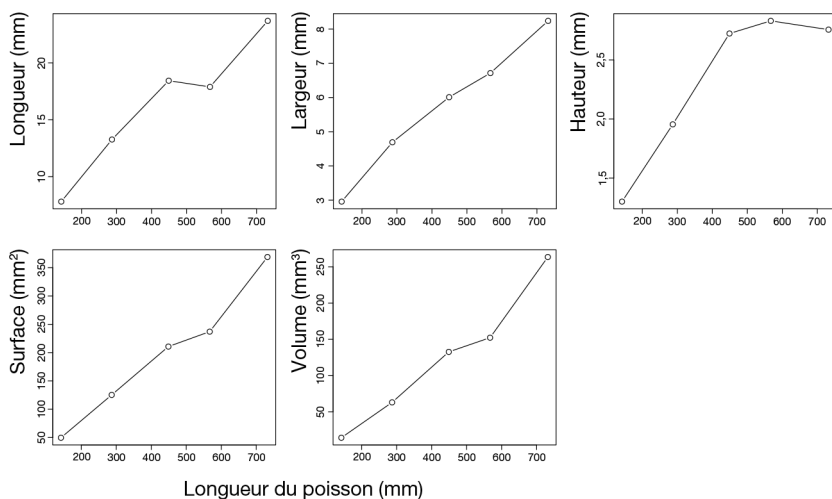


Figure 34. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de l'églefin.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 14 et 74 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 7,8 et 23,7 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Cependant, la morphologie de l'otolithe change avec des lobes de la face externe distale qui s'atténuent au cours de la vie de l'églefin et surtout une épaisseur de l'otolithe qui augmente fortement pour les poissons de plus de 40 cm.

Grondin rouge

Nom latin : *Chelidonichthys cuculus*

Nom anglais : *Red gurnard*

Ordre : Perciformes

Famille : Triglidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le grondin rouge est présent en Atlantique Nord-Est, du sud de la Norvège et du nord des îles britanniques jusqu'en Mauritanie. Il se rencontre également en Méditerranée et sur les côtes de l'Afrique de l'Ouest jusqu'à la latitude des îles Canaries.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur des fonds compris entre 0 et 200 m de profondeur. Il est présent essentiellement sur des fonds composés de sables grossiers et de graviers du plateau continental situés de 30 à 60 m de fond en Manche orientale et vers 130 m de fond dans le golfe de Gascogne.

■ Biologie et cycle de vie

Le grondin rouge commence à se reproduire entre 25 et 28 cm, ce qui correspond à des individus âgés de 1 ou 2 ans. La ponte débute en février et il semblerait que les poissons se déplacent vers l'ouest après la ponte. Celle-ci s'achève entre juin et août, période pendant laquelle la majorité des poissons sont capturés aux abords de la Manche-Ouest. Les variations de sex-ratio dans les apports commerciaux permettent de penser que les femelles retournent vers le centre de la Manche avant les mâles, qui n'y parviennent qu'en décembre et sembleraient en reparti plus rapidement après la ponte.

Le grondin rouge pénètre dans l'ouest et le centre de la Manche en septembre, et demeure de novembre à janvier dans une zone située entre Ouessant et l'île de Wight, tout particulièrement autour de la Fosse Centrale.

Le grondin rouge est un chasseur actif qui utilise les trois rayons libres de ses nageoires pectorales pour « marcher » sur le fond et rechercher ses proies. En appui sur ces rayons, les pelviennes dégagées permettent la fuite ou la chasse. C'est un prédateur carnassier qui se nourrit de crustacés (bernard-l'ermite, crevettes, crabes) et de divers petits poissons typiquement benthiques comme les gobies et callionymes. Les juvéniles se nourrissent quasi exclusivement de crustacés, tandis que les adultes adoptent un régime mixte poissons-crustacés.

■ Description de l'otolithe

De forme ovale, avec le rostre et l'antirostre proéminents. Les deux sont sur le bord postérieur. Marges lobées avec un angle prononcé entre la marge postérieure et la marge dorsale. Marge ventrale très courbée avec un angle au centre. La *cauda* ovale et l'*ostium* en forme d'entonnoir sont de même longueur. De taille moyenne à grande en comparaison aux autres espèces de même taille.

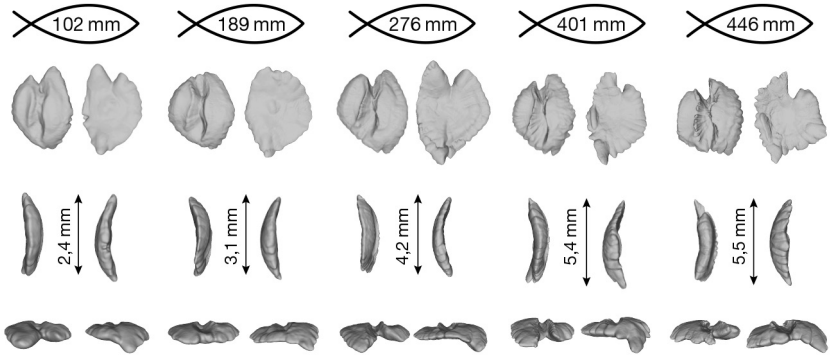


Figure 35. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du grondin rouge, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

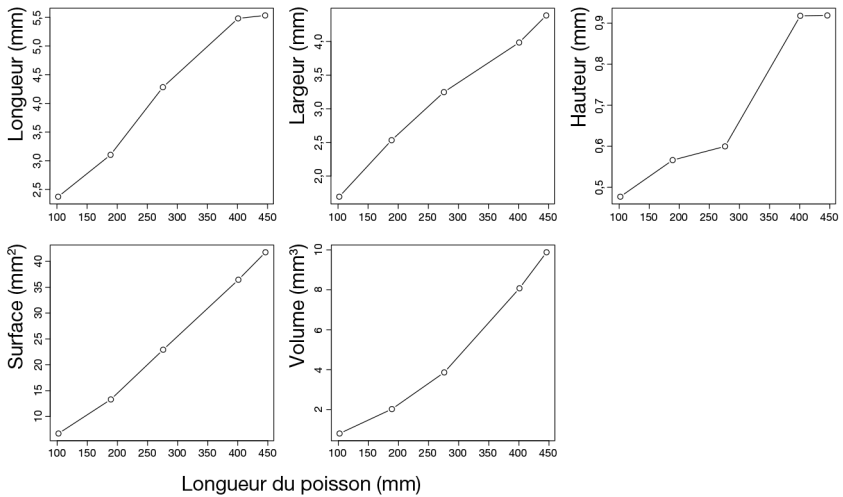


Figure 36. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du grondin rouge.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 45 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 5,5 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Au cours de la vie du grondin rouge, la forme de l'otolithe évolue avec un bord arrondi qui a tendance à se denteler, et le *sulcus* se creuse. Le poisson de 18,9 cm montre, contrairement aux autres individus, une zone peu creusée entre le rostre et l'antirostre. C'est le cas de certains individus, et cette zone ne doit donc pas être utilisée pour discriminer cette espèce.

Grondin perlon

Nom latin : *Chelidonichthys lucerna*

Nom anglais : *Tub gurnard*

Ordre : Perciformes

Famille : Triglidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le grondin perlon est présent en Atlantique Nord-Est, du nord de la Norvège jusqu'au Sénégal. Il se rencontre également en Méditerranée et en mer Noire.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur des fonds compris entre 0 et 300m de profondeur et à des températures comprises entre 8 et 24°C. Il est présent essentiellement sur des fonds composés de sables, de sables vaseux et de graviers du plateau continental.

■ Biologie et cycle de vie

Le grondin perlon, dès ses 18 cm de long, se reproduit de décembre à février en Méditerranée, et de mai à juin en mer Celtique. L'été, les jeunes retrouvent les adultes à la côte. De jeunes individus ont déjà été identifiés dans des estuaires comme la Gironde. Quand vient l'hiver, le grondin perlon migre vers des eaux plus profondes.

C'est un prédateur carnassier. Les jeunes individus de taille inférieure à 15 cm ont une alimentation composée essentiellement de crustacés copépodes, puis leur nourriture évolue vers des mysidacés, des crevettes et des amphipodes. À partir de 20 cm, les proies sont des poissons et quelques mollusques céphalopodes.

■ Description de l'otolithe

De forme elliptique, avec le rostre et l'antirostre proéminents. Rostre large et pointu. Antirostre également pointu mais plus fin. Marges serrées avec un angle prononcé au centre de la marge dorsale. La *cauda* est plus courte que l'*ostium*, large, ovale et fermée; l'*ostium* est ouvert. L'*ostium* et la *cauda* sont profonds. De taille moyenne en comparaison aux autres espèces de même taille.

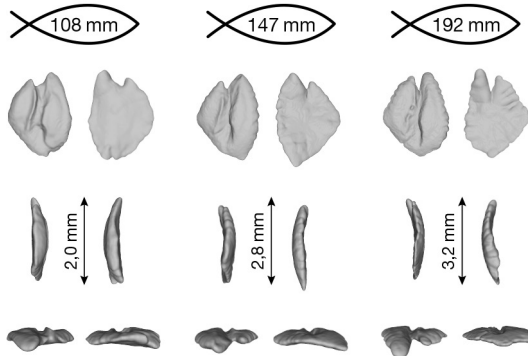


Figure 37. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du grondin perlon, représentée par trois individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

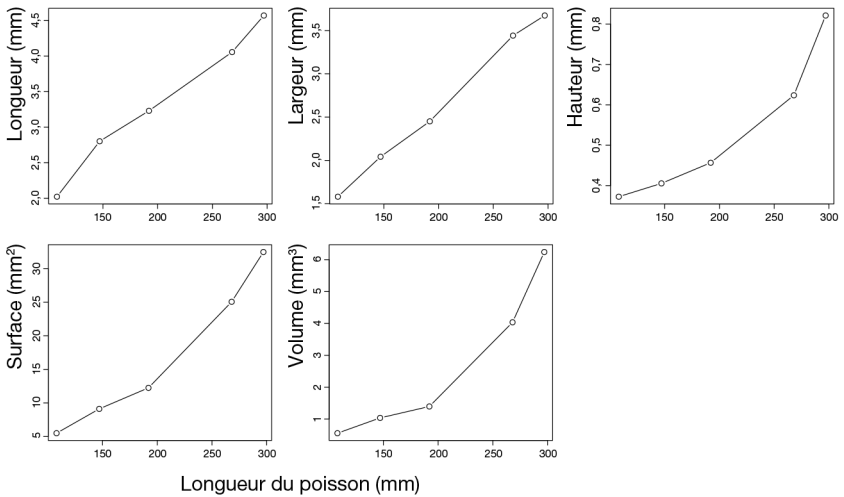


Figure 38. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du grondin perlon.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 20 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2 et 3,2 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement comparable à celle du poisson. Au cours de la vie du grondin perlon, la forme de l'otolithe reste très comparable d'un individu à l'autre, les relations entre les différents critères morphologiques et la taille du poisson le montrent bien.

Rouget barbet de roche

Nom latin : *Mullus surmuletus*

Nom anglais : *Striped red mullet*

Ordre : Mulliformes

Famille : Mullidae

Morphotype : poisson rond



■ Aire de répartition

Le rouget barbet de roche est rencontré le long des côtes européennes depuis le sud de la Norvège et le nord de l'Écosse, incluant les îles Féroé, jusqu'au détroit de Gibraltar, mais également dans la partie nord de l'Afrique de l'Ouest, dans le bassin méditerranéen et en mer Noire.

■ Environnement

Poisson benthique et de nature grégaire. Cette espèce fréquente les fonds sableux, graveleux et rocheux. Dans le golfe de Gascogne, ce poisson serait également présent sur des fonds coquilliers, dans les herbiers de zostères et les chenaux rocheux. Son maximum d'abondance se situe dans des eaux ayant une profondeur n'excédant pas 100 m.

■ Biologie et cycle de vie

Le rouget barbet de roche atteint sa taille de première maturité sexuelle à 17 cm en Manche et dans le golfe de Gascogne. La période de ponte est comprise entre avril et juin dans le golfe de Gascogne et de mai à juillet en Manche orientale. Les juvéniles commencent leur vie benthique près de la côte depuis des profondeurs de 15 à 20 m, jusqu'à l'extrême bord, car par mer calme, ils ont déjà été observés par moins de 50 cm d'eau. Au premier hiver, les juvéniles migrent de leurs nourriceries vers des eaux plus profondes, où ils passeront leur vie d'adulte.

Le rouget barbet de roche est un poisson carnivore. L'anatomie du rouget barbet de roche, avec ses deux barbillons mentonniers, lui confère un comportement de prédation mixte : chasseur à vue (crustacés et poissons), brouteur et fousseur (bivalves et vers). De plus, la présence de sédiments dans les estomacs et la nature des proies ingérées montreraient l'étroite liaison entre l'animal et le fond.

Dans l'océan Atlantique Nord-Est, il y aurait deux populations, l'une au sud de la Manche Ouest avec la mer Celtique et le golfe de Gascogne, et l'autre à l'est de la Manche Ouest, de la Manche Est au nord de la mer du Nord.

■ Description de l'otolithe

De forme ovale, avec un rostre assez préminent et un petit antirostre. Marge très irrégulière. La *cauda* est plus longue que l'*ostium* en forme d'entonnoir, très courbée vers la marge ventrale, et fermée. De taille assez grande en comparaison aux autres espèces de même taille.

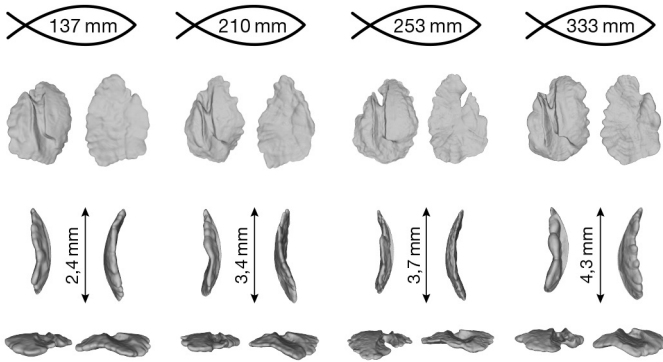


Figure 39. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du rouget barbet de roche, représentée par quatre individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

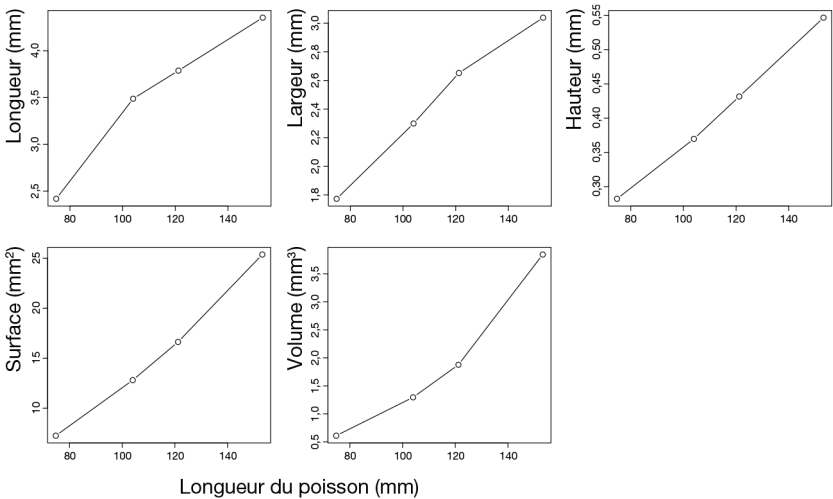


Figure 40. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du rouget barbet de roche.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 13 et 34 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 4,3 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement comparable à celle du poisson. L'évolution de l'otolithe au cours de la vie du rouget barbet de roche montre que c'est essentiellement la partie antérieure qui change avec une évolution du *sulcus* qui se creuse et s'élargit avec la taille du poisson. Certains otolithes (mais pas tous) peuvent présenter un *sulcus* tellement creusé sur la partie antérieure que l'*ostium* forme un trou dans l'otolithe en vues interne et externe.

Sole commune

Nom latin : *Solea solea*

Nom anglais : *Common sole*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Soleidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

La sole vit dans les eaux continentales de l'Atlantique Nord, des Shetlands et du sud de la Norvège au nord, et jusqu'à la Mauritanie au sud. Elle est absente de la Baltique ainsi que de certaines régions de Méditerranée et de mer Noire.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur les fonds de sables fins ou vaseux entre 0 et 150 m de profondeur. La sole est très eurytherme et euryhaline. Ainsi, elle supporte de fortes variations de température et de salinité, ce qui permet aux juvéniles de vivre à l'intérieur des estuaires ou des baies.

■ Biologie et cycle de vie

La sole acquiert sa maturité sexuelle entre 25 et 30 cm, c'est-à-dire pour des poissons âgés de 3 ans. La ponte de la sole débute lorsque la température de l'eau s'élève au-dessus de 7°C. En conséquence, la reproduction a lieu en Manche et en mer du Nord, de fin février à fin juin, avec une période d'intensité maximale située en avril-mai. En Manche orientale, les plus fortes concentrations d'œufs de sole ont été observées dans le détroit du Pas-de-Calais, en baie de Seine et autour de l'île de Wight.

Pour rejoindre les nurseries, les larves peuvent parcourir plusieurs dizaines de kilomètres. Les larves qui subissent la métamorphose modifient leur répartition verticale et horizontale en se concentrant près du fond et dans la zone côtière. Une fois métamorphosés, les juvéniles à l'aspect semblable aux adultes, ont un mode de vie benthique. Ils se concentrent dans les baies et estuaires, en sélectionnant spécifiquement les fonds meubles vaseux et sablo-vaseux généralement inférieurs à 20 m.

La sole est un prédateur opportuniste principalement nocturne, dont le régime alimentaire est constitué par la faune d'invertébrés benthiques et épibenthiques, sessiles ou peu mobiles.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout ovale à ronde. Marges lisses. Marge postérieure convexe avec les angles entre les marges dorsale et ventrale marqués, et parfois proéminents. Rostre pas marqué, antirostre absent. Le *sulcus* est profond, présent sur environ 75 % de l'otolithe, et assez linéaire. La *cauda* est beaucoup plus courte que l'*ostium* et les deux sont fermés. L'intérieur est convexe. De taille moyenne en comparaison aux autres espèces de la même taille.

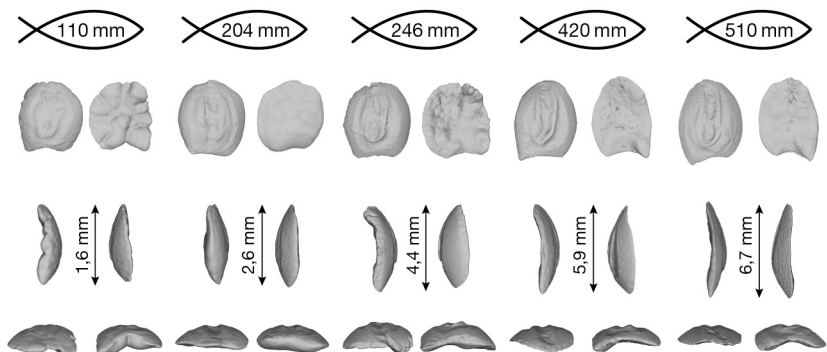


Figure 41. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la sole commune, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

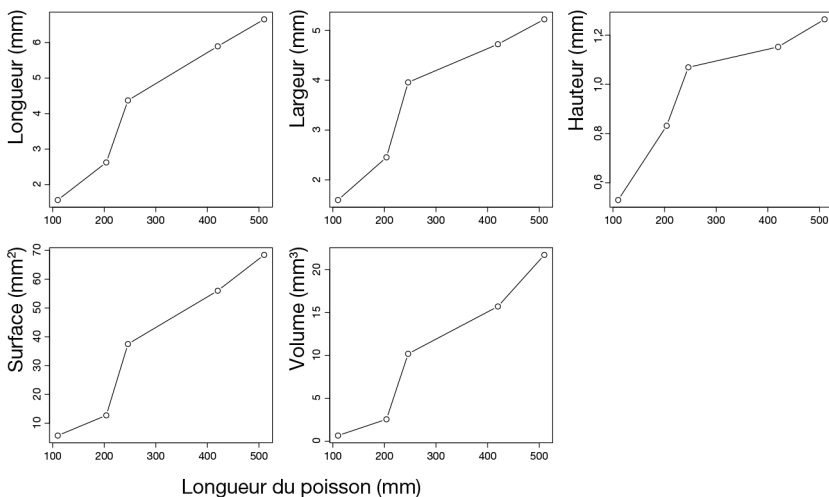


Figure 42. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la sole commune.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 11 et 51 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 1,6 et 6,7 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance similaire à celle du poisson. Chez la sole, l'otolithe est toujours marqué par une asymétrie de la face interne proximale. Le *sulcus*, très large et peu profond pour les jeunes individus, se creuse et se resserre chez les adultes. De même, le ratio largeur/longueur diminue avec le temps, car la croissance de l'otolithe sur l'axe antéro-postérieur est plus rapide que celle sur l'axe dorso-ventral. Les lobes présents sur la face externe distale peuvent diminuer, voire disparaître, au cours de la vie du poisson.

Limande-sole

Nom latin : *Microstomus kitt*

Nom anglais : *Lemon sole*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Pleuronectidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

La limande-sole est présente dans les eaux du plateau continental de l'Atlantique Nord-Est, depuis la mer Blanche et l'Islande jusqu'au golfe de Gascogne. Elle est commune en mer du Nord et en Manche, mais absente en mer Baltique.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur les fonds durs (plateaux rocheux), de graviers ou coquilliers, entre les eaux côtières et 200 m de profondeur. Les juvéniles de limande-sole en Manche-Ouest se distribuent sur les fonds durs de 50 à 100 m de profondeur.

■ Biologie et cycle de vie

La limande-sole atteint sa première maturité sexuelle entre 3 et 6 ans, ce qui correspond à une taille comprise entre 12 et 30 cm. La reproduction a lieu de janvier à mars dans le golfe de Gascogne, d'avril à juillet à l'ouest des îles britanniques, de mai à août aux îles Féroé et en Islande, et de mai à septembre dans le nord de la mer du Nord vers 100 m de profondeur. En Manche-Ouest, les femelles pondent de mars à août avec un pic de mai à juin. Les œufs et les larves sont pélagiques, et ce n'est qu'après la métamorphose que se fait le passage à la phase benthique pour les juvéniles. Contrairement à la plupart des poissons plats, les juvéniles de limandes-soles grandissent dans les eaux profondes de la Manche orientale.

La limande-sole ne migre pas au cours de sa vie en Manche-Ouest. Cependant, au large de l'Écosse, cette espèce migre de façon saisonnière.

La limande-sole se nourrit essentiellement d'annélides polychètes, de petits crustacés, de mollusques, d'échinodermes, de cœlentérés, de németes et d'ascidies. Au cours de sa vie, son intérêt pour les annélides polychètes diminue au profit des crustacés et des cœlentérés. De plus, la limande-sole cesse complètement de s'alimenter pendant l'hiver.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout rectangulaire à ovale. Marge lisse. Rostre et antirostre parfois proéminents, antirostre parfois absent. *Sulcus* profond, droit et fermé à la fin de la *cauda*. Des crêtes ou des concrétions sont parfois présentes autour du *sulcus*. De taille moyenne en comparaison aux autres espèces de même taille.

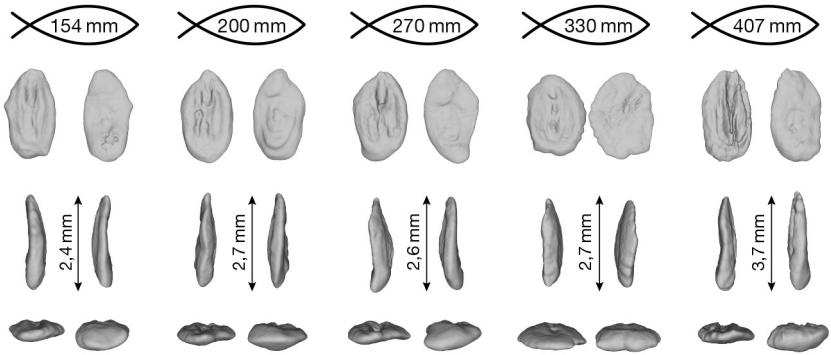


Figure 43. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la limande-sole, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

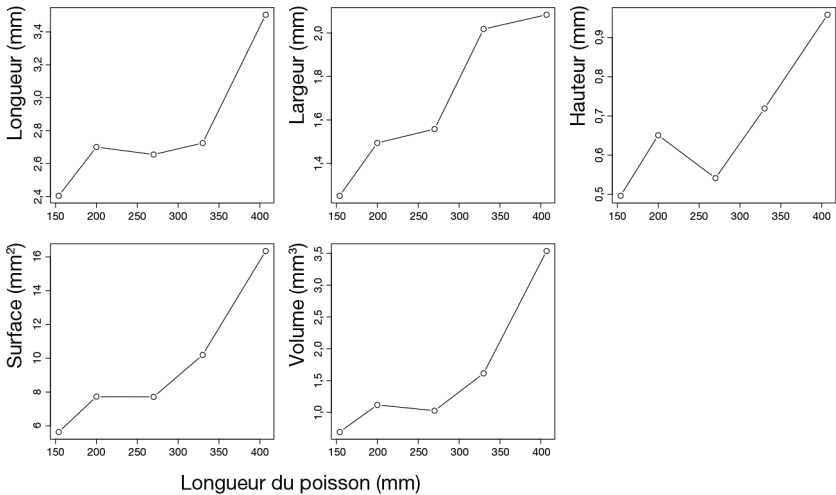


Figure 44. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la limande-sole.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 15 et 41 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 3,7 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. Chez la limande-sole comme pour d'autres poissons plats, les otolithes évoluent avec, pour des poissons de 15 à 30 cm, une forme relativement allongée présentant un rostre bien prononcé et un *sulcus* peu profond. Pour des poissons de plus de 35 cm, l'otolithe prend sa forme finale avec une asymétrie de la face interne proximale et un ratio largeur/longueur qui augmente. Le rostre s'aplanit et le *sulcus* se creuse.

Limande commune

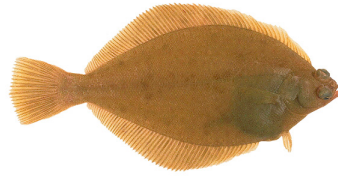
Nom latin : *Limanda limanda*

Nom anglais : *Common Dab*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Pleuronectidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

La limande commune est présente en Atlantique Nord-Est, du nord de la Norvège et de l'Islande jusqu'au golfe de Gascogne, ainsi qu'en mers de Barents, Blanche et Baltique.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur les fonds sableux de 20 à 150 m de profondeur. Espèce nordique se répartissant dans les eaux marines ayant des températures comprises entre 0 et 18°C. Cette espèce semble inféodée aux zones peu profondes, protégées des forts courants de marée, et présentant des sédiments vaseux.

■ Biologie et cycle de vie

La limande commence à se reproduire entre 10 et 20 cm. En Manche et sud Mer du Nord, la reproduction se déroule de février à avril sur les fonds de sables fins à grossiers à des profondeurs de 20 à 40 m. Les œufs pélagiques éclosent après 3 à 14 jours d'incubation, selon la température. Les larves pélagiques se métamorphosent en mai-juin autour de 12-13 mm et migrent vers le fond et vers la côte. En Manche orientale, les nurseries sont distribuées dans les baies des Veys, Seine, Somme, Canche, Authie, Rye et Solent. Les alevins passent leur première année entre 8 et 10 m de profondeur, avant de s'éloigner de la côte.

La limande commune adulte se nourrit de petits crustacés, mollusques bivalves, annélides, échinodermes, cnidaires et quelques petits poissons.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout ovale. Relativement rectangulaire avec un bord plutôt lisse. L'*ostium* est plus long que la *cauda*, et les deux sont séparés et fermés.

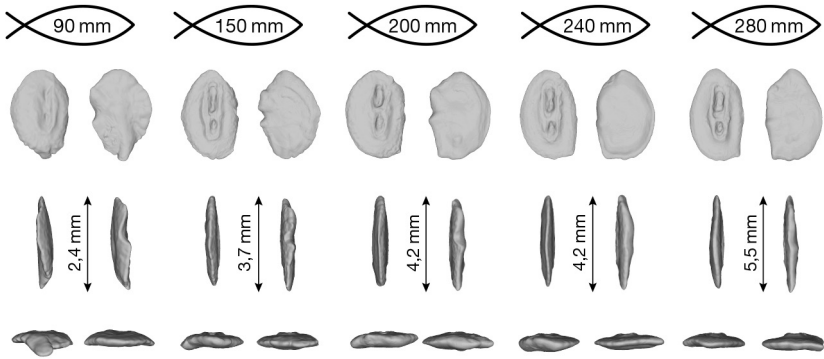


Figure 45. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la limande commune, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

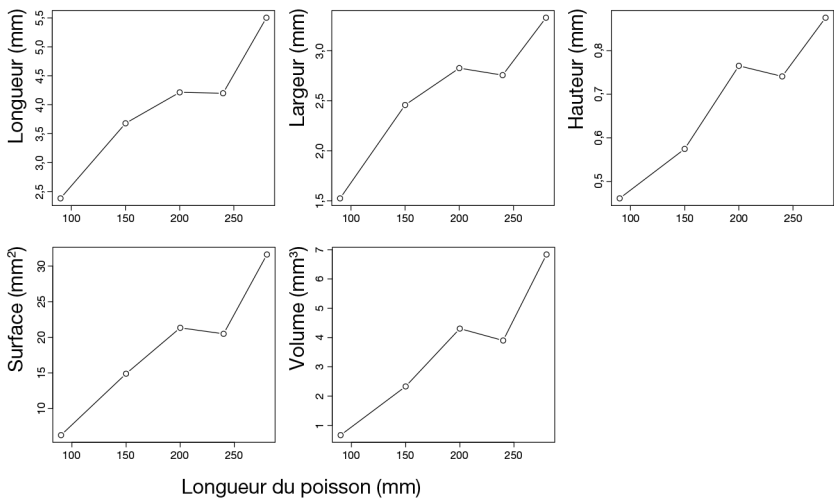


Figure 46. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la limande commune.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 9 et 28 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 2,4 et 5,5 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance plus faible que celle du poisson. On peut noter une évolution des otolithes surtout au début de la vie de la limande commune, avec une forme de la face interne proximale qui se simplifie et un *sulcus* qui, à l'inverse, se forme et se creuse. Pour des poissons de taille supérieure à 20 cm, la face externe distale s'aplanit fortement.

Flet commun

Nom latin : *Platichthys flesus*

Nom anglais : *European flounder*

Ordre : Gadiformes

Famille : Gadidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

Le flet est très commun en Atlantique Est, et plus particulièrement dans les eaux côtières et saumâtres de l'Europe occidentale, ainsi que de la mer Blanche à la Méditerranée et à la mer Noire. On le retrouve sur les côtes des États-Unis et du Canada, car cette espèce a été introduite accidentellement par le biais des eaux de ballast.

■ Environnement

Poisson benthique vivant sur les fonds sableux, sablo-vaseux et vaseux, entre la côte et 60 m de profondeur, bien qu'on le trouve aussi jusqu'à 100 m de profondeur. C'est un poisson ubiquiste se répartissant essentiellement dans les eaux marines littorales et les estuaires, mais pouvant vivre dans les eaux saumâtres, voire douces, lorsqu'il remonte le cours des rivières. Cette espèce montre ainsi une grande tolérance aux variations assez larges de salinité. Le flet s'accommode aussi à des températures très variées allant des climats polaires à tempérés. En Manche, il est principalement présent dans les estuaires et les eaux côtières, le long des côtes anglaises et françaises.

■ Biologie et cycle de vie

Le flet passe l'été en rivière et estuaire, et retourne en mer l'hiver pour la ponte qui s'étend de janvier à août. La ponte débute mi-janvier dans le sud de la mer du Nord, se poursuivant jusqu'en avril dans le sud de sa zone de répartition et jusqu'en août dans le nord. Les œufs sont pélagiques et sphériques. Les larves grandissent dans les eaux estuariennes ou péri-estuariennes. Dès que le flet atteint sa maturité sexuelle, il migre dans des eaux un peu plus profondes présentant des fonds sablo-vaseux.

■ Description de l'otolithe

De forme ovale, avec un rostre proéminent, relativement dentelé. Aucun anti-rostre. Angle prononcé entre le postérieur et la marge dorsale. Il est légèrement convexe sur la face proximale et assez plat sur la surface distale. Le *sulcus* est court, droit et fermé aux deux côtés. De taille assez grande en comparaison aux autres espèces de même taille.

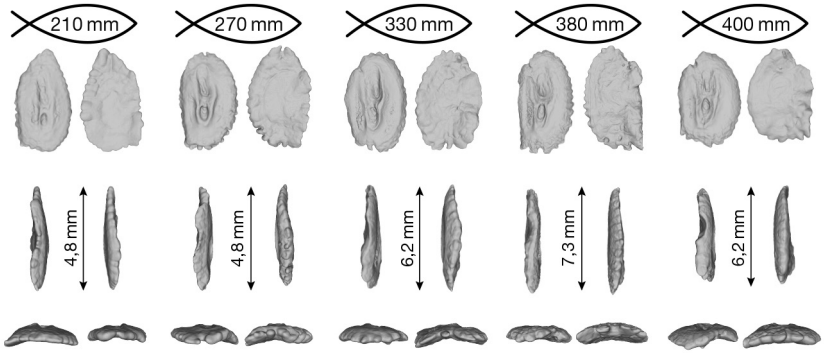


Figure 47. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du flet commun, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

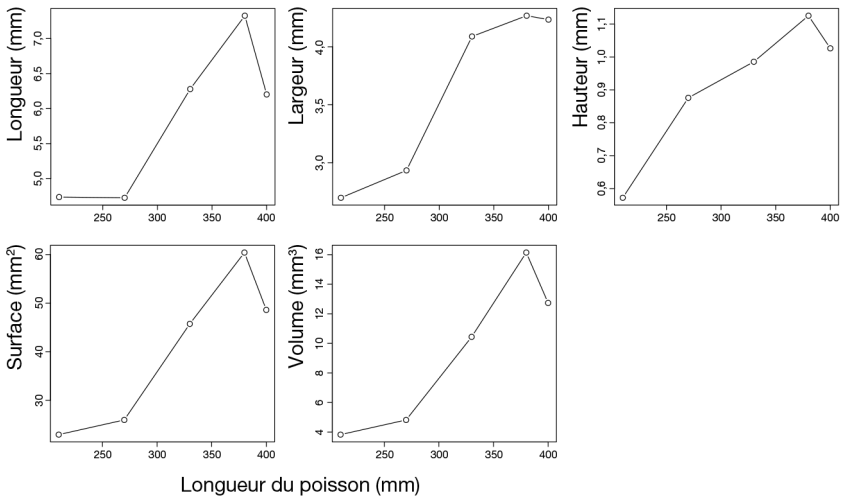


Figure 48. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du flet commun.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 21 et 40 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 4,8 et 7,3 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance relativement plus faible que celle du poisson. Seul le flet de 21 cm montre un rostre bien marqué en pointe. En revanche, par la suite, au cours de la vie du flet, tous les otolithes montrent une zone arrondie au niveau du rostre et une asymétrie antéro-postérieure, avec un côté dorsal lobé et côté ventral droit.

Turbot

Nom latin : *Scophthalmus maximus*

Nom anglais : *Turbot*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Scophthalmidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

Le turbot est présent en Atlantique Nord-Est, dans toute la mer Méditerranée et le long des côtes européennes jusqu'au cercle polaire. Il est également très présent dans la majeure partie de la mer Baltique.

■ Environnement

Poisson benthodémersal, vivant sur des fonds sablonneux, rocheux ou mixtes. Les turbots sont assez fréquents dans les eaux saumâtres.

■ Biologie et cycle de vie

Le turbot se reproduit dès qu'il atteint une taille de 40 à 45 cm, entre les mois de février et d'avril en Méditerranée, et de mai à juillet dans l'Atlantique. La ponte est séquentielle tous les 2 à 4 jours. La femelle produit des œufs pélagiques. Les larves sont initialement symétriques mais, à la fin de la métamorphose, entre le 40^e et le 50^e jour après éclosion, l'œil droit se déplace vers le côté gauche, perdant ainsi sa symétrie bilatérale initiale.

Le turbot se nourrit principalement d'autres poissons vivant sur le fond, souvent de petites tailles, et aussi, dans une moindre mesure, de crustacés et de bivalves.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout ovale à rectangulaire, et plus allongé que celui de *Scophthalmus rhombus*. Marges crénelées. Angle entre marges antérieure et dorsale marqué. Rostre large et arrondi, antirostre plutôt petit ou absent. Le *sulcus* linéaire est présent sur environ 75 % de l'otolithe. La *cauda* mesure un tiers de la longueur de l'*ostium*. De taille assez grande en comparaison aux autres espèces de la même taille.

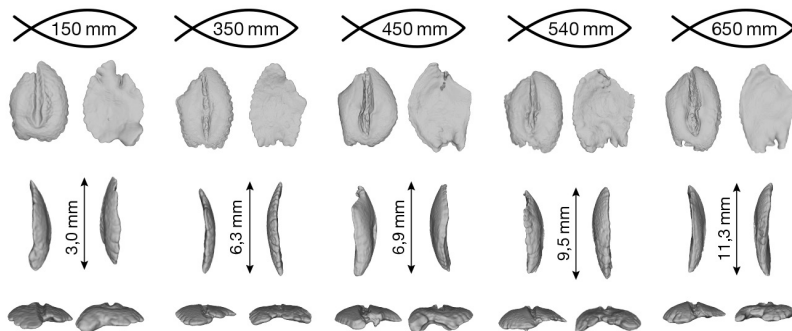


Figure 49. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie du turbot, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

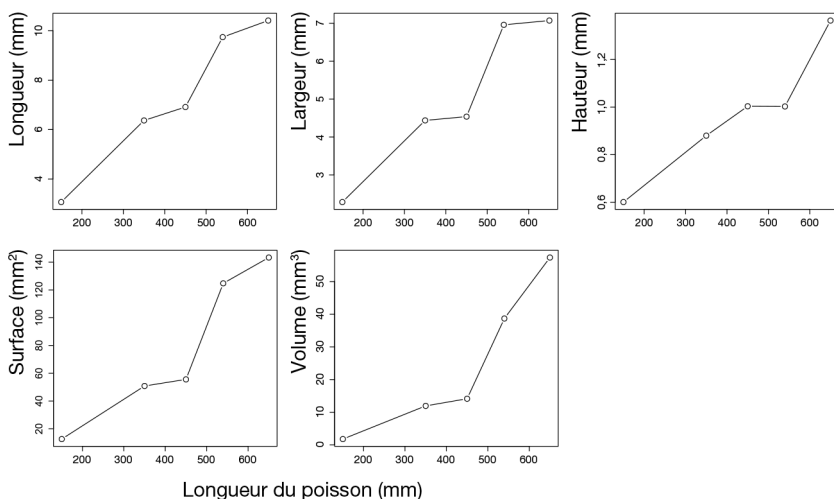


Figure 50. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur du turbot.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 15 et 65 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 3 et 11,3 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance similaire à celle du poisson. Chez le turbot, comme pour d'autres poissons plats, les otolithes évoluent avec, pour des poissons de 15 à 40 cm, une forme relativement allongée présentant un rostre bien prononcé et un *sulcus* peu profond. Pour des poissons de plus de 40 cm, l'otolithe prend sa forme finale avec une asymétrie de la face interne proximale et une hauteur qui augmente. Le *sulcus* se creuse lorsque le poisson grandit.

Plie commune

Nom latin : *Pleuronectes platessa*

Nom anglais : *European plaice*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Pleuronectidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

La plie est largement distribuée dans les eaux continentales de l'Atlantique Nord, du Groenland et de la mer Blanche jusqu'aux côtes de l'Afrique du Nord. Les plies de Manche se déplacent en mer du Nord et inversement.

■ Environnement

Poisson benthodémersal vivant préférentiellement sur des fonds sableux, mais aussi graveleux ou vaseux, de la côte jusqu'à 200 m de profondeur. Les plies communes se répartissent dans les eaux salées à saumâtres tempérées.

■ Biologie et cycle de vie

La plie présente un âge moyen de première maturité sexuelle de 2 à 4 ans, pour des tailles de 20 à 33 cm dans le sud de la mer du Nord. La taille de première maturité, très variable sur le plan individuel, est en moyenne de 25 cm pour les mâles et de 31-33 cm pour les femelles et a lieu à l'âge de 3 ans en Manche. Toujours en Manche, la plie se reproduit de décembre à mars avec un pic généralement situé en janvier-février. Elles se reproduisent là où elles sont nées. Les frayères sont situées au centre de la Manche. Les œufs ainsi que les larves sont pélagiques et transportés par le courant. Après la métamorphose, les juvéniles arrivent sur les nourriceries côtières grâce aux courants de marée, en se positionnant en pleine eau lors des marées montantes avant de regagner le fond lors de l'étalement de pleine mer et de s'y maintenir tout au long de la marée descendante. De tels mécanismes de déplacement sont également utilisés par les adultes lors des migrations liées à la reproduction et à la nutrition.

Durant toute sa vie, la plie s'alimente de proies benthiques. Ce sont les mollusques bivalves et, en moindre importance, les annélides polychètes qui sont les proies préférentielles. La plie adulte peut manger certains petits poissons.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout ovale, avec un angle proéminent entre les marges postérieure et dorsale. La marge dorsale est assez linéaire. Le rostre est arrondi. Absence de l'antirostre. Le *sulcus* est peu profond et s'étend sur 50 % de la longueur. L'*ostium* est plus long que la *cauda*, et les deux sont fermés. De taille assez importante en comparaison aux autres espèces de même taille.

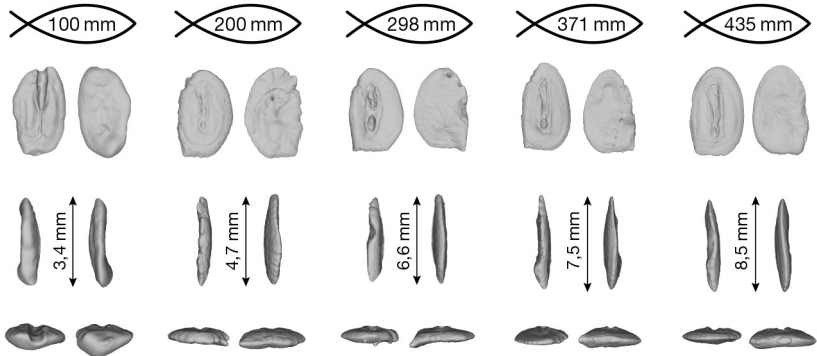


Figure 51. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la plie commune, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

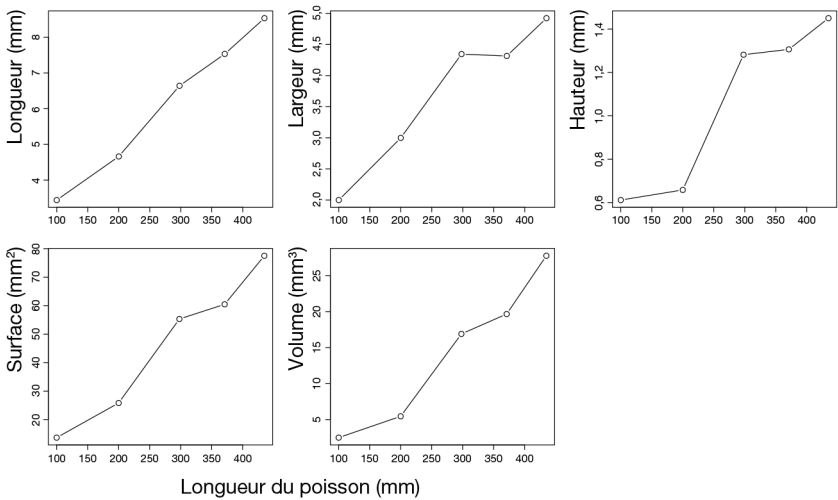


Figure 52. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la plie commune.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 10 et 44 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 3,4 et 8,5 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance bien plus faible que celle du poisson. Un poisson de 10 cm présente un otolithe bien différent des poissons plus grands, avec un *sulcus* ouvert sur la partie antérieure et une forme relativement rectangulaire. À partir de 20 cm, l'otolithe prend sa forme finale avec une asymétrie de la face interne proximale, le *sulcus* se creuse au centre de l'otolithe et il n'est plus ouvert.

Barbue

Nom latin : *Scophthalmus rhombus*

Nom anglais : *Brill*

Ordre : Pleuronectiformes

Famille : Scophthalmidae

Morphotype : poisson plat



■ Aire de répartition

La barbue est présente en Atlantique Est, du 68° parallèle nord au Maroc, et notamment en Islande. Elle est également connue dans l'ensemble de la mer Méditerranée et de la mer Noire.

■ Environnement

Poisson benthodémersal qui ne vit que sur des fonds sablonneux ou mixtes.

■ Biologie et cycle de vie

La barbue atteint sa première maturité sexuelle entre 25 et 37 cm avec une grande différence de taille entre les femelles et les mâles, beaucoup plus petits. La période de reproduction est située entre mars et août.

La barbue se nourrit de poissons et de crustacés.

■ Description de l'otolithe

De forme surtout elliptique à ovale. Rostre large et parfois proéminent, anti-rostre plutôt petit ou absent. Le *sulcus* profond est présent sur environ 75 % de l'otolithe. La *cauda* mesure un tiers de la taille de l'*ostium*. De taille moyenne à grande en comparaison aux autres espèces de la même taille.

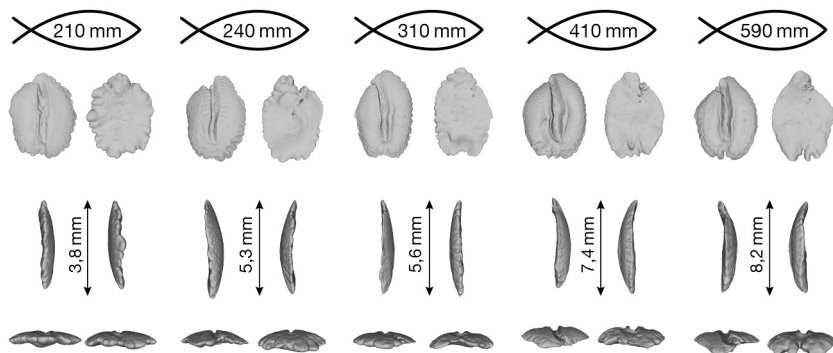


Figure 53. Évolution de la forme et de la taille des otolithes au cours de la vie de la barbue, représentée par cinq individus identifiés par leur longueur totale exprimée en millimètres.

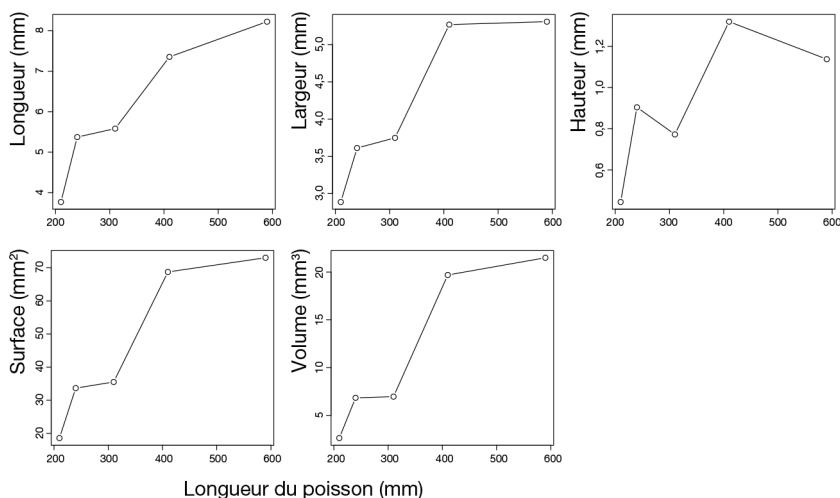


Figure 54. Relations entre les caractères morphologiques de l'otolithe et la longueur de la barbue.

■ Synthèse

Les poissons analysés mesuraient entre 21 et 59 cm, pour des otolithes présentant des longueurs comprises entre 3,8 et 8,2 mm. Cela montre que l'otolithe a une croissance légèrement plus faible que celle du poisson. Chez la barbue, à l'inverse d'autres poissons plats, les plus petits poissons ont un rostre aplani qui s'affine lors de la croissance. De même, le contour découpé des juvéniles se lisse au fur et à mesure. Enfin, comme pour de nombreux poissons plats, l'otolithe présente une asymétrie de la face interne proximale et un *sulcus* relativement profond, mais étroit.

Critères d'identification des espèces

Les principaux critères morphologiques d'un otolithe sont nombreux et comprennent la nature et la complexité de son contour, sa forme générale (ronde, ovale, rectangulaire, etc.), la convexité de la face interne proximale, la concavité de la face externe distale et enfin l'épaisseur mesurable en vues ventrale et dorsale. Pour comparer ces mesures de concavité, de convexité et d'épaisseur, la vue ventrale est utilisée, car elle présente un bord moins découpé et moins variable que la vue dorsale, où se trouvent généralement les parties lobées de l'otolithe. Ainsi, la vue dorsale est l'un des derniers critères utilisés pour reconnaître l'espèce, tandis que la face interne en vue proximale est souvent la première observation employée pour la déterminer, car elle permet de bien observer le bord, mais aussi la partie appelée *sulcus acusticus* où la membrane se fixe sur l'otolithe. Cette zone est extrêmement informative, et discriminante pour identifier l'espèce à qui appartient l'otolithe analysé. Ce *sulcus acusticus* est plus ou moins au centre de la face interne et orienté selon un axe antéro-postérieur commençant près du bord postérieur par une zone appelée *cauda*, puis continuant par une deuxième zone appelée *ostium* et terminant enfin par le bord antérieur appelé *excisura*. Cet *excisura* est extrêmement important, car il relie le rostre à l'antirostre, et cette zone est particulièrement différenciable entre des espèces souvent très proches en ce qui concerne la taxonomie. Si la face interne proximale montre beaucoup d'informations morphologiques, la face externe distale peut quant à elle compléter de façon significative les critères morphologiques avec la présence de lobes plus ou moins nombreux.

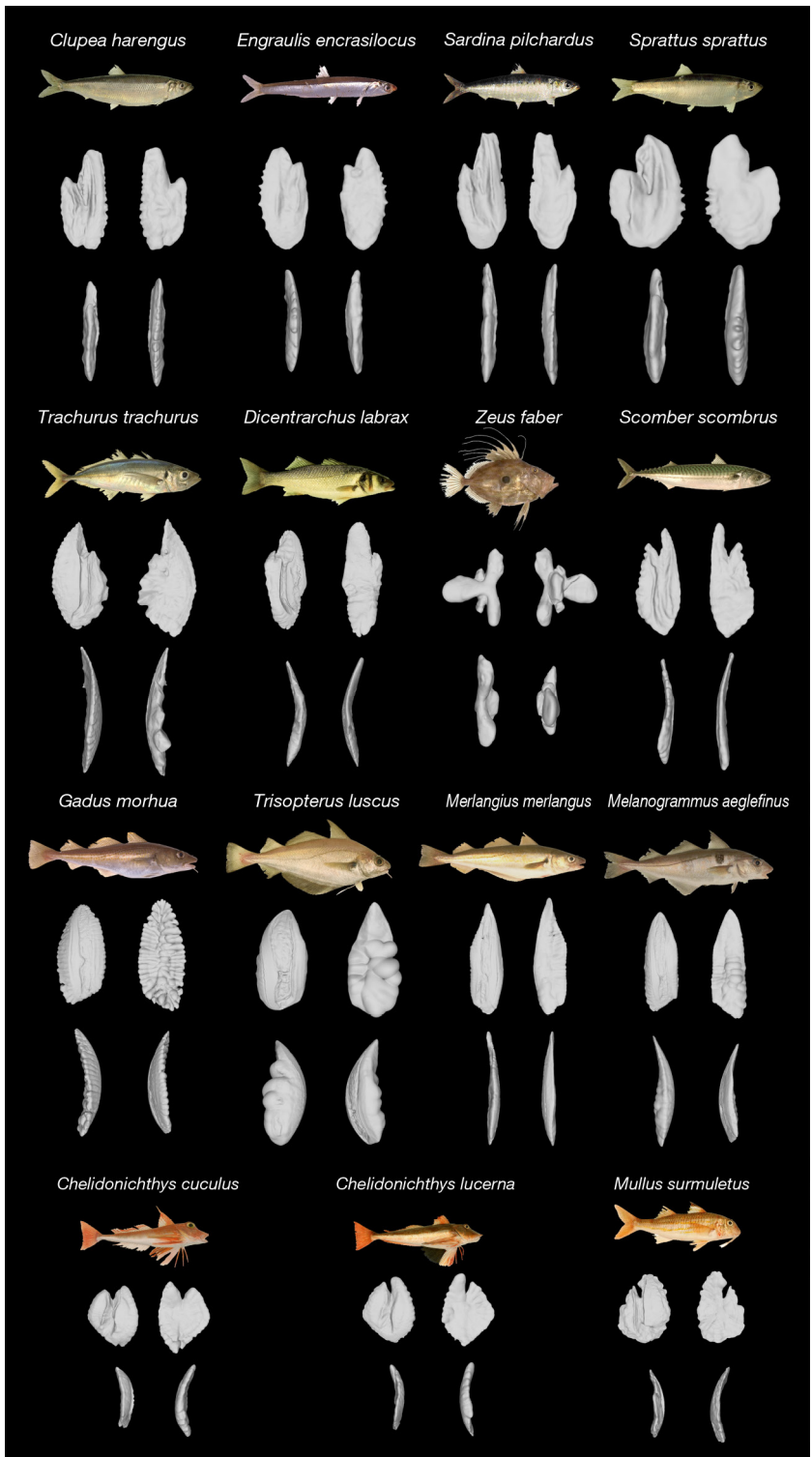
Parmi les 22 principales espèces commerciales de poissons de Manche et de mer du Nord (figure 55), le saint-pierre est l'espèce la plus facile à identifier, car c'est la seule qui présente une forme atypique en « étoile », due à l'existence d'une crête postéro-dorsale. Cette forme générale est le premier critère à observer, car les otolithes montrent des formes en vues proximale et distale pouvant aller du rond, au carré, en passant par le rectangle ou la forme allongée (dite oblongue), qui se traduit finalement par un rapport entre la longueur et la largeur de l'otolithe.

Le second critère d'identification de l'espèce est la présence du rostre et de l'antirostre, séparés par un *excisura* (partie antérieure au niveau du *sulcus*) marqué, et donc montrant un renforcement au niveau de la forme. C'est le cas chez certains poissons ronds en particulier, comme le maquereau, l'anchois, le hareng, le sprat, la sardine, les grondins rouge et perlon et le rouget barbet de roche. À l'inverse, pour les poissons plats, quasiment aucun ne présente cette particularité anatomique. Les caractéristiques du *sulcus* sont elles aussi extrêmement intéressantes pour identifier les espèces. Il convient d'observer le ratio entre sa taille et celle de l'axe antéro-postérieur : 1/1 chez le maquereau, le chinchard et la morue ; 2/3 chez la sardine, l'églefin, le turbot et la barbue ; et 1/3 chez la limande et le sprat, par exemple. En plus de sa taille, le *sulcus*, composé de la *cauda* et de l'*ostium* montre soit une continuité entre ces deux zones formant un sillon unique (chez le maquereau, le grondin et la sole), soit deux sillons bien séparés sur l'axe antéro-postérieur (chez la limande commune, la limande-sole et la plie). Enfin, le *sulcus* peut être un indicateur de l'espèce en fonction de sa largeur et de la profondeur de ses sillons.

Un autre critère observable sur la face interne proximale est la forme externe plus ou moins complexe présentant éventuellement des lobes. Ces formes du contour sont soit absentes (chez la sole, la limande et la plie), soit lobées (chez

le cabillaud, le merlan et le turbot par exemple), soit dentelées (chez l'anchois, le flet, le sprat, les grondins rouge et perlon par exemple).

Sur la face distale externe, il peut aussi y avoir des bourrelés ou boursoufflements lobés présents sur la face et non sur son contour (chez le tacaud et la morue par exemple). Si les faces interne proximale et externe distale sont utilisées prioritairement pour distinguer les premiers critères d'identification de l'espèce, il est nécessaire d'employer ensuite les vues ventrale et dorsale pour observer la concavité très marquée (chez le bar, les grondins rouge et perlon et le rouget barbet par exemple), soit, à l'inverse, quasiment absente (chez la limande, la plie, le hareng et le sprat par exemple). Le second critère à observer sur ces faces est l'épaisseur de l'otolithe traduisant sa hauteur, qui est soit importante (chez le tacaud, le sprat et le saint-pierre par exemple), soit mince (chez le merlan et le maquereau par exemple).



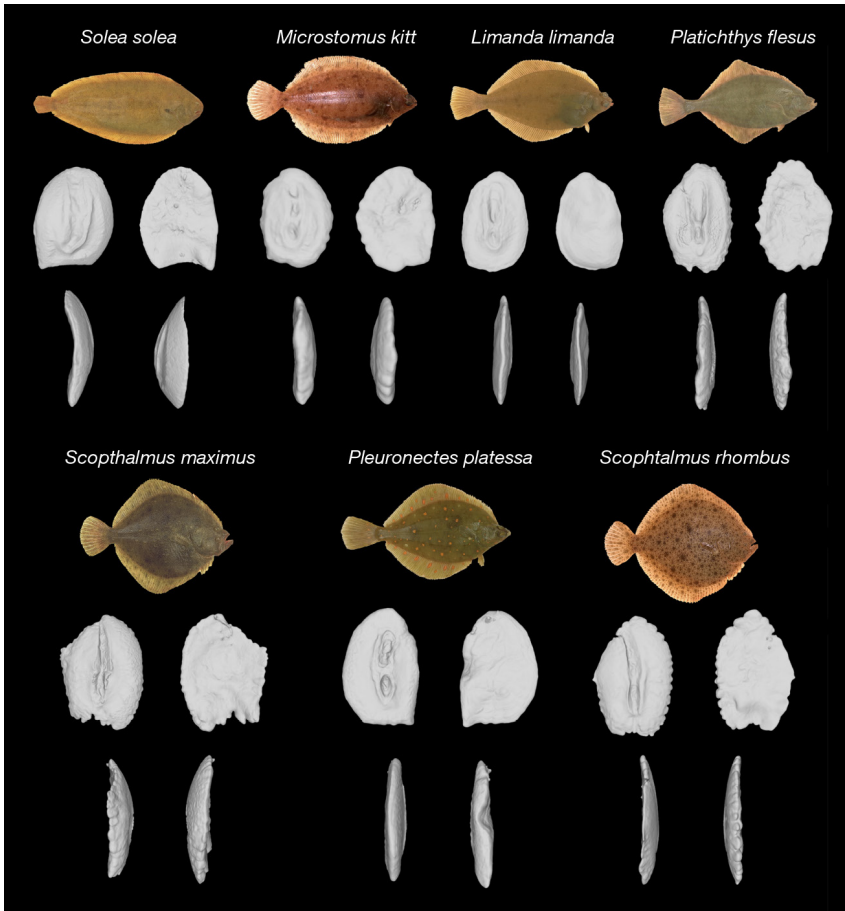


Figure 55. Présentation des otolithes des 22 principales espèces de Manche-mer du Nord avec les quatre vues 2D extraites de l'image en 3D.

Une analyse en composantes principales utilisant les coefficients de Fourier 3D individuels issus de l'analyse Spharm a été réalisée pour visualiser les différences et similarités de forme entre les espèces. Les figures 56 et 57 reportent la projection des individus sur les quatre premières composantes principales de l'ACP, qui résument plus de 60% des variations de forme contenues dans les coefficients. Ces analyses graphiques permettent de comprendre les différences entre espèces, mais aussi de voir quelles sont les espèces les plus proches de celle identifiée comme étant la plus probable, et d'affiner au besoin notre jugement.

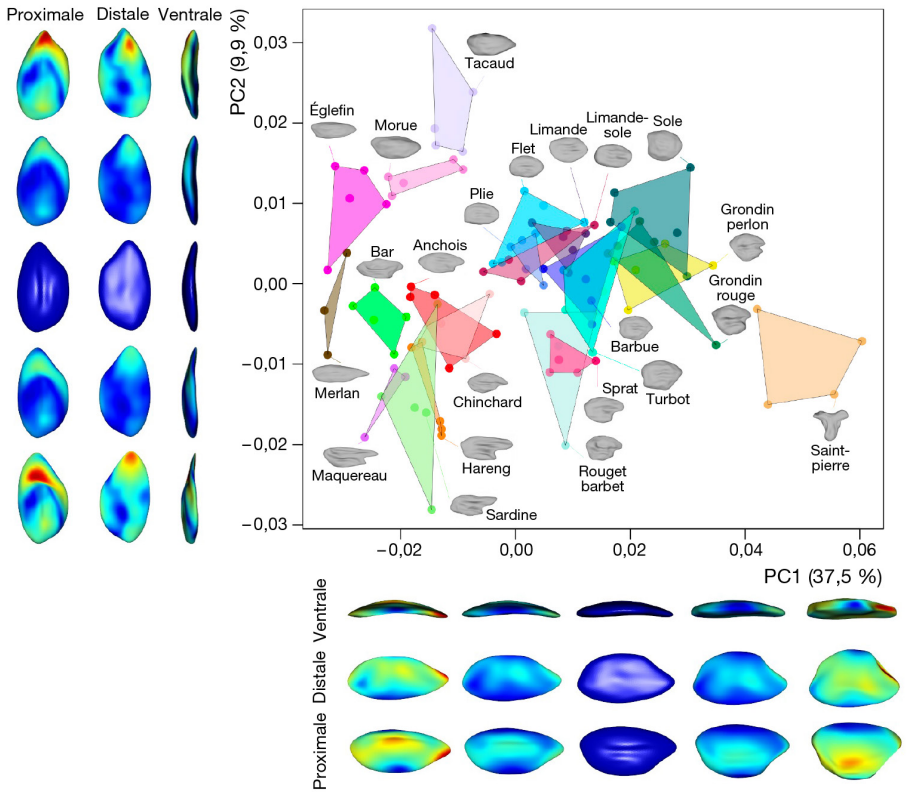


Figure 56. Représentation graphique des composantes principales PC1 et PC2 des différences entre la forme 3D des otolithes des 22 principales espèces de Manche-mer du Nord.

Chaque individu analysé est représenté par un point coloré, et tous les individus d'une espèce sont délimités par une enveloppe convexe (polygone). La forme théorique pour chaque espèce a été reconstruite pour aider visuellement à comprendre les critères morphologiques rapprochant certaines espèces entre elles. Pour appréhender les différences expliquant chaque axe graphique appelé PC, trois vues (proximale, distale et ventrale) sont exposées avec un code couleur allant du bleu foncé (pas de différence) au rouge (différence la plus importante).

Le premier axe graphique PC1 est expliqué essentiellement par la zone centrale représentant le *sulcus* (figure 56). L'axe PC2 quant à lui montre bien que la zone du rostre et antirostre, avec l'*excisura* au milieu, est un critère très important de discrimination des espèces. Enfin, les axes graphiques PC3 et PC4 indiquent des différences sur toutes les vues, et en particulier à l'intérieur des vues et pas uniquement sur le contour extérieur de la vue proximale utilisé classiquement en analyse 2D (figure 57).

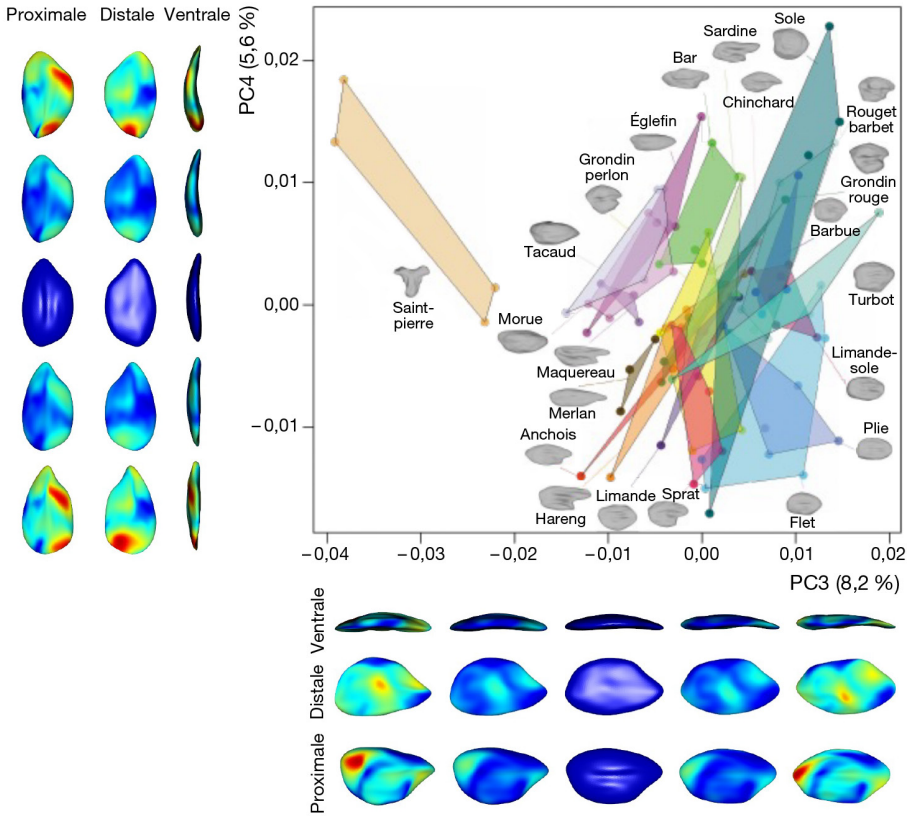


Figure 57. Représentation graphique des composantes principales PC3 et PC4 des différences entre la forme 3D des otolithes des 22 principales espèces de Manche-mer du Nord.

Chaque individu analysé est représenté par un point coloré, et tous les individus d'une espèce sont délimités par une enveloppe convexe (polygone). La forme théorique pour chaque espèce a été reconstruite pour aider visuellement à comprendre les critères morphologiques rapprochant certaines espèces entre elles. Pour appréhender les différences expliquant chaque axe graphique appelé PC, trois vues (proximale, distale et ventrale) sont exposées avec un code couleur allant du bleu foncé (pas de différence) au rouge (différence la plus importante).

Forme de l'otolithe liée à son habitat et à son morphotype

Les otolithes permettent aux poissons de détecter les stimulations auditives et vestibulaires (Wright *et al.*, 2002). La science appelée écomorphologie est basée sur le fait que la forme est le résultat d'une adaptation fonctionnelle à l'environnement (Feilich et López-Fernández, 2019). Les espèces démersales (poissons vivant au milieu de la colonne d'eau) et benthiques (espèces vivant sur le fond), du fait du faible niveau de visibilité par rapport à la surface, ont beaucoup plus développé leur audition que les espèces pélagiques (espèces vivant en haut de la colonne d'eau, près de la surface) (Lychakov et Rebane, 2005 ; Wright *et al.*, 2010). Une étude d'écomorphologie basée sur des espèces de poissons observés entre 200 et 750 m de fond montre qu'il existe une corrélation positive entre profondeur et taille des otolithes (Cruz et Lombarte, 2004 ; Lombarte et Cruz,

2007). La relation entre la forme et la taille de l'otolithe et les fonctions de mécanoréception et de transduction du son a également été abordée dans plusieurs études (Gauldie et Nelson, 1990; Popper et Lu, 2000; Schulz-Mirbach *et al.*, 2011; Inoue *et al.*, 2013). Les conclusions laissent à penser que les poissons vivant au fond présentent des otolithes plus grands que ceux des espèces pélagiques, ce qui est une conséquence du développement de leur capacité d'écoute et de communication (supérieur à celui de la capacité de vision). Ces caractéristiques de forme et de taille des otolithes seraient aussi la conséquence de leur rôle dans la nage, au travers de la fonction vestibulaire, car les poissons ayant des capacités de nage très rapide avec de fortes accélérations présentent des otolithes très petits (Lychakov et Rebane, 2005).

En reprenant l'analyse en composantes principales utilisant les données individuelles et regroupées par morphotype (poissons ronds et plats) ou par habitat (espèces pélagiques, démersales et benthiques) pour les 22 principales espèces de Manche et de mer du Nord, on constate que les morphotypes ou les différents habitats discriminent bien la forme 3D des otolithes (figures 58 et 59). On observe ainsi que les otolithes de poissons plats se distinguent relativement bien des poissons ronds (figure 58). De même, selon le milieu (pélagique, démersal ou benthique) dans lequel vivent les poissons, leur adaptation fonctionnelle influence particulièrement la forme de leur otolithe (figure 59). Il est à noter que pour les six espèces de poissons démersaux appartenant essentiellement à la famille des gadidés (morue, merlan, églefin, tcaud commun, bar, saint-pierre), il n'y a pas de recouvrement entre les espèces. Ainsi, bien qu'il y ait une évolution au cours de la vie du poisson (variation de taille des otolithes), la forme 3D des otolithes de ces espèces est très spécifique, permettant une bonne reconnaissance de l'espèce.

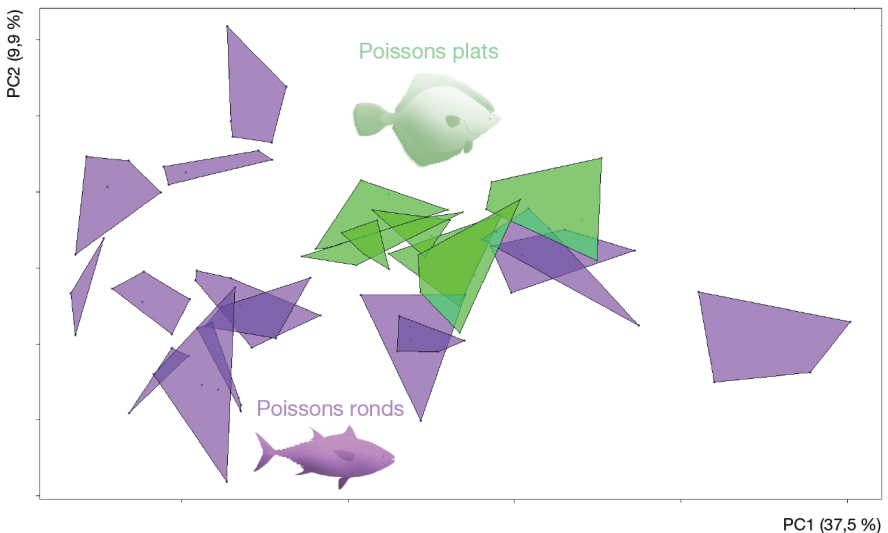


Figure 58. Représentation graphique des composantes principales PC1 et PC2 des différences entre la forme 3D des otolithes des espèces de poissons ronds et plats.

Chaque espèce est représentée par un polygone d'une couleur et chaque point correspond à un individu de l'espèce analysée.

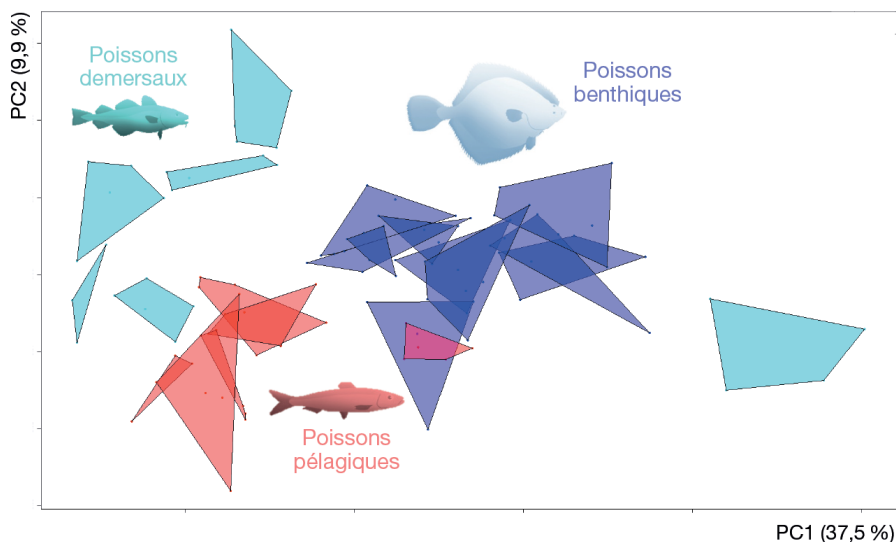


Figure 59. Représentation graphique des composantes principales PC1 et PC2 des différences entre la forme 3D des otolithes des espèces de poissons pélagiques, démersaux et benthiques. Chaque espèce est représentée par une forme d'une couleur et chaque point correspond à un individu de l'espèce analysée.

Conclusion

Si le nombre d'espèces abordées dans ce guide d'identification est relativement faible par rapport à d'autres ouvrages antérieurs, il se veut très novateur pour quatre raisons essentielles :

- c'est la première fois qu'un ouvrage présente des analyses de forme d'otolithes en 3D et pas simplement en 2D ;
- pour chaque espèce sont présentées les relations entre les paramètres de forme de l'otolithe et la taille du poisson sur l'ensemble du gradient de taille de l'espèce ;
- des analyses statistiques graphiques permettent d'aider l'utilisateur à différencier les espèces et à identifier celles pouvant être confondues ;
- les analyses 3D montrent que les morphotypes (poissons ronds *versus* poissons plats) ou les habitats (pélagique, démersal et benthique) des espèces discriminent bien la forme des otolithes.

Enfin, cet ouvrage montre bien l'intérêt d'utiliser des images 3D par rapport à de simples images en 2D parfois pas assez représentatives de la forme globale.

Bibliographie

- Agiadi K., 2022. The fossil otolith record of fishes (Vertebrata: Teleostei) in Greece, in Vlachos E. (éd.), *Fossil Vertebrates of Greece Vol. 1.*, Cham, Springer, 143-183.
- Begg G.A., Brown R.W., 2000. Stock identification of haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) on Georges Bank based on otolith shape analysis. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(4), 935-945.
- Bennet D., Casey J., Dare P., Dawson W., Flatman S., Hulme T., Macer C., Millner R., Pickett G., Vince M., Loran P., Souplet A., Giret M., Morin J., Berthou A., Latrouite D., Morizot Y., Bossy S., Ozanne P., 1993. *Identification biogéographique des principaux stocks exploités en Manche, relations avec ceux des régions voisines*, rapport interne de la Direction des Ressources Vivantes, IFREMER et Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 258 p., <<https://archimer.ifremer.fr/doc/1993/rapport-719.pdf>> (consulté le 17/04/2024).
- Cadrin S.X., Dickey-Collas M., 2015. Stock assessment methods for sustainable fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 72(1), 1-6.
- Campana S.E., 2005. Otolith science entering the 21st century. *Marine and Freshwater Research*, 56(5), 485-495.
- Campana S.E., Casselman J.M., 1993. Stock Discrimination Using Otolith Shape Analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(5), 1062-1083, <<https://doi.org/10.1139/f93-123>> (consulté le 15/04/2024).
- Campana S.E., Thorrold S.R., 2001. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understating of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(1), 30-38.
- Carpentier A., Coppin F., Curet L., Dauvin J.C., Delavenne J., Dewarumez J.M., Dupuis L., Foveau A., Garcia C., Gardel L., Harrop S., Just R., Koubbi P., Lauria V., Martin C., Meaden G., Morin J., Ota Y., Rostiaux E., Smith B., Spilmont N., Vaz S., Villanueva C.M., Verin Y., Walton J., Warembourg C., 2009. *Atlas des Habitats des Ressources Marines de la Manche Orientale – CHARM II*, Programme INTERREG 3a, Ifremer, Boulogne-sur-Mer, 626 p., <<https://archimer.ifremer.fr/doc/2009/rapport-7377.pdf>> (consulté le 05/03/2024).
- Casselman J.M., 1987. Determination of age and growth, in Weatherley A.H., Gill H.S. (éd.), *The Biology of Fish Growth*, New York, Academic Press, 209-242.
- CIEM, 2002. *Workshop on the Transport of Cod Larvae*, 14-17 avril 2002, rapport, Hillerød, Danemark, 45 p.
- CIEM, 2006. *Working Group on the Assessment of Demersal Stocks in the North Sea and Skagerrak (WGNSSK)*, 6-15 septembre 2005, rapport, ICES Expert Group, Copenhagen, Danemark, <<https://doi.org/10.17895/ices.pub.19267442.v1>> (consulté le 17/04/2024).
- CIEM, 2011. *Workshop of national age readings coordinators (WKNARC)*, 5-9 September 2011, rapport, CIEM, Boulogne-sur-Mer, France, 175 p.
- Claude J., 2008. *Morphometrics with R*, New York, Springer, 316 p.
- Cruz A., Lombarte A., 2004. Otolith size and their relationship with colour pattern and sound production. *Journal of Fish Biology*, 65(6), 1512-1525.
- Dorel D., 1986. *Poissons de l'Atlantique nord-est. Relations taille-poids*, rapport, Ifremer, Nantes, 183 p., <<https://archimer.ifremer.fr/doc/1986/rapport-1289.pdf>> (consulté le 17/04/2024).
- Disspain M.C.F., Ulm S., Gillanders B.M., 2016. Otoliths in archaeology: Methods, applications and future prospects. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 6, 623-632.
- Feilich K.L., López-Fernández H., 2019. When does form reflect function? Acknowledging and supporting ecomorphological assumptions. *Integrative and Comparative Biology*, 59(2), 358-370.
- Fossen I., Albert O.T., Nilssen E.M., 2003. Improving the precision of ageing assessments for long rough dab by using digitised pictures and otolith measurements. *Fisheries Research*, 60, 53-64.

- Gauldie R., Nelson D.G., 1990. Otolith growth in fishes. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 97(2), 119-135.
- Inoue M., Tanimoto M., Oda Y., 2013. The role of ear stone size in hair cell acoustic sensory transduction. *Scientific Reports*, 3, 2114.
- Iwata H., Ukai Y., 2002. SHAPE: A computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic Fourier descriptors. *Journal of Heredity*, 93, 384-385.
- Lagardère F., Troadec H., 1997. Age estimation in common sole *Solea solea* larvae: validation of daily increments and evaluation of a pattern recognition technique. *Marine Ecology Progress Series*, 155, 223-237.
- Lombarte A., Cruz A., 2007. Otolith size trends in marine fish communities from different depth strata. *Journal of Fish Biology*, 71(1), 53-76.
- Lowry M.S., 2011. Photographic catalog of California marine fish otoliths: prey of California Sea lions (*Zalophus californianus*). NOAA Technical Memorandum NMFS NOAA-TM-NMFS-SWFSC-483, <<https://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/TM/SWFSC/NOAA-TM-NMFS-SWFSC-483.pdf>> (consulté le 04/03/2024).
- Lychakov D.V., Rebane Y.T., 2005. Fish otolith mass asymmetry: morphometry and influence on acoustic functionality. *Hearing Research*, 201(1), 55-69.
- Mahé K., Aumond Y., Rabhi K., Elleboode R., Bellamy E., Huet J., Gault M., Roos D., 2017. Relationship between somatic growth and otolith growth: a case study of the ornate jobfish *Pristipomoides argyrogrammicus* from the coast of Réunion (SW Indian Ocean). *African Journal of Marine Science*, 39(2), 145-151.
- Mahé K., Delpéch J.-P., Carpentier A., 2007. *Synthèse bibliographique des principales espèces de Manche orientale et du golfe de Gascogne*. Ifremer, Boulogne-sur-Mer, 167 p., <<https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6643/>> (consulté le 05/03/2024).
- Panfili J., Pontual H. de, Troadec H., Wright P.J. (éd.), 2002. *Manual of fish sclerochronology*, Brest, coédition Ifremer-IRD, 464 p.
- Popper A.N., Lu Z., 2000. Structure-function relationships in fish otolith organs. *Fisheries Research*, 46(1-3), 15-25.
- Pontual H. de, Prouzet P., 1987. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) stock discrimination by scale shape analysis. *Aquaculture and Fisheries Management*, 18(3), 227-289.
- Quigley L.A., Caiger P.E., Govindarajan A.F., McMonagle H., Jech J.M., Lavery A.C., Sosik H.M., Llopiz J.K., 2023. Otolith characterization and integrative species identification of adult mesopelagic fishes from the western North Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 10.
- R Core Team 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, <<https://www.R-project.org/>> (consulté le 07/05/2024).
- Radtke R.L., Shafer D.J., 1992. Environmental sensitivity of fish otolith microchemistry. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 43, 935-951.
- Reibisch J., 1899. Ueber die Einzahl bei *Pleuronectes platessa* und die Altersbestimmung dieser Form aus den Otolithen. *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 4, 233-248.
- Schlager S., 2017. Morpho and Rvcg – shape analysis in R: R-Packages for geometric morphometrics, shape analysis and surface manipulations, in Zheng G., Li S., Székely G. (éd.), *Statistical shape and deformation analysis*, Academic Press, 217-256.
- Schulz-Mirbach T., Heß M., Plath M., 2011. Inner ear morphology in the Atlantic molly *Poecilia mexicana* – First detailed microanatomical study of the inner ear of a cyprinodontiform species. *Plos One*, 6(11), e27734.
- Shen L., Farid H., Mcpeek M.A., 2009. Modeling three-dimensional morphological structures using spherical harmonics. *Evolution*, 63(4), 1003-1016.
- Smith M.K., 1992. Regional differences in otolith morphology of the deep slope red snappers *Etelis carbunculus*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(4), 795-804.

- Stock M., Nguyen B., Courtens W., Verstraete H., Stienen E., De Baets B., 2021. Otolith identification using a deep hierarchical classification model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105883.
- Tuset V.M., Imondi R., Aguado G., Otero-Ferrer J.L., Santschi L., Lombarte A.M., Love M., 2015. Otolith patterns of rockfishes from the Northeastern Pacific. *Journal of morphology*, 276(4), 458-469.
- Van der Land M.A., Heessen H.J.L., Rijnsdorp A.D., 1990. *The result of the 1989 egg surveys for cod and plaice*, rapport, CIEM, Ijmuiden, 14 p.
- Volpedo A.V., Tombari A.D., Echeverría D.D., 2008. Eco-morphological patterns of the sagitta of Antarctic fish. *Polar Biology*, 31, 635-640, <<https://doi.org/10.1007/s00300-007-0400-1>> (consulté le 15/04/2024).
- Wright K.J., Higgs D.M., Cato D.H., Leis J.M., 2010. Auditory sensitivity in settlement-stage larvae of coral reef fishes. *Coral Reefs*, 29, 235-243.
- Wright P.J., Panfili J., Morales-Nin B., Geffen A.J., 2002. Types of calcified structures. A. Otoliths, in Panfili J., Pontual H. de, Troadec H., Wright P.J. (éd.), *Manual of Fish Sclerochronology*, Brest, Ifremer-IRD Coédition, 31-57.

Annexe. Paramètres d'acquisition des images pour chaque espèce de poissons

Résolution nominale en micromètres et filtre aluminium utilisés pour chaque espèce de poissons.

Espèce	Résolution nominale en micromètres	Filtre aluminium en millimètres
Anchois commun	10	0,5
Bar commun	13 à 18	0,5
Barbue	10	0,5
Chinchard commun	10 à 15	0,5
Églefin	10 à 23	0,5 et 1
Flet commun	10	0,5
Grondin perlon	10	0,5
Grondin rouge	10	0,5
Hareng commun	10	0,5
Limande commune	10	0,5
Limande-sole	10	0,5
Maquereau commun	10	0,5
Merlan	10 à 24	0,5
Morue commune	10 à 18	1
Plie commune	10	0,5
Rouget barbet de roche	10	0,5
Saint-pierre	10	0,5
Sardine commune	10	0,5
Sole commune	10	0,5
Sprat	10	0,5
Tacaud commun	10 à 12	1
Turbot	10 à 12	0,5 et 1

Coordination éditoriale : Aude Boufflet
Correction : Alice Durand
Mise en page et infographie : Hélène Bonnet
Achevé d'imprimer