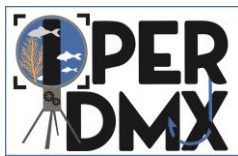


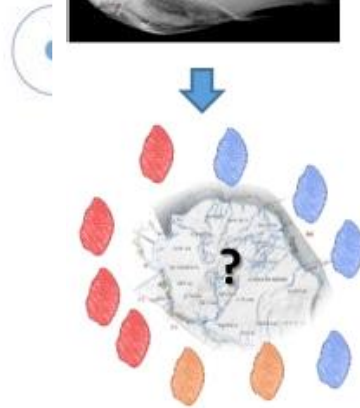
Projet IPERDMX : Etude de la forme des otolithes pour identifier les unités de stock de poissons démersaux autour de l'île de La Réunion.

Rapport final n° 3/8 du volet 1



Indicateurs Populationnels et Ecosystémiques pour une gestion durable des Ressources en poissons DÉMersauX à La Réunion

Volet 1 - « Amélioration des connaissances scientifiques sur les zones fonctionnelles halieutiques et analyse préalable à la désignation d'une zone de conservation halieutique »



FEAMP (mesure 40) Convention n° OSIRIS PFEA400018DM0980001

Référence Ifremer : 18/2216451



Fiche documentaire

<p>Titre du rapport : Projet IPERDMX : Etude de la forme des otolithes pour identifier les unités de stock de poissons démersaux autour de l'île de La Réunion.</p>	
<p>Référence interne : R.RBE/DOI/2022-012</p> <p>Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ</p>	<p>Date de publication Octobre 2022</p> <p>Version : 1.0.0</p> <p>Référence de l'illustration de couverture Ifremer HMMN/ <i>Illustration étude de forme des otolithes autour de l'île de La Réunion</i></p> <p>Langue(s) : Français</p>
<p>Résumé/ Abstract : Dans le cadre de l'action Amélioration des connaissances scientifiques - Volet Identification de Stocks du projet IPERDMX, une étude pour déterminer si La Réunion montre une population ou plusieurs groupes séparés, a été réalisée chez 13 espèces de poissons. L'outil pour déterminer s'il existe une ou plusieurs populations est l'otolithe, pièce calcifiée de l'oreille interne des poissons. Sa forme est le résultat des effets de la génétique de l'individu et de l'environnement qu'il a rencontré au cours de sa vie. Pour cette étude, 2392 otolithes ont été prélevés et analysés. Pour chaque espèce, l'analyse a été réalisée en 2 étapes en regardant premièrement les effets confondants potentiels sur la forme des otolithes que sont la taille du poisson, la symétrie des otolithes droit et gauche, le dimorphisme sexuel et l'effet géographique. Cette première étape permet de comprendre l'importance des différents effets qui influencent la forme de l'otolithe pour les intégrer dans la deuxième étape de façon à ne tester que l'effet géographique sur la forme des otolithes. Lorsque cet effet géographique est significatif lors de la première étape, la deuxième étape consiste à quantifier et comprendre cet effet avec 2 approches utilisées en parallèle que sont la Classification Ascendante Hiérarchique et l'Analyse Discriminante Linéaire. Parmi les 13 espèces testées, seuls les résultats chez 2 espèces montrent 2 sous-ensembles géographiques pouvant laisser à penser à 2 unités de gestion/stocks présentes autour de l'île de La Réunion. Pour les 11 autres espèces, l'île de La Réunion semble former une seule unité de gestion par espèce. Cependant, tous ces résultats mériteront d'être complétés dans le futur via un échantillonnage spatial plus important.</p>	
<p>Mots-clés/ Key words : Otolithes/Otoliths, Identification de stocks/Stock identification, Descripteurs Elliptiques de Fourier/Elliptic Fourier Descriptors, Classification/Classification, Ile de La Réunion/La Réunion Island, IPERDMX</p>	
<p>Comment citer ce document : Mahe Kelig, Gentil Claire, Brisset Blandine, Telliez Solène, Dussuel Antoine, Elleboode Romain, Roos David. 2022. Projet IPERDMX : Etude de la forme des otolithes pour identifier les unités de stock de poissons démersaux autour de l'île de La Réunion. p33. R.RBE/DOI/2022-012. https://doi.org/10.13155/88536.</p>	
<p>Disponibilité des données de la recherche : Ifremer</p>	
<p>DOI : 10.13155/88536</p>	

Commanditaire du rapport : Sans objet	
Nom / référence du contrat : Convention n° OSIRIS PFEA400018DM0980001	
Référence Ifremer : 18/2216451	
<input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (R R.RBE/DOI/2022-012)	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : IPERDMX (P107-0014), FEAMP (mesure 40)	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
MAHÉ Kélig kelig.mahe@ifremer.fr	Ifremer / RBE / HMMN
GENTIL Claire claire.gentil@ifremer.fr	Ifremer / RBE / DOI
BRISSET Blandine b.brisset@ifremer.fr	Ifremer / RBE / DOI
TELLIEZ Solène solene.telliez@ifremer.fr	Ifremer / RBE / HMMN
DUSSUEL Antoine antoine.dussuel@ifremer.fr	Ifremer / RBE / HMMN
ELLEBOODE Romain r.elleboode@ifremer.fr	Ifremer / RBE / HMMN
ROOS David david.roos@ifremer.fr	Ifremer / RBE / DOI
Encadrement(s) : ROOS David, MAHÉ Kélig	
Destinataires :	
<ul style="list-style-type: none"> • Partenaires • Parties intéressées • Communauté scientifique 	
Validé par : DUVAL Magali, CERUTTI Florencia (Ifremer / RBE / DOI)	

Table des matières

1	Introduction	7
2	Utilisation de la forme des otolithes comme outil d'identification des stocks de poissons. 8	
3	Revue des méthodes d'extraction de l'information contenue dans la forme externe des otolithes et de leur précision	10
4	Matériel et méthodes	12
4.1	Extraction des données de forme des otolithes.....	12
1.1	Analyses statistiques	13
1.2	Traitement des échantillons.....	14
5	Résultats	17
5.1	Effets potentiels sur la forme des otolithes	17
5.2	Identification des stocks	17
5.2.1	Aphareus rutilans - ARQ	19
5.2.1.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	19
5.2.1.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	19
5.2.2	Epinephelus fasciatus - EEA.....	20
5.2.2.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	20
5.2.2.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	20
5.2.3	Etelis carbunculus - ETA.....	21
5.2.3.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	21
5.2.3.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	21
5.2.4	Lethrinus rubrioperculatus - LHB.....	22
5.2.4.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	22
5.2.4.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	22
5.2.5	Lutjanus kasmira - LVK.....	23
5.2.5.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	23
5.2.5.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	23
5.2.6	Lutjanus notatus - QKU.....	24
5.2.6.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	24
5.2.6.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	24
5.2.7	Mulloidichthys pfluegeri - YYP	25
5.2.7.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	25
5.2.7.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé	25
5.2.8	Pristipomoides filamentosus - PFM.....	26
5.2.8.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé.....	26

5.2.8.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé.....	26
5.2.9	Variola albimarginata - VRA	28
5.2.9.1	Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé	28
5.2.9.2	Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé.....	28
5.3	Synthèses des résultats.....	29
6	Références bibliographiques	31

1 Introduction

Au début des années 2000, la pêche artisanale réunionnaise qui ciblait traditionnellement les espèces récifales et démersales peu profondes (0-200 m), a évolué progressivement vers l'exploitation des stocks de poissons plus profonds (au-delà de 200 m), assurant ainsi des revenus complémentaires sur des ressources à haute valeur commerciale (Roos *et al.* 2001; Fleury *et al.* 2012). Cette exploitation a été rendue possible grâce au progrès des technologies des pêches notamment avec l'arrivée sur le marché de GPS, de sondeurs ainsi que des moulinets et autres vire-lignes électriques plus performants et accessibles financièrement. Les espèces profondes (200-700 m) ciblées pour leurs valeurs commerciales font ainsi l'objet d'une exploitation soutenue depuis les années 2000, en complément des espèces récifales et pélagiques. Le contexte biogéographique particulier de La Réunion (isolement, forte déclivité, absence de plateau insulaire...) et les caractéristiques bioécologiques singulières des espèces exploitées augmentent la vulnérabilité des ressources démersales aussi bien à la pêche, qu'aux pressions anthropiques sur les écosystèmes marins et aux changements globaux.

Dans ce contexte, l'Ifremer mène depuis plusieurs années des actions de recherche visant d'une part, à évaluer et à suivre divers indicateurs populationnels (abondance, taille et âge) et écosystémiques (biodiversité, peuplement, habitat, usages...) et d'autre part à collecter des paramètres biologiques sur les espèces pour mieux connaître leur reproduction, leur croissance, et leurs relations trophiques.

Initié en 2019, le projet IPERDMX s'inscrit dans la continuité des précédents projets ANCRE DMX2 (2014-2015 ; Roos *et al.* 2015) et DMX1 (2011-2012 ; Fleury *et al.* 2012) orientés sur la connaissance des espèces démersales profonde. Il contribue plus spécifiquement aux connaissances sur les peuplements et les habitats exploités entre 1 et 500 m de profondeur, afin de disposer d'indicateurs halieutiques, biologiques et écosystémiques à la fois sur les espèces récifales et profondes de l'île. Les connaissances acquises dans ce projet visent à préciser l'état des peuplements exploités dans les différents habitats à l'échelle de la pêcherie, et ainsi contribuer à la définition des zones fonctionnelles halieutiques et à la formalisation de mesures de gestion des stocks de poissons démersaux par les gestionnaires des pêches. La présente étude a pour objectif d'identifier la structuration spatiale de stocks de plusieurs espèces de poissons autour de La Réunion, à partir de l'analyse de forme des otolithes. Elle constitue le volet « Identification de stock à partir des otolithes » de l'action « Amélioration des connaissances scientifiques » du projet IPERDMX.

2 Utilisation de la forme des otolithes comme outil d'identification des stocks de poissons

Dans le cadre de la gestion des pêches, il est important d'étudier et de délimiter dans le temps et spatialement chaque unité de stock halieutique¹ (Figure 1).

Concept de stock et population

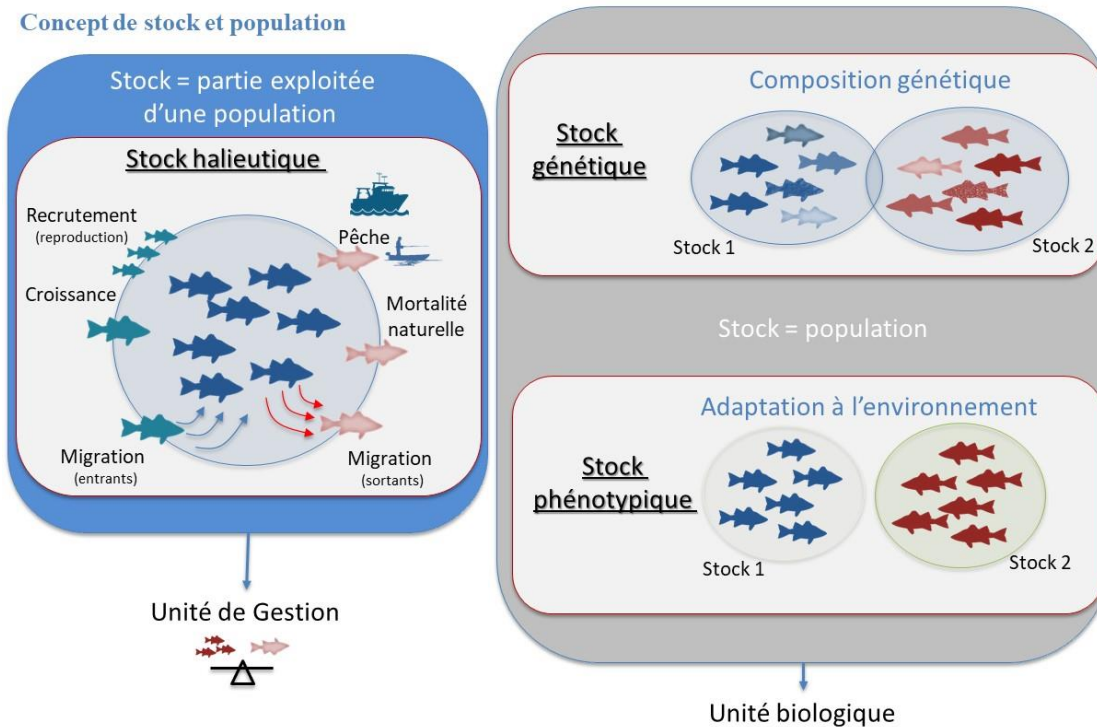


Figure 1: Schéma montrant les différences entre les définitions utilisées pour définir un stock (In Mahé 2019).

Il y a de nombreuses méthodes utilisées pour décrire les stocks de poissons, à commencer par les marqueurs génétiques, mais aussi d'autres marqueurs naturels comme les parasites, la croissance et les acides gras contenus dans les tissus. De plus, d'autres approches peuvent aussi être utilisées comme les traits d'histoire de vie, les caractéristiques méristiques² ou l'analyse de forme externe du poisson. Cependant, le suivi réalisé chaque année par un groupe d'experts (Stock Identification Methods Working Group³ 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, avec l'analyse

¹ Stock : ce terme est purement opérationnel et il est défini comme la partie d'une population exposée à l'activité humaine à travers la pêche et donc qui possède des paramètres intrinsèques comme la croissance et les taux de survie, de mortalité et de recrutement. A opposer à une population qui pourrait reposer sur des concepts écologiques et qui pourrait être constituée par des métapopulations ayant des caractéristiques différentes (Cadrin *et al.*, 2005; Mahé, 2019). Les paramètres extrinsèques (immigration et émigration) pour un stock sont soit ignorés soit fixés arbitrairement.

² Caractéristiques méristiques : ce sont les données numériques concernant la morphologie et la biométrie physique d'un animal. Les caractéristiques méristiques sont l'ensemble des variations continues quantitatives d'un caractère normal, de part et d'autre de la moyenne.

³ SIMWG : <https://www.ices.dk/community/groups/Pages/SIMWG.aspx>

génétique, pour définir la répartition des stocks au sein de chaque pêcherie. Ceci peut s'expliquer par les avancées récentes en termes d'analyses d'images et de traitement des données, en particulier avec le développement et le partage d'outils et de méthodes statistiques performants. En comparaison avec l'approche des traceurs génétiques, l'analyse de forme des otolithes montrent des résultats généralement comparables mais moins coûteux.

3 Revue des méthodes d'extraction de l'information contenue dans la forme externe des otolithes et de leur précision

Différentes approches sont utilisées pour décrire la forme externe des otolithes. Il y a 2 types d'informations ainsi extraites : les données univariées qui regroupent des mesures linéaires ou des indices de forme et les données multivariées qui décrivent l'intégralité de la forme selon différentes transformations (Figure 2).

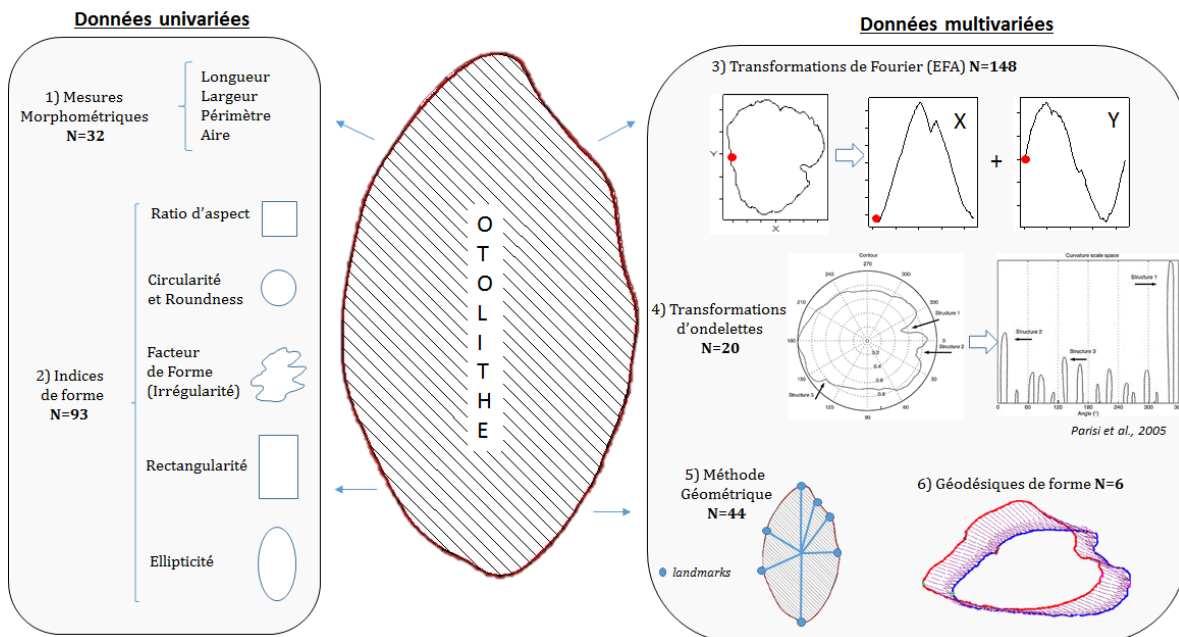


Figure 2: Schéma des différents types de données uni et multivariées extraites pour analyser la forme externe de l'otolithe (N étant le nombre de publications parues de 1985 à 2018) (In Mahé, 2019).

- **L'analyse des elliptiques de Fourier (EFA)** est la méthode la plus utilisée pour décrire la forme externe des otolithes avec 148 études publiées. Cette technique décrit le contour de manière quantifiable. L'EFA décrit la forme projetée dans un repère orthonormé à 2 dimensions à travers l'utilisation de composantes spécifiques appelées Harmoniques. Celles-ci sont formées chacune de 4 coefficients ou Descripteurs des ellipses de Fourier (EFDs) résultant de la linéarisation des coordonnées x et y de chaque point de la forme externe. La précision de la description de l'otolithe est directement proportionnelle au nombre d'harmoniques utilisées (Kuhl and Giardina 1982). Les EFDs qui font appel à une fonction périodique et qui s'expriment en une somme de termes d'une série trigonométrique de sinus et cosinus sont les plus utilisés.
- Les **indices de forme** sont la deuxième méthode la plus utilisée pour décrire la forme des otolithes. Ils sont basés sur des formules mathématiques à partir des principales mesures morphométriques (longueur antéro-postérieure, largeur dorso-ventrale, périmètre et aire de l'otolithe) et sont utilisés souvent couplés. Ces indices représentent les patrons de croissance de l'otolithe dans un plan à 2 dimensions (Tuset *et al.* 2003). Ils caractérisent la forme de l'otolithe par rapport à une forme géométrique comme la Circularité et la Roundness pour le cercle, la Rectangularité pour le rectangle, l'Ellipticité pour l'ellipse, le ratio d'aspect pour le carré. Enfin, le facteur de forme traduit, quant à lui, le niveau d'irrégularité de l'otolithe. Cependant, les indices de forme au même titre que les mesures

morphométriques sont moins robustes que les données multivariées et donc sont utilisées en combinaison avec ces dernières pour leur facilité d'interprétation.

- La méthode **Géométrique** ou **Géomorphométrique** est une autre méthode faisant appel à des données multivariées et qui se base sur des points homologues ou points de référence appelés aussi landmarks. La technique consiste à comparer les coordonnées de ces landmarks après avoir redimensionné les otolithes à la même échelle et les positionner dans le même sens à l'aide d'outils de rotation et de translation. Ainsi, tous ces otolithes sont superposés de façon à mesurer et minimiser les distances procrustes. Cependant, il est difficile de générer un nombre de landmarks suffisant sur le contour de l'otolithe. Ainsi, les études utilisant ce procédé font souvent référence à des semi-landmarks qui sont obtenus par une découpe géométrique de l'otolithe et non pas par des points homologues directement sur le contour de l'otolithe.
- Les **transformations d'ondelettes** (Wavelet transform) constituent aussi une autre méthode d'analyse multivariée, développée comme alternative à l'EFA. Cette méthode utilise une analyse à multi-échelles de points locaux.

Dans ce projet, les elliptiques de Fourier (EFA) ont été utilisés.

4 Matériel et méthodes

4.1 Extraction des données de forme des otolithes

Les otolithes sagittaux (otolithes gauche et droit) ont été extraits de la cavité crânienne puis nettoyés à l'aide d'une éponge humide. Pour minimiser les erreurs de distorsion dans le processus de normalisation pendant l'analyse d'image, les images de l'ensemble des otolithes sagittaux gauches et droits ont été scannées sous lumière réfléchiée et stockées à haute résolution (3200 dpi) (Figure 3, étape 1). Le scanner est utilisé pour avoir une acquisition standardisée d'images calibrées (Elleboode and Mahé, 2016). Au cours de ce processus, un grossissement unique fixe est utilisé pour assurer une résolution aussi élevée que possible.

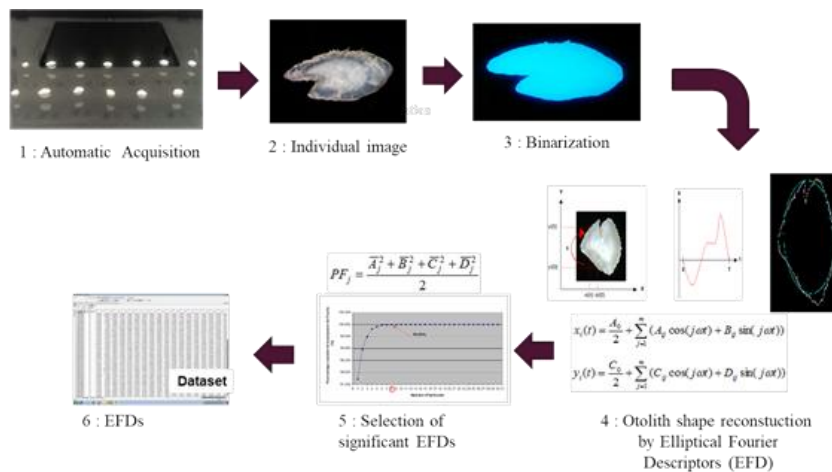


Figure 3 : Schéma des différentes étapes pour extraire les données de forme des otolithes.

Après l'étape d'acquisition automatique, chaque image d'otolithe est individualisée puis une procédure de normalisation est appliquée à ces images brutes afin qu'elles soient invariantes par rapport à la translation, la rotation et l'échelle, de sorte que la forme normalisée soit le résultat de l'histoire du poisson, indépendamment des paramètres d'acquisition. Afin de comparer les formes d'otolithes gauche et droit, des images miroir d'otolithes gauches ont été utilisées. Enfin, avant d'extraire automatiquement les informations de contour, toutes les images sont binarisées (Figure 3, étape 3). Les données de forme sont extraites avec les 99 premières harmoniques elliptiques de Fourier (H) qui sont normalisées par rapport à la première harmonique.

Pour déterminer le nombre d'harmoniques nécessaires à la reconstruction du contour de l'otolithe, la puissance de Fourier cumulée (F) sera calculée pour chaque otolithe individuel comme mesure de la précision de la reconstruction du contour obtenue avec n_k harmoniques (c'est-à-dire la proportion de la variance des coordonnées du contour expliqué par les n_k harmoniques) :

$$F_{(n_k)} = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2 + D_i^2}{2} \quad (1)$$

Où A_i , B_i , C_i et D_i sont les coefficients de l'harmonique H_i . $F(n_k)$ et n_k ont été calculés pour chaque otolithe individuel k afin de garantir que chaque otolithe individuel de l'échantillon est reconstruit avec une précision de 99,99% (Lestrel, 2008). Le nombre maximum d'harmoniques $n = \max(n_k)$ sur l'ensemble des otolithes d'une espèce est ensuite utilisé pour reconstruire chaque otolithe individuel (Figure 3, Etape 5). Ainsi, on obtient la base de données décrivant la forme externe des otolithes (EFD) (Figure 3, Etape 6).

1.1 Analyses statistiques

Pour tester les descripteurs elliptiques de Fourier (EFD) du contour des otolithes, nous appliquons d'abord l'Analyse en Composantes Principales (ACP) à la matrice des EFD (Rohlf and Archie, 1984) et un sous-ensemble des composantes principales (CP) résultantes sera ensuite sélectionné comme descripteurs de la forme des otolithes selon la fonction de Brokenstick (Figure 4) (Legendre and Legendre, 1998). Cette procédure nous permet de diminuer le nombre de variables utilisées pour décrire la variabilité de la forme des otolithes tout en s'assurant que les principales sources de variation de la forme sont conservées, ainsi que d'éviter la colinéarité entre les descripteurs de forme (Rohlf and Archie, 1984).

La matrice des PCs sélectionnés, avec les PCs de l'ACP en colonnes et les otolithes en lignes, est appelée matrice de forme S ci-après. La matrice de forme (S) est analysée à l'aide d'une analyse de redondance (RDA) :

$$S \sim SI + Area + Length + i \quad (2)$$

Où les variations de la forme des otolithes dues au côté (SI), au lieu d'échantillonnage ($Area$) et à la taille du poisson ($Length$) sont représentées par des effets fixes. Un intercepte aléatoire (i) est utilisé pour tenir compte de la variabilité due aux individus (ou à certaines de leurs caractéristiques, comme la longueur totale par exemple) et de l'autocorrélation entre la forme des otolithes gauche et droit au sein des individus. Le modèle est ajusté avec une variance différente pour chaque PC de la matrice de forme S . La normalité des résidus et des effets aléatoires ainsi que l'homoscédasticité des résidus ont été évaluées par inspection visuelle des graphiques de diagnostic. La signification des variables explicatives à 5% sera testée par des tests de rapport de vraisemblance entre modèles emboîtés tout en respectant la marginalité des effets (tests de type 2 ; (Fox and Weisberg, 2010) qui sont supposés suivre une distribution χ^2 sous l'hypothèse nulle. Pour visualiser les différences de forme des otolithes, une forme moyenne des otolithes peut être reconstruite pour chaque groupe d'individus sur la base des EFD.

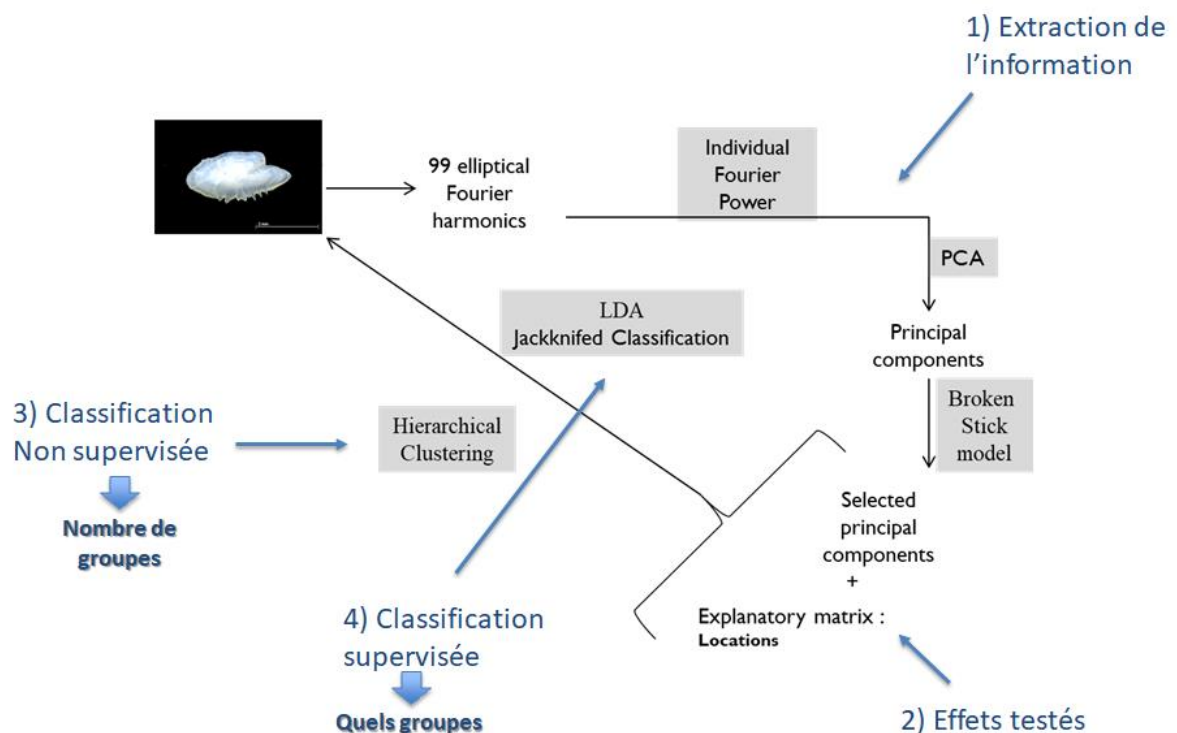


Figure 4 : Schéma des différentes étapes des analyses statistiques appliquées aux otolithes.

Une dernière étape est appliquée si et seulement si l'effet géographique est significatif dans l'analyse de redondance (RDA). Pour discriminer les poissons au sein d'une espèce de tous les sites échantillonnés sur la base de la forme des otolithes, à partir des PC, une analyse discriminante linéaire (LDA) avec prédiction jackknifed est appliquée aux résidus RS d'une analyse de redondance (RDA) (Figure 4). L'utilisation de la matrice résiduelle RS au lieu de la matrice de forme S a pour but d'éviter les effets de confusion potentiels dus à la variation de la forme des otolithes entre les sites d'échantillonnage, liée aux variations de taille des individus provenant de la sélectivité de taille différente de la procédure/du matériel de capture dans les différents sites d'échantillonnage (Rencher and Christensen, 2012). Pour évaluer les fonctions discriminantes obtenues, le pourcentage de classification correcte des individus dans les zones d'échantillonnage est calculé à l'aide de la validation croisée jackknife (Klecka, 1980) et comparé à ceux obtenus à partir de la distribution aléatoire. De plus, la performance des analyses discriminantes est évaluée à l'aide du λ de Wilks. Cette valeur est le rapport entre la variance intra-groupe et la variance totale, et fournit un moyen objectif de calculer le pourcentage de concordance entre l'appartenance réelle et prédite des groupes. Les valeurs du λ de Wilks vont de 0 à 1 et plus elles sont proches de 0, meilleur est le pouvoir de discrimination entre les groupes. Pour compléter la procédure d'identification des stocks, une analyse en cluster⁴ selon l'algorithme hiérarchique de Ward basé sur les distances euclidiennes au carré sera effectuée sur la matrice des formes résiduelles RS, afin de regrouper les individus ayant des formes d'otolithes similaires.

Les analyses statistiques seront effectuées à l'aide des paquets suivants dans l'environnement statistique R (R Core Team, 2020): "nlme" (Pinheiro *et al.*, 2016), "Effects" (Fox, 2003), "Vegan" (Oksanen *et al.* 2013), "SP" (Bivand *et al.* 2013), "ggplot2" (Wickham 2016), "RGEOS" (Bivand *et al.* 2013), "MASS" (Venables and Ripley 2002) et "RRCOV" (Todorov and Filzmoser 2009).

1.2 Traitement des échantillons

Pour discriminer les stocks des principales espèces de poissons autour de l'île de La Réunion, un zonage a été utilisé (Figure 5) montrant un découpage en 10 zones géographiques définies par leurs différences d'habitats.

⁴ Cluster : groupe d'individus présentant des caractéristiques similaires permettant de se différencier des autres groupes/clusters.

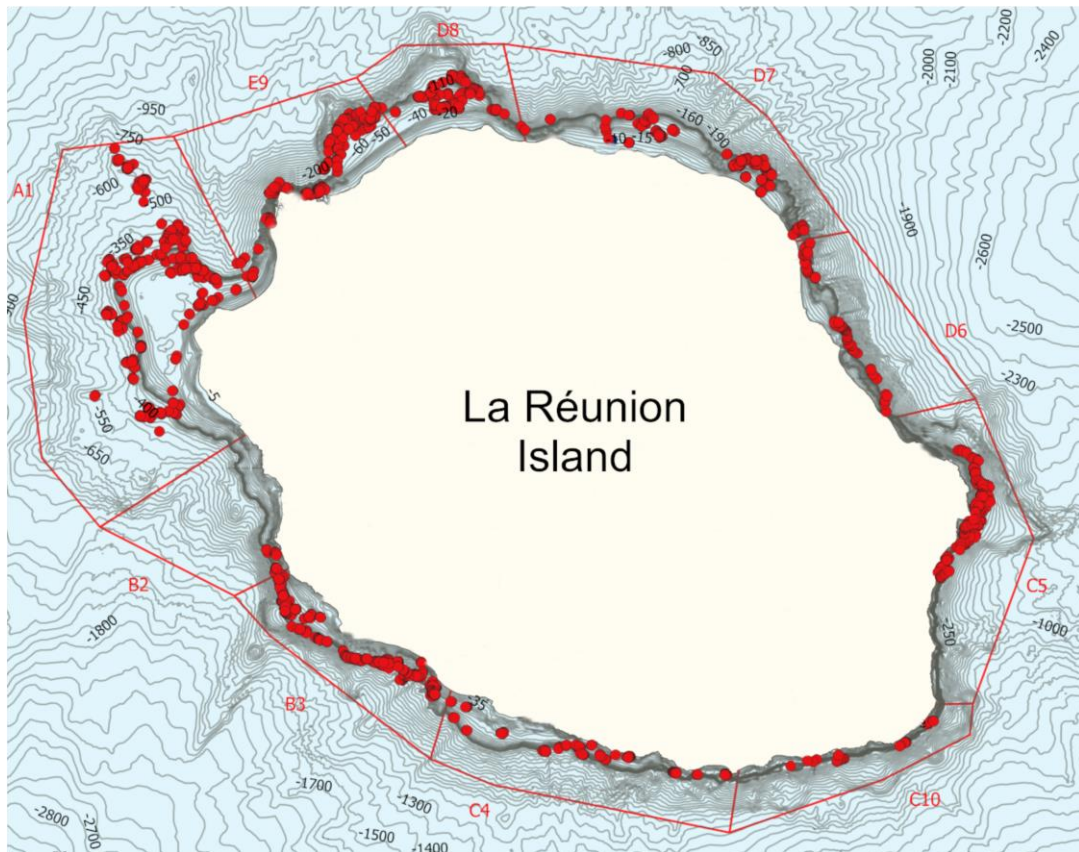


Figure 5 : Cartographie de l'île de La Réunion avec le découpage en 10 zones d'échantillonnage avec chaque station de prélèvement représentée par un point rouge.

Les otolithes droits (n=1181) et gauches (n=1211) ont été prélevés chez 13 espèces de poissons (Tableau 1). Les 2 otolithes ont été prélevés pour regarder s'il existe des différences entre la forme des otolithes droits et gauches pour un même groupe d'individus (et si oui effet à prendre en compte) et augmenter le pouvoir de discrimination des groupes. Les principales espèces commerciales ont été ciblées et en fonction de la disponibilité des échantillons, finalement les otolithes de 13 espèces ont pu être analysés. Les nombres d'otolithes droits et gauches ne sont pas équivalents car lors du prélèvement ou du transport, quelques otolithes ont été cassés.

Tableau 1 : Nombre d'otolithes droits et gauches par espèce analysée.

Nom scientifique	Code FAO	Droit	Gauche
<i>Aphareus rutilans</i>	ARQ	43	52
<i>Aprion virescens</i>	AVR	11	20
<i>Cephalopholis aurantia</i>	CFZ	102	98
<i>Epinephelus fasciatus</i>	EEA	136	141
<i>Etelis carbunculus</i>	ETA	85	90
<i>Lethrinus rubrioperculatus</i>	LHB	41	33
<i>Lutjanus kasmira</i>	LVK	274	277
<i>Lutjanus notatus</i>	QKU	152	164
<i>Mulloidichthys pfluegeri</i>	YYP	47	46
<i>Pristipomoides argyrogrammicus</i>	LRY	90	89
<i>Pristipomoides filamentosus</i>	PFM	109	113
<i>Variola albimarginata</i>	VRA	68	67
<i>Variola louti</i>	VRL	23	21
Total		1181	1211

Ainsi, 2392 otolithes de 13 espèces ont été analysés lors de la discrimination de stocks. De grandes disparités de tailles d'échantillons existent parmi les espèces expliquées essentiellement par la différence de disponibilité des poissons lors des échantillonnages parmi les zones échantillonnées. Ainsi, 544 otolithes ont été analysés pour *Lutjanus kasmira* et à l'inverse, seuls 31 otolithes ont été échantillonnés pour *Aprion virescens* (Tableau 2). Afin de tester l'effet géographique, les zones avec des effectifs trop faibles (inférieurs ou égaux à 5) n'ont pas été retenues dans les analyses (Tableau 2).

Tableau 2 : Nombre d'otolithes (droits et gauches) par zone géographique pour chaque espèce analysée. Les cases en orange montrent des effectifs inférieurs à 5, non considérés pour tester l'effet géographique.

Nom scientifique	Code FAO	A1	B2	B3	C10	C4	C5	D6	D7	D8	E9	Total
<i>Aphareus rutilans</i>	ARQ	10		46	1		6		2	21	9	95
<i>Aprion virescens</i>	AVR	16		6	1	2		1	3	2		31
<i>Cephalopholis aurantia</i>	CFZ	6	8	107	2	2	12	2	17	28	16	200
<i>Epinephelus fasciatus</i>	EEA	27	5	87	39	6	5	3	97	4	4	277
<i>Etelis carbunculus</i>	ETA	56	1	59	1	3	6		3	8	38	175
<i>Lethrinus rubrioperculatus</i>	LHB	44	1	14	11	2			2			74
<i>Lutjanus kasmira</i>	LVK	105	22	103	2	13	48	16	110	128	4	551
<i>Lutjanus notatus</i>	QKU	23	3	100		11	40	29	79	22	9	316
<i>Mulloidichthys pfluegeri</i>	YYP	50		14	11	6	7			4	1	93
<i>Pristipomoides argyrogrammicus</i>	LRY	57		65	8	2	3		12	2	30	179
<i>Pristipomoides filamentosus</i>	PFM	23	8	96	11	13	9	8	9	16	29	222
<i>Variola albimarginata</i>	VRA	63	4	7	39	6	4			12		135
<i>Variola louti</i>	VRL	26	7	5	4			2				44
Total		506	59	709	130	66	140	61	334	247	140	2392

5 Résultats

5.1 Effets potentiels sur la forme des otolithes

La première étape des analyses statistiques concerne la réduction du nombre de dimensions sans perte d'informations qui se fait en 2 étapes (Tableau 3) :

1. Le nombre d'harmoniques nécessaire à la reconstruction du contour de l'otolithe appelée Puissance de Fourier cumulée (nh) : ici de 21 pour *Pristipomoides argyrogrammicus* (la forme la plus simple entre les différentes espèces) à 44 pour *Pristipomoides filamentosus* (la forme la plus découpée entre les différentes espèces)
2. Une analyse ACP qui permet de ne retenir que le nombre de composantes principales significatives qui varie entre 3 et 9.

Après avoir mis en forme les données, la seconde étape d'analyses permet de tester les différents effets potentiels qui pourraient influencer la forme de l'otolithe. Le premier effet est la taille du poisson qui est toujours significatif à l'exception d'une espèce. Cet effet est pris en compte dans la suite des analyses. Les tests de l'effet côté, qui tient compte du numéro d'individus, a montré qu'il y a une différence de forme entre les otolithes droits et gauches pour les mêmes individus, chez 4 espèces. Un autre effet testé est le sexe des individus. Celui-ci est significatif chez 4 espèces également. Enfin, l'effet « Area » qui traduit l'effet géographique est significatif chez 9 espèces (*Aphareus rutilans*, *Epinephelus fasciatus*, *Etelis carbunculus*, *Lethrinus rubrioperculatus*, *Lutjanus kasmira*, *Lutjanus notatus*, *Mulloidichthys pfluegeri*, *Pristipomoides filamentosus*, *Variola albimarginata*). Ainsi ces espèces montrent qu'il y a une différence de forme d'otolithes entre les zones géographiques testées. L'étape suivante consiste donc à regarder chez ces espèces comment se traduit cet effet géographique. Pour ces espèces, lorsque le sexe ou le côté étaient eux aussi significatifs, les interactions ont été testées pour savoir si ces facteurs devront être pris en compte lors de l'analyse de l'effet géographique. Si les interactions avec le sexe ne sont pas significatives, celles avec le côté sont significatives pour 2 espèces (*Epinephelus fasciatus* et *Etelis carbunculus*). Ainsi, pour ces 2 espèces, cette interaction significative a été intégrée dans les analyses par la suite pour comprendre l'effet géographique.

Pour 4 espèces (*Aprion virescens*, *Cephalopholis aurantia*, *Pristipomoides argyrogrammicus* et *Variola louti*), il n'y a pas d'effet géographique significatif observé dans les données testées ce qui traduirait que pour chacune de ces espèces, l'île de La Réunion montrerait qu'une seule unité de gestion/stock.

5.2 Identification des stocks

Pour les 9 espèces montrant un effet géographique significatif (*Aphareus rutilans*, *Epinephelus fasciatus*, *Etelis carbunculus*, *Lethrinus rubrioperculatus*, *Lutjanus kasmira*, *Lutjanus notatus*, *Mulloidichthys pfluegeri*, *Pristipomoides filamentosus*, *Variola albimarginata*), seules les zones avec des effectifs supérieurs ou égales à 5 ont été retenues (Tableau 4).

Tableau 3 : Effets potentiels contrôlant la forme de l'otolithe (case en bleu lorsque l'effet est significatif $P < 0.05$) pour chaque espèce analysée (N : nombre d'otolithes traités ; n_h : puissance de Fourier ; PCs : composantes principales significatives).

Nom scientifique	Code FAO	N	n_h	PCs	Effets potentiels sur forme					
					Taille	Côté	Sexe	Area	Area/Côté	Area/Se xe
<i>Aphareus rutilans</i>	ARQ	95	45	7	0,001	0,095	0,753	0,001		
<i>Aprion virescens</i>	AVR	31	36	3	0,018	0,21	0,119	0,637		
<i>Cephalopholis aurantia</i>	CFZ	200	31	6	0,001	0,001	0,019	0,113		
<i>Epinephelus fasciatus</i>	EEA	277	37	6	0,001	0,001	0,191	0,001	0,001	
<i>Etelis carbunculus</i>	ETA	175	29	4	0,001	0,041	0,195	0,001	0,001	
<i>Lethrinus rubrioperculatus</i>	LHB	74	33	4	0,001	0,056	0,34	0,001		
<i>Lutjanus kasmira</i>	LVK	551	29	4	0,001	0,071	0,182	0,001		
<i>Lutjanus notatus</i>	QKU	316	33	7	0,001	0,082	0,005	0,001		0,111
<i>Mulloidichthys pfluegeri</i>	YYP	93	24	4	0,001	0,098	0,003	0,001		0,058
<i>Pristipomoides argyrogrammicus</i>	LRY	179	21	4	0,234	0,078	0,0108	0,25		
<i>Pristipomoides filamentosus</i>	PFM	222	44	9	0,001	0,741	0,567	0,013		
<i>Variola albimarginata</i>	VRA	135	36	6	0,001	0,306	0,616	0,002		
<i>Variola louti</i>	VRL	44	27	3	0,001	0,845	0,933	0,081		

Tableau 4 : Nombre d'otolithes (droits et gauches) par zone géographique pour chaque espèce analysée dont l'effet géographique est significatif sur la forme de l'otolithe.

Nom scientifique	Code FAO	A1	B2	B3	C10	C4	C5	D6	D7	D8	E9	Total
<i>Aphareus rutilans</i>	ARQ	10		46			6			21	9	92
<i>Epinephelus fasciatus</i>	EEA	27		87	39	6			97			256
<i>Etelis carbunculus</i>	ETA	56		59			6			8	38	167
<i>Lethrinus rubrioperculatus</i>	LHB	44		14	11							69
<i>Lutjanus kasmira</i>	LVK	105	22	103		13	48	16	110	128		545
<i>Lutjanus notatus</i>	QKU	23		100		11	40	29	79	22	9	313
<i>Mulloidichthys pfluegeri</i>	YYP	50		14	11	6	7					88
<i>Pristipomoides filamentosus</i>	PFM	23	8	96	11	13	9	8	9	16	29	222
<i>Variola albimarginata</i>	VRA	63		7	39	6				12		127
Total		401	30	526	111	55	116	53	295	207	85	1879

5.2.1 Aphereus rutilans - ARQ



5.2.1.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 6; Tableau 5).

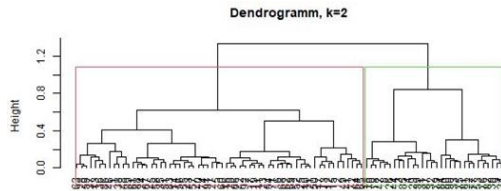


Figure 6 : Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 5 : Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	7	3
B3	39	7
C5	4	2
D8	5	16
E9	7	2

5.2.1.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 48.91% (Lambda de Wilks = 0.3953). Plusieurs hypothèses ont été testées et l'optimum de bonne classification pour 2 zones distinctes est de 80% avec la zone D8 qui se sépare des 4 autres zones testées en particulier une zone limitrophe E9 (Tableau 6 et Tableau 6).

Tableau 6 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area				
		A1	B3	C5	D8	E9
Actual area	A1	1	2	3	2	2
	B3	4	27	4	5	6
	C5	1	1	3	1	0
	D8	1	5	3	10	2
	E9	1	1	1	2	4

Tableau 7: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	D8	80,04
	A1, B3, C5, E9	
2	D8, E9	70,06
	A1, B3, C5	
3	D8, E9, A1	71,74
	B3, C5	
4	D8, E9, C5	70,06
	A1, B3	

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.2 Epinephelus fasciatus - EEA

5.2.2.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé



L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 7 ; Tableau 8).

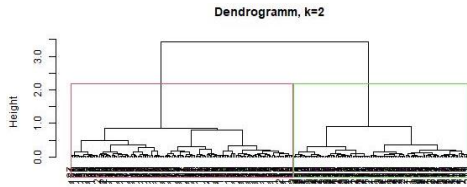


Figure 7: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 8 : Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	12	15
B3	35	52
C10	5	34
C4	6	0
D7	85	12

5.2.2.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 47.26% (Lambda de Wilks = 0.4727). Plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes est de 77.8% avec la zone C5 qui se sépare des 4 autres zones testées (Tableau 9 ; Tableau 10).

Tableau 9 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area				
		A1	B3	C10	C4	D7
Actual area	A1	3	4	9	3	8
	B3	6	35	20	5	21
	C10	5	10	14	8	2
	C4	1	0	0	4	1
	D7	9	11	5	7	65

Tableau 10: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	A1, E9	68,26
	B3, C5, D8	
2	A1, B3, E9	64,07
	C5, D8	
3	A1, D8, E9	69,46
	B3, C5	
4	A1, B3, D8, E9	77,84
	C5	

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.3 Etelis carbunculus - ETA



5.2.3.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 8 ; Tableau 11).

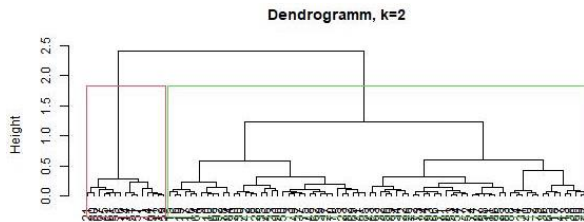


Figure 8: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 11: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	25	31
B3	40	19
C5	1	5
D8	4	4
E9	14	24

5.2.3.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 37.13% (Lambda de Wilks = 0.6331). Plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes est de 85.51% deux zones que sont de B3 à E9 et de C5 à D8 (Tableau 12 ; Tableau 13).

Tableau 12 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area				
		A1	B3	C5	D8	E9
Actual area	A1	23	13	5	6	9
	B3	10	26	8	9	6
	C5	1	1	3	1	0
	D8	3	2	1	0	2
	E9	14	5	3	6	10

Tableau 13: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	A1,E9	84,05
	B3,C5, D8	
2	A1, E9 ,B3	85,51
	C5, D8	
3	A1,E9,D8	73,91
	B3,C5	

Pour cette espèce, deux unités de gestion/stocks peuvent être observées autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.4 Lethrinus rubrioperculatus - LHB



5.2.4.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 clusters (Figure 9 ; Tableau 14).

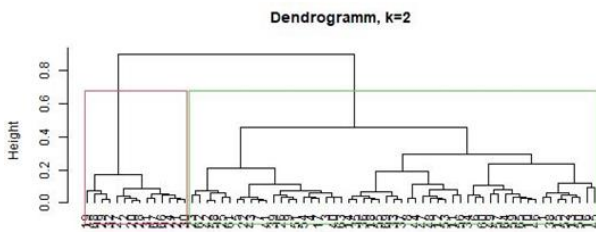


Figure 9: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 14: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Cluster 1	Cluster 2
A1	30	14
B3	14	0
C10	11	0

5.2.4.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 75.36% (Lambda de Wilk = 0.2810). Plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes est de 85.51% lorsque C10 est seule et de 84.05% lorsque A1 est seule ce qui montre que ces 2 zones se distinguent bien l'une et l'autre. Cependant, n'ayant que 3 zones à tester, il est difficile de connaître la répartition des 2 sous-populations (Tableau 15 ; Tableau 16).

Tableau 15 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted		
		A1	B3	C10
Actual area	A1	34	9	1
	B3	2	8	4
	C10	0	1	10

Tableau 16: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	A1	84,05
	B3, C10	
2	A1, B3	85,51
	C10	
3	B3	73,91
	A1, C10	

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.5 Lutjanus kasmira - LVK



5.2.5.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 10 ; Tableau 17).

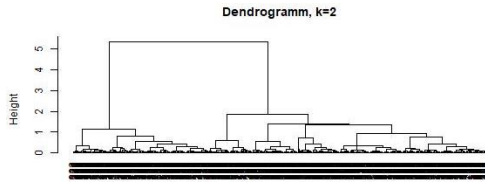


Figure 10: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 17: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	75	30
B2	17	5
B3	8	95
C4	3	10
C5	9	39
D6	13	3
D7	27	83
D8	26	102

5.2.5.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 28.2% (Lambda de Wilks = 0.577). Plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes montrent est de 80% mais les zones regroupées ne forment pas 2 zones séparées géographiquement. Ainsi, il n'est pas possible de diviser géographiquement l'île de La Réunion pour cette espèce (Tableau 18 ; Tableau 19).

Tableau 18 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Bleu = données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area							
		A1	B2	B3	C4	C5	D6	D7	D8
Actual area	A1	25	27	14	5	2	16	3	13
	B2	3	14	0	0	0	2	0	3
	B3	3	3	33	17	16	1	16	14
	C4	0	0	1	5	2	1	1	3
	C5	6	0	5	9	18	0	3	7
	D6	3	4	0	1	0	6	0	2
	D7	8	6	26	13	13	12	14	18
	D8	12	10	24	20	13	3	7	39

Tableau 19: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	A1,B2,D6	80
	B3,C4,C5,D7,D8	
2	B3,C4,C5	65,7
	A1,B2,D6,D7,D8	
3	A1,B2,B3,C4	57
	C5,D6,D7,D8	

Pour cette espèce, deux groupes peuvent être observés autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX. Cependant, les 2 groupes ne représentant des zones géographiques continues le long des côtes de La Réunion, cela laisse penser qu'une seule unité de gestion/stock serait présente à la Réunion.

5.2.6 Lutjanus notatus - QKU



5.2.6.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 11 ; Tableau 20).

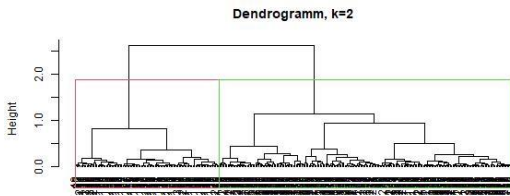


Figure 11: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 20: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	12	11
B3	11	89
C4	7	4
C5	16	24
D6	21	8
D7	30	49
D8	4	18
E9	2	7

5.2.6.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 23.0% (Lambda de Wilks = 0.5902). Plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes montrent est de 69% avec d'une part la zone de B3 à D8 et d'autre part la zone de C4 à D7 (Tableau 21 ; Tableau 22).

Tableau 21 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Bleu = montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area							
		A1	B2	B3	C4	C5	D6	D7	D8
Actual area	A1	25	27	14	5	2	16	3	13
	B2	3	14	0	0	0	2	0	3
	B3	3	3	33	17	16	1	16	14
	C4	0	0	1	5	2	1	1	3
	C5	6	0	5	9	18	0	3	7
	D6	3	4	0	1	0	6	0	2
	D7	8	6	26	13	13	12	14	18
	D8	12	10	24	20	13	3	7	39

Tableau 22: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	B3,D8,E9	67,09
	A1,C4,C5,D6,D7	
2	A1,B3,C5,D8,E9	65,08
	C4,C5,D6,D7	
3	A1,B3,D8,E9	69
	C4,C5,D6,D7	
4	D8,E9	54,63
	A1,B3,C4,C5,D6,D7	
5	B3	67,73
	A1,C4,C5,D6,D7,D8,E9	

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.7 Mulloidichthys pfluegeri - YYP



5.2.7.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 12; Tableau 23).

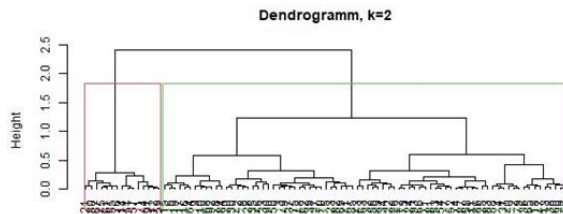


Figure 12: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 23: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	9	41
B3	2	12
C10	1	10
C4	1	5
C5	1	6

5.2.7.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 22.7% (Lambda de Wilks = 0.5544) qui est très proche des 20% obtenus en aléatoire pour 5 échantillons différents. Ainsi, il n'est pas possible d'identifier 2 groupes clairement autour de l'île de La Réunion (Tableau 24).

Tableau 24 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées

Jackknifed matrix		Predicted area				
		A1	B3	C10	C4	C5
Actual area	A1	10	12	6	12	10
	B3	5	2	6	0	1
	C10	1	4	3	0	3
	C4	2	0	1	3	0
	C5	2	1	2	0	2

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX car pour plusieurs hypothèses avec des regroupements différents de zones montrent les mêmes taux de classification ce qui traduit un continuum géographique.

5.2.8 Pristipomoides filamentosus - PFM



5.2.8.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 groupes (Figure 13 ; Tableau 25).

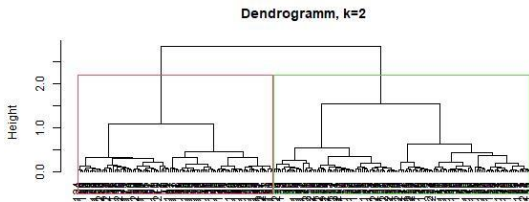


Figure 13: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 25: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	13	10
B2	5	3
B3	57	39
C10	4	7
C4	11	2
C5	7	2
D6	4	4
D7	3	6
D8	8	8
E9	14	15

5.2.8.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 15.3% (Lambda de Wilks = 0.5032). Plusieurs hypothèses ont été testées et l'optimum de bonne classification pour 2 groupes différents est de 54.5% avec d'une part la zone de A1 à C4 et d'autre part la zone de C10 à E9 (Tableau 26 ; Tableau 27).

Tableau 26 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix	Predicted area										
	A1	B2	B3	C10	C4	C5	D6	D7	D8	E9	
Actual area	A1	3	5	0	3	1	3	1	5	1	1
	B2	1	2	0	0	3	0	0	1	1	0
	B3	7	1	17	13	4	14	13	4	9	14
	C10	1	0	3	0	0	1	3	2	1	0
	C4	1	2	1	1	4	1	0	1	2	0
	C5	0	1	1	0	3	2	1	0	0	1
	D6	0	0	1	0	0	0	1	1	4	1
	D7	2	0	0	0	0	1	1	2	3	0
	D8	2	2	2	0	3	1	3	0	0	3
	E9	3	1	3	5	3	5	3	0	3	3

Tableau 27: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	A1,B2,B3,C10,C4,C5	49,5
	D6,D7,D8,E9	
2	A1,B2,B3,C4,C5,D6,D8	52,7
	C10,D7,E9	
3	A1,B2,B3,C4,C5	54,4
	C10,D7,E9,D6,D8	
4	A1,B2,B3,C4	54,5
	C5,C10,D7,E9,D6,D8	
5	A1,B2,B3	49,5
	C4,C5,C10,D7,E9,D6,D8	

Pour cette espèce, deux unités de gestion/stocks peuvent être observées autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.2.9 Variola albimarginata - VRA



5.2.9.1 Cluster hiérarchique : Apprentissage non supervisé

L'analyse de cluster hiérarchique montre que les données se séparent en 2 (Figure 14 ; Tableau 28).

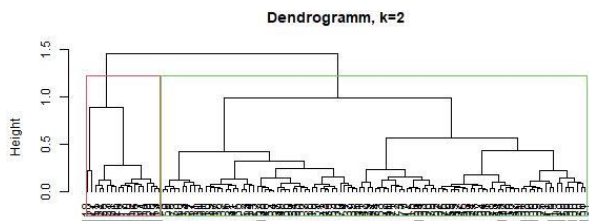


Figure 14: Dendrogramme avec optimisation du nombre de groupes (k).

Tableau 28: Distribution des otolithes selon la zone géographique et le cluster auxquels ils appartiennent.

Zones	Groupe 1	Groupe 2
A1	47	16
B3	7	0
C10	36	3
C4	5	1
D8	5	7

5.2.9.2 Analyse linéaire discriminante : Apprentissage supervisé

L'analyse linéaire discriminante montre un taux de bonne classification de 21.25% (Lambda de Wilks = 0.6448) proche de la valeur aléatoire de 20% pour 5 échantillons différents. Ainsi, peu de distinctions entre les 5 zones testées. Cependant, plusieurs hypothèses ont été testées et le maximum de bonne classification pour 2 zones distinctes est de 84.25% avec la zone D8 qui se sépare des 4 autres zones testées (Tableau 29 ; Tableau 30).

Tableau 29 : Matrice de confusion entre zones d'échantillonnage et zones prédites. Les cases en bleu montrent les données correctement classifiées.

Jackknifed matrix		Predicted area				
		A1	B3	C10	C4	D8
Actual area	A1	13	18	10	11	11
	B3	2	0	3	2	0
	C10	10	7	9	12	1
	C4	2	2	2	0	0
	D8	4	2	0	1	5

Tableau 30: Hypothèses testées pour obtenir le meilleur taux de bonne classification.

Hypothesis	Area composition	Correct classification rate (%)
1	D8	84,25
	A1, B3, C10,C4	
2	A1, D8	62,99
	B3, C10,C4	
3	D8,C10	49,61
	A1,B3,C4	
4	D8,C4	74,8
	A1,B3,C10	

Pour cette espèce, une seule unité de gestion/stock peut être observée autour de l'île de La Réunion selon les données analysées dans le cadre du projet IPERDMX.

5.3 Synthèses des résultats

Parmi les 13 espèces testées autour de l'île de La Réunion en incluant 10 zones d'échantillonnage (Figure 7), il y a 4 espèces (*Aprion virescens*, *Cephalopholis aurantia*, *Pristipomoides argyrogrammicus* et *Variola louti*) pour lesquelles il n'y a pas d'effet géographique significatif observé dans les données testées ce qui traduirait que pour chacune de ces espèces, l'île de La Réunion montrerait qu'une seule unité de gestion/stock. Parmi les 9 autres espèces (*Aphareus rutilans*, *Epinephelus fasciatus*, *Etelis carbunculus*, *Lethrinus rubrioperculatus*, *Lutjanus kasmira*, *Lutjanus notatus*, *Mulloidichthys pfluegeri*, *Pristipomoides filamentosus*, *Variola albimarginata*), l'effet « Area » qui traduit l'effet géographique est significatif ce qui montre qu'il y a une différence de forme d'otolithes entre les zones géographiques testées. Cependant, seules 3 espèces (*Etelis carbunculus*, *Lutjanus notatus* et *Pristipomoides filamentosus*) montrent une optimisation des groupes géographiques avec pour chaque groupe d'individus au minimum 2 zones d'échantillonnage. Ceci est très important car pour les autres espèces, la différence géographique observée réside entre 1 seule zone géographique et le reste des zones testées. Ce type de résultat mérite d'être validé dans le futur avant de valider qu'une seule zone d'échantillonnage pourrait être une unité de gestion à elle-seule.

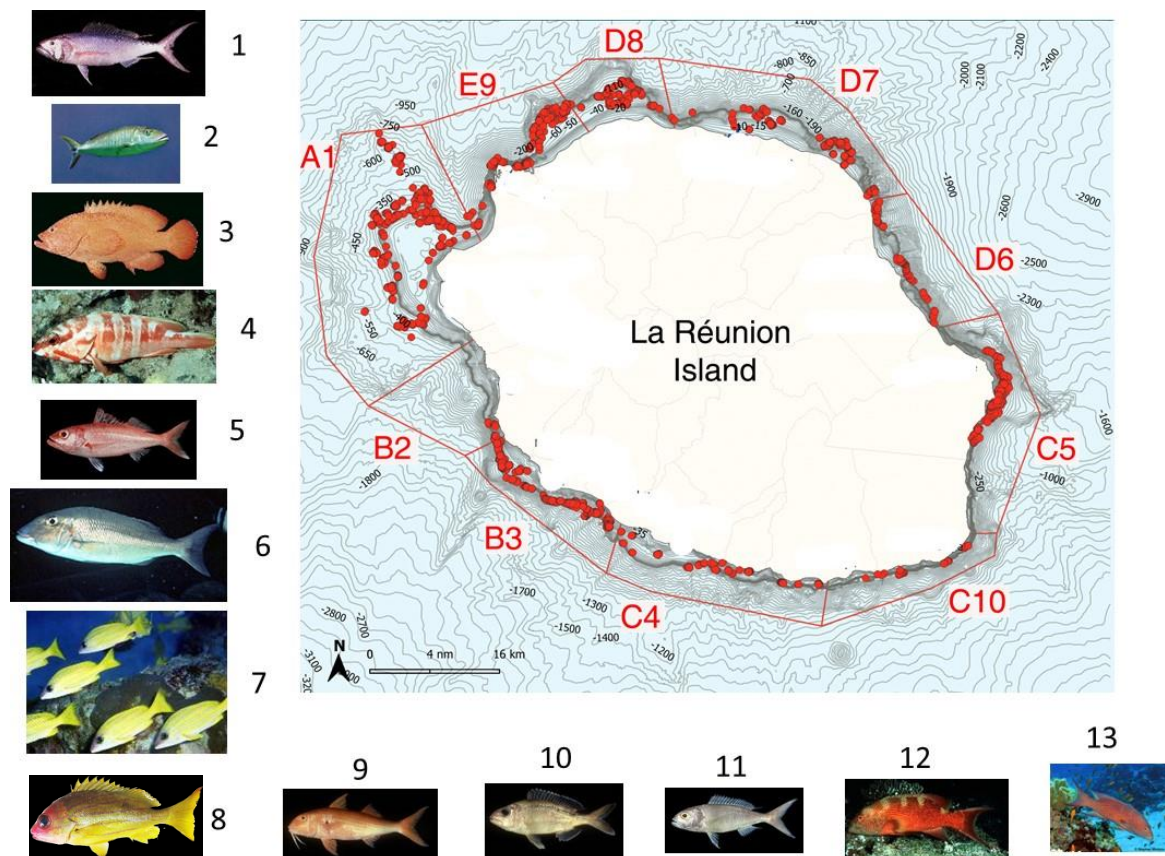
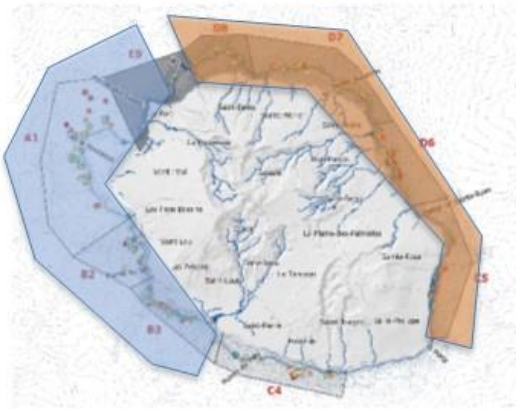


Figure 7 : Liste des 13 espèces analysées selon un découpage autour de l'île de La Réunion en 10 zones définies essentiellement selon les habitats.

Cependant, pour l'espèce *Lutjanus notatus* (QKU), les zones distinctes ne sont pas contiguës mais morcelées ce qui ne permet pas de distinguer clairement 2 unités de gestion/stocks autour de l'île de La Réunion. Finalement, parmi les 13 espèces analysées seules 2 espèces semblent montrer des 2 unités de gestion/stocks autour de l'île de La Réunion (Figure 8).



Etelis carbunculus



Pristipomoides filamentosus

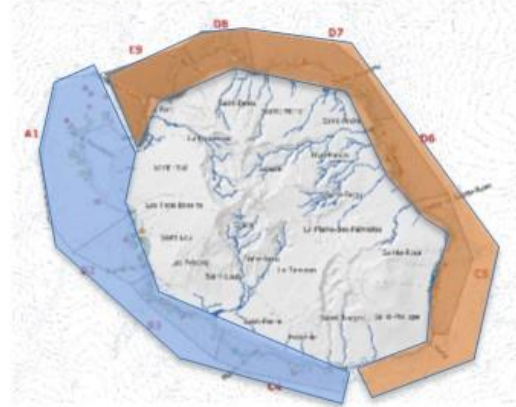


Figure 8: Découpage des côtes de l'île de La Réunion en sous populations selon la forme des otolithes.

Une publication, soumise au journal Cybium suite aux Rencontres Ichtyologiques Françaises (RIF 2022), précisera ces analyses de stocks et comparera ces résultats observés à l'île de La Réunion avec ceux issus de la littérature.

6 Références bibliographiques

- Bivand RS, Pebesma EJ, Gómez-Rubio V (2013). 'Applied spatial data analysis with R.' Second Edition. (Springer: New York, NY) Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4>
- Cadrin SX, Friedland KD, Waldman JR (2005). 'Stock Identification Methods: Applications in Fishery Science'. (Taylor & Francis Ltd) Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-154351-8.X5000-X>
- Elleboode R, Mahé K (2016). Utilisation du logiciel TNPC (Traitement Numérique des Pièces Calcifiées): réaliser des acquisitions automatiques d'images d'otolithes en lumière réfléchie à l'aide d'un Scanner. doi:10.17882/43114
- Fleury P-G, Evano H, Le Ru L, Aureche V (2012). Synthèse de l'étude et des campagnes à la mer 2011 sur l'exploitation aux vire-lignes des espèces démersales profondes autour de La Réunion. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00098/20902/>
- Fox J (2003). Effect Displays in R for Generalised Linear Models. *Journal of Statistical Software* **8**, 1–27. doi:10.18637/jss.v008.i15
- Fox J, Weisberg S (2010). 'An R Companion to Applied Regression' Second edition. (SAGE Publications, Inc: Thousand Oaks, Calif)
- Klecka W (1980). 'Discriminant Analysis'. (SAGE Publications, Inc.: 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States of America) doi:10.4135/9781412983938
- Kuhl FP, Giardina CR (1982). Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer Graphics and Image Processing* **18**, 236–258. doi:10.1016/0146-664X(82)90034-X
- Legendre P, Legendre L (1998). 'Numerical Ecology' Second English Edition. (Elsevier)
- Lestrel PE (2008). 'Fourier Descriptors and Their Applications in Biology'. (Cambridge University Press)
- Mahé K (2019). Sources de variation de la forme des otolithes : Implications pour la discrimination des stocks de poissons. Phdthesis, Université du Littoral Côte d'Opale. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02478194>
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Wagner H (2013). Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.0–10.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team (2016). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R Package Version 3, 1-128.
- R Core Team (2020). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Available at: <https://www.R-project.org/>.
- Rencher AC, Christensen WF (2012). 'Methods of Multivariate Analysis. 3rd Edition.' (John Wiley & Sons, Inc.: New-York) Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118391686>

- Rohlf FJ, Archie JW (1984). A Comparison of Fourier Methods for the Description of Wing Shape in Mosquitoes (Diptera: Culicidae). *Systematic Biology* **33**, 302–317. doi:10.2307/2413076
- Roos D, Durieux M, Pothin K (2015). PECHTRAD 2014 - Description et analyse des données de pêches traditionnelles à pied sur les platiers récifaux de la Réserve Nationale Marine de La Réunion. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00353/46436/>
- Roos D, Tessier E, Taquet M (2001). Prospection des ressources côtières démersales profondes autour de La Réunion. Analyse des données des campagnes à la mer réalisées du 23/02/2000 au 28/07/2000. Rapport de synthèse des travaux confiés par le CRPMEM de La Réunion à l'Ifremer Délégation Océan Indien, 25p. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00410/52117/>
- Todorov V, Filzmoser P (2009). An Object-Oriented Framework for Robust Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* **32**, 1–47. doi:10.18637/jss.v032.i03
- Tuset VM, Lombarte A, González JA, Pertusa JF, Lorente MaJ (2003). Comparative morphology of the sagittal otolith in *Serranus* spp. *Journal of Fish Biology* **63**, 1491–1504. doi:10.1111/j.1095-8649.2003.00262.x
- Venables WN, Ripley BD (2002). 'Modern applied statistics with S' 4th ed. (Springer: New York) Available at: <http://catdir.loc.gov/catdir/toc/fy042/2002022925.html>
- Wickham H (2016). 'ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis'. (Springer International Publishing: New-York) doi:10.1007/978-3-319-24277-4_9