

L'Institut Agro Rennes-Angers

☐ Site d'Angers ☒ Site de Rennes

Année universitaire : 2023-2024

Spécialité :

SML-Biologie.....

Parcours :

Sciences halieutiques et aquacoles.....

Mémoire de fin d'études

☐ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

☒ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Étude comparative spatio-temporelle des communautés ichthyologiques dans les masses d'eau de transition (MET) de Guyane française

Par : Emmanuel CAUSSÉ



Aspredo aspredo © Hadrien Lalagüe

Soutenu à Rennes le 10 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Etienne RIVOT

Maître(s) de stage : Hadrien LALAGÜE

& Grégory QUARTAROLLO

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Olivier LE PAPE (Enseignant

chercheur Institut Agro Rennes-Angers)

Jean-Marc ROUSSEL

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

À l'issue de mon stage de Master 2 au sein du laboratoire Hydreco Guyane, je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements à mes deux maîtres de stage. Hadrien Lalagüe, pour son encadrement et ses corrections, et de manière plus informelle, pour m'avoir accompagné dans cette mission turbulente au large ou ce retour d'Oyapock avec la dengue. Grégory Quartarollo, pour son partage de connaissances lors des identifications de poissons, et aussi de manière plus informelle, pour nos discussions et ce retour de pêche épique sous les nuées de yen-yens.

Merci à Paul Rochas de m'avoir accueilli au laboratoire et partagé quelques astuces pour le carbet-bâche, à Axel Cerdan pour ses conseils dans l'analyse statistique sur R. Merci à Julian Frederick, Pauline Valentin et Yann Kayamare pour leur bonne humeur quotidienne.

Les membres du laboratoire Hydreco sont passionnés par leur travail, et simplement des amoureux de la Guyane avec qui il fut très agréable de vivre ces 6 mois. Je tiens à leur exprimer ici toute ma reconnaissance pour ces moments privilégiés sur la crique Grégoire ou le lac de Petit Saut, au-delà des frontières de mon stage. Merci à Gaétan Pottier de m'avoir fait découvrir la pêche électrique avec enthousiasme.

Pour finir, je veux exprimer ma gratitude à Régis Vigouroux et Nicolas Bargier, ainsi qu'à mes professeurs de l'Institut Agro Rennes-Angers, sans qui je n'aurais pas pu réaliser ce stage et connaître cette expérience extrêmement enrichissante.

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières.....	2
Glossaire	3
Liste des abréviations	5
Liste des Figures.....	6
Liste des Tableaux	7
Liste des Annexes.....	7
1 - Introduction	8
2 - Matériel et méthode	10
2.1 - Zone et contexte de l'étude.....	10
2.2 - Méthode d'échantillonnage	11
2.3 - Analyse des données.....	14
3 - Résultats	18
3.1 - Pertinence et robustesse de la méthode d'échantillonnage.....	18
3.1.1 - <i>Apports spécifiques et partagés des méthodes de pêche au chalut benthique et au verveux</i>	18
3.1.2 - <i>Effort d'échantillonnage et courbes d'accumulation</i>	20
3.1.3 - <i>Zonation des estuaires</i>	22
3.2 - Indices de biodiversité et dissimilarités : comparaisons spatio-temporelles des communautés ichthyologiques des MET de Guyane	24
3.2.1 - <i>Stabilité temporelle intra-MET</i>	24
3.2.2 - <i>Comparaison inter-estuaire des communautés ichthyologiques</i>	26
3.2.3 - <i>Variation saisonnière des communautés ichthyologiques</i>	29
3.3 - Ajustement d'un modèle par la fonction glm()	33
4 - Discussion	35
4.1 - Aspects protocolaires.....	35
4.2 - Différenciation des communautés entre MET	37
4.3 - Différenciation saisonnière des communautés d'une même MET	38
4.4 - Importance relative des facteurs et inconnu : modélisation et limites.....	40
5 - Conclusion	42
Bibliographie	43
Annexes	I

Glossaire

¹**Asymptote** : terme utilisé en mathématiques pour désigner le comportement d'une fonction à l'infini, se rapprochant d'une ligne sans jamais la toucher.

²**Bio-indicateur** : organisme ou groupe d'organismes sensible à la présence de polluants et/ou aux changements environnementaux et d'habitat, utilisé pour évaluer l'état de l'environnement.

³**Bouteille NISKIN** : instrument utilisé en océanographie et en science marine pour collecter des échantillons d'eau à différentes profondeurs.

⁴**Boxplot** : le diagramme en boîte, en français, est un outil graphique utilisé en statistique pour représenter la distribution d'un ensemble de données. Il permet de visualiser les principales caractéristiques de la distribution, telles que la médiane, les quartiles, et les valeurs aberrantes (outliers).

⁵**Chalut benthique** : engin de pêche tracté utilisé dans la pêche commerciale et scientifique pour capturer des poissons et autres organismes marins vivant près du fond.

⁶**Colinéaire** : se dit d'une variable indépendante fortement corrélée à une autre dans un modèle de régression. Des variables colinéaires partagent une quantité significative d'information, ce qui peut poser problème dans l'analyse des données.

⁷**Crique** : petit cours d'eau souvent sinueux qui traverse la forêt tropicale, généralement affluents de plus grands fleuves ou rivières.

⁸**Dégrad** : terme utilisé en Guyane française pour désigner un port ou un lieu de mise à l'eau de chargement et déchargement des embarcations.

⁹**Degré de liberté** : nombre de valeurs indépendantes qui peuvent varier dans un calcul sans violer les contraintes imposées par le modèle statistique ou la procédure d'analyse.

¹⁰**Démersal** : qui vit et se nourrit près du fond marin, par opposition à ce qui vit dans la colonne d'eau ou en surface.

¹¹**Déviance** : mesure statistique de la qualité de l'ajustement d'un modèle aux données observées, quantifiant l'écart avec un modèle idéal qui s'ajusterait parfaitement aux données.

¹²**Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE** : législation de l'Union européenne adoptée le 23 octobre 2000 visant le « bon état » écologique des masses d'eau de ses États membres en 2015, avec report des objectifs pour certaines eaux.

¹³**El Niño** : phénomène climatique de l'ENSO caractérisé par un réchauffement anormal des températures de surface de l'océan dans le Pacifique équatorial central et oriental.

¹⁴**Endémique** : se dit d'une espèce native et restreinte à une région géographique spécifique, ayant possiblement évolué en isolement dans un habitat unique, ce qui la rend particulièrement adaptée à son environnement local.

¹⁵**Habitat** : cadre de vie physique et biotique d'une espèce ou d'une communauté, fournissant les ressources nécessaires à son existence et aux interactions écologiques qui influencent sa dynamique de population.

¹⁶**Ichtyologique** : qui se rapporte à l'étude (biologique, écologique, comportementale ou de classification) des poissons.

¹⁷**In situ** : expression latine signifiant "sur place", utilisée en sciences pour faire référence à l'observation, la mesure ou l'analyse d'un phénomène ou d'un objet dans son environnement naturel.

¹⁸**La Niña** : phénomène climatique de l'ENSO caractérisé par des anomalies de température de surface de l'océan Pacifique équatorial inférieures à la moyenne.

¹⁹**Mangrove** : type d'écosystème côtier caractérisé par des forêts d'arbres et arbustes spécialisés poussant généralement en eau saumâtre dans les zones intertidales tropicales et subtropicales.

²⁰**Méso-tidal** : terme utilisé pour décrire une amplitude des marées modérée, généralement de 2 à 4 mètres entre la marée basse et la marée haute.

²¹**Osmorégulation** : processus biologique par lequel un organisme régule la concentration des solutés et l'équilibre hydrique de ses fluides corporels pour maintenir une homéostasie interne malgré les variations de l'environnement externe.

²²**Précambrien** : vaste période de l'histoire de la Terre, de sa formation il y a environ 4,6 milliards d'années, à environ 541 millions d'années avant notre ère.

²³**Résidu** : différence entre une valeur observée et la valeur prédite par un modèle statistique, permettant d'évaluer la qualité de l'ajustement aux données observées.

²⁴**Ripisylve** : végétation qui se développe le long des rives des cours d'eau, des rivières et des lacs.

²⁵**Saut** : brusque dénivellation d'un cours d'eau souvent créée par la présence de formations rocheuses et créant une chute d'eau ou un rapide faisant obstacle à la navigation.

²⁶**Vasière** : zone intertidale ou fond marin caractérisé par la présence de sédiments fins (argiles ou limons) apportés dans les estuaires, les baies et les lagunes par de faibles courants et de marées.

²⁷**Verveux** : engin de pêche traditionnel utilisé principalement pour capturer des poissons dans les environnements côtiers et estuariens à fond vaseux ou sablonneux.

Liste des abréviations

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIC : Akaike Information Criterion

BACI : Before After Controle Impact

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

ENSO : El Niño Southern Oscillation

GLM : Generalized Linear Model

GPS : Global Positioning System

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

IPG : Indice Poisson Guyane

MET : Masse(s) d'Eau(x) de Transition

PCB : PolyChloroBiphényles

PIE : Probability of Interspecific Encounter

PSU : Practical Salinity Unit

SAC : Species Accumulation Curve

SP : (grande) Saison des Pluies

SS : (grande) Saison Sèche

Liste des Figures

Figure 1 : années et saisons de prélèvement sur les neuf principaux estuaires de Guyane depuis 2016.....	11
Figure 2 : dimensions et maillage du chalut benthique.....	12
Figure 3 : mesure des paramètres physico-chimiques (gauche) et mise à l'eau du chalut benthique (droite) à bord du navire « KTM » lors d'une campagne de pêche occasionnelle au large de l'estuaire du Maroni le 7 juin 2024.....	12
Figure 4 : traits de chalut et poses de verveux sur la MET du fleuve Kourou en 2016 selon les zones définies par Habert (2012), protocole MET.....	13
Figure 5 : mesure approximative d'une raie-bécune (<i>Fontitrygon geijskesi</i>) avant sa relâche, espèce considérée en danger critique d'extinction d'après l'IUCN, le 12 juillet 2024 dans l'estuaire du Mahury.....	14
Figure 6 : part de la richesse spécifique observée propre à la pêche au verveux, au chalut benthique, ou commune aux deux méthodes, lors des différentes campagnes.....	20
Figure 7 : courbes d'accumulation (SAC) moyennées par zone pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au verveux.....	21
Figure 8 : courbes d'accumulation (SAC) moyennées par zone pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au chalut benthique.....	21
Figure 9 : courbe d'accumulation (SAC) moyennée toutes zones confondues pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au chalut benthique.....	22
Figure 10 : indices Chao1 pour les traits de chalut réalisés en saison sèche selon la zone haline.....	23
Figure 11 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis inter-zone pour les traits de chalut effectués en saison sèche sur les différents estuaires entre 2015 et 2024.....	23
Figure 12 : part de l'abondance totale moyenne de chaque espèce par zone de salinité. ...	23
Figure 13 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 1 sur la période 2015-2024.....	26
Figure 14 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 2 sur la période 2015-2024.....	27
Figure 15 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 3 sur la période 2015-2024.....	27
Figure 16 : structure d'abondance du poisson-chat banjo, ou « croncron » (<i>Aspredo aspredo</i>), entre MET pour la zone 3.....	30
Figure 17 : comparaison saisonnière des indices de biodiversité (Chao1, Shannon, Simpson & Pielou).....	30
Figure 18 : structure d'abondance de trois espèces (<i>Stellifer stellifer</i> , <i>Notarius rugispinis</i> et <i>Odontognathus mucronatus</i>) entre Saisons-Zones sur la MET du Montsinéry.....	33
Figure 19 : analyse et distribution des résidus du modèle glm() explicatif des variations de la richesse spécifique observée.....	34
Figure 20 : photographie en aquarium d'un <i>Stellifer stellifer</i>	36
Figure 21 : photographie en aquarium d'un poisson-chat banjo, ou « croncron » (<i>Aspredo aspredo</i>).	38
Figure 22 : photographie en aquarium d'un <i>Notarius rugispinis</i>	39
Figure 23 : photographie en aquarium d'un <i>Odontognathus mucronatus</i>	39

Liste des Tableaux

Tableau 1 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis obtenues par comparaison des données de pêche obtenues au chalut benthique et au verveux sur de mêmes MET-zone-années. ..	18
Tableau 2 : liste des espèces représentatives de chaque méthode de pêche (chalut benthique et verveux) avec abondances relatives et valeurs indicatrices correspondantes.....	19
Tableau 3 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 1 d'un même estuaire selon les années.	25
Tableau 4 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 2 d'un même estuaire selon les années.	25
Tableau 5 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 3 d'un même estuaire selon les années.	25
Tableau 6 : listes des espèces représentatives significatives des différentes MET de Guyane, obtenues à partir des données de saison sèche sur la période 2015-2024, par zone de salinité.	29
Tableau 7 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre prélèvements en saison sèche et en saison des pluies sur une même MET dans une même zone de salinité.....	31
Tableau 8 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Montsinéry.	31
Tableau 9 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Maroni.	32
Tableau 10 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Mahury.	32
Tableau 11 : pourcentages de déviance expliquée par les différents facteurs des modèles explicatifs des variations des indices de biodiversité.	34

Liste des Annexes

Annexe 1 : Position des navires contrôlés et ou déroutés lors des actions air/mer des autorités maritimes entre 2002 et 2012. (issu de Levrel, 2012).	I
Annexe 2 : traits de chalut benthique sur la MET du Montsinéry en 2015, 2016 et 2017.....	I
Annexe 3 : traits de chalut benthique sur la MET de l'Approuague en 2019 et 2021.	II
Annexe 4 : cartographie de l'état chimique des masses d'eau de Guyane en 2019 (issue de l'état des lieux de l'Office de l'eau de Guyane).	II

1 - Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE¹² (DCE) renouvelle tous les 6 ans ses objectifs en matière de gestion de la qualité des eaux selon un plan de gestion s'appliquant à tous les États membres de l'Union européenne. Depuis 2013, l'objectif d'atteinte du bon état écologique et chimique ne se limite plus aux masses d'eau souterraines et de surface, mais a été étendu aux masses d'eau côtières et masses d'eau de transition (MET). Ces dernières désignent les estuaires et lagunes comme unité géographique cohérente définie sur la base de critères physico-chimiques. Pour être plus précis, *Habert (2012)* propose un découpage des MET en trois zones d'aval en amont selon les classes de salinité suivantes : 18-30 PSU (zone 1 polyhaline), 5-18 PSU (zone 2 mésohaline), 0-5 PSU (zone 3 oligohaline). Une définition géographique précise la délimitation des MET en amont, celles-ci s'arrêtant au point d'inversion du courant sous l'effet de la marée le plus haut. Notons que ces zones, liées à la salinité, se déplacent en permanence : au rythme des saisons, mais aussi à très court terme sous l'effet de la marée. Ainsi, un point situé dans l'estuaire quelques centaines de mètres avant l'embouchure peut se trouver en zone 1 à marée haute et successivement en zone 2, voire 3, lors de la marée descendante (et selon les apports d'eau douce par les précipitations).

Elliott et Quintino (2007) ont quant à eux mis en évidence les fonctions écologiques essentielles des estuaires pour le refuge, la reproduction, l'habitat¹⁵ et la migration de nombreuses espèces de poissons. De manière générale, la diversité taxonomique et de niveaux trophiques des poissons en font un bio-indicateur² largement utilisé, malgré les efforts d'échantillonnage considérables nécessaires pour accéder à une image fidèle des communautés (*Pérez-Domínguez et al., 2012*). Dans un contexte de développement des indicateurs multi-métriques pour la caractérisation des écosystèmes, un Indice Poisson Guyane (IPG) a été créé dès 2006, et mis à jour en 2022, pour caractériser l'état des eaux de surface continentales (*Pottier et al., 2022*). Les MET demeurent cependant un compartiment spécifique pour lequel les variations de données environnementales quasi permanentes rendent difficile le développement d'indicateur. En effet, ces variations (de salinité, température, conductivité, turbidité...), souvent couplées à l'absence d'estuaire non perturbé pris comme état de référence, complexifient la distinction entre effets induits par des phénomènes naturels et effets induits par des pressions d'origine anthropique. La démographie et l'industrialisation sont en croissance sur la bande côtière guyanaise, ce qui renforce les impacts sur des zones estuariennes (*Kennish 2002*). Néanmoins, la part des espaces naturels, bien plus importante en proportion que sur le territoire métropolitain, atténue les pressions anthropiques et rend les seuils et classes de qualité définis pour l'évaluation de l'état écologique et chimique des MET de l'hexagone inadéquats (*Mignien et al., 2021*).

Aussi, le laboratoire Hydreco réalise depuis 2015 des inventaires faunistiques sur les communautés ichtyologiques¹⁶ des différents estuaires de Guyane, ainsi que des mesures physico-chimiques permettant de caractériser l'environnement. Nous entendons par « communautés ichtyologiques » l'ensemble des poissons appartenant à des espèces différentes, regroupés en un temps donné dans un habitat donné, et entretenant des relations intra et interspécifiques de diverses natures. Ces données nouvelles permettent de faire avancer l'état des connaissances. En 2021, la mesure de la dissimilarité structurale et fonctionnelle des communautés entre estuaires a été jugée favorable à la création d'un « indicateur poisson-estuaire » confondant les différents estuaires de Guyane en « un seul type » (*Mignien et al., 2021*). En effet, la plupart des communautés ichtyologiques n'était pas significativement dissimilaire d'un estuaire à un autre. Ces résultats ont néanmoins été nuancés par l'obtention de dissimilarités significatives pour certains fleuves (Oyapock notamment), dans certaines zones (zone 1 particulièrement), et obtenus avec relativement peu de recul au niveau des données. La MET de l'Approuague encore en cours d'échantillonnage au moment de l'étude, les calculs de *Mignien et al. (2021)* ne reposaient que

sur une ou trois années de prélèvement, pour 7 des 9 MET définies en Guyane. Des données de pêche récoltées en 2019 n'ont par ailleurs pas été prises en compte dans l'étude. Une autre limite du travail était de réaliser des comparaisons inter-estuariers à partir de données prélevées lors d'années distinctes. Ainsi, les données de communauté de certaines MET sur la période 2015-2017 (Mahury, Montsinéry, Kourou) ou 2016-2018 (Maroni) ont été comparées à celles de l'unique année de prélèvement 2018 d'autres MET (Mana, Iracoubo, Oyapock).

Jusqu'en 2023, dans un souci de reproductibilité, toutes les campagnes de pêche ont été réalisées en saison sèche, aucune en saison des pluies. Or, la saisonnalité des pluies pourrait être un facteur faisant varier la composition et/ou la structuration des communautés de poissons. En effet, le climat équatorial humide de la Guyane donne lieu à une succession de périodes plus ou moins longues et plus ou moins pluvieuses : on distingue la grande saison des pluies (SP) d'avril à juillet, la saison sèche (SS) d'août à novembre, la petite saison des pluies de décembre à février et le petit été de mars. La pluviométrie est abondante, oscillant généralement entre 2000 et 4000mm cumulés sur l'année, au gré des variations de l'ENSO (El Niño Southern Oscillation). Les écarts saisonniers de pluviométrie sont très marqués. À titre d'exemple, la grande saison des pluies de 2023 a reçu plus de 1100mm de pluie cumulée, quand la saison sèche de la même année n'a reçu qu'environ 200mm (*Bulletin climatique annuel 2023*). En saison des pluies, les apports conséquents d'eau douce par l'Amazonie et les fleuves guyanais peuvent diminuer la salinité jusqu'à 10 à 15 PSU à 30km de la côte. En saison sèche, le courant du nord du Brésil se retire, la salinité retrouve des valeurs d'environ 35 PSU, et les apports sédimentaires sont aussi réduits (*Léopold 2004*).

Il a d'ores et déjà été montré que cette saisonnalité rythmait le cycle biologique de certaines espèces de poisson, engageant notamment des migrations au moment de la saison des pluies, en quête de nouvelles ressources alimentaires (*Albert, 1996*). Selon les espèces et les localités, l'effet saisonnier se fait plus ou moins prégnant. En Guyane, *Tejerina-Garro et Mérona (2010)* ont montré une influence du niveau d'eau sur les assemblages de poissons de la zone oligohaline et amont de la rivière Compté. Des changements de régimes trophiques caractéristiques piscivore et insectivore en saison d'étiage, à omnivore en saison des pluies, ont en effet été entraînés par la migration de quelques espèces. En zone côtière et au large des estuaires, *Le Joncour et al. (2020)* ne rapportent pas de tendance saisonnière claire, mais des comportements d'agrégation de certaines espèces en saison des pluies aux abords des estuaires. Des variations significatives de richesse spécifique et de biomasse ont pourtant été observées entre saisons dans les criques⁷ de mangroves¹⁹ de l'estuaire inférieur de Caeté, sur la côte Nord du Brésil (*Barletta et al., 2003*). Ces variations concernaient notamment des espèces également présentes dans les MET de Guyane, telles que *Sphoeroides psittacus*, *Pseudauchenipterus nodosus* et *Rhinosardinia amazonica*.

Ainsi, le présent rapport de stage s'attachera à caractériser la composition et la structuration des communautés de poissons des différentes MET de Guyane, en prenant en compte les données actualisées, dont certaines prises en saison des pluies de façon inédite. Après exploration des données et retour sur certains aspects protocolaires, nous commencerons par vérifier la stabilité temporelle des communautés ichtyologiques dans chacun des 8 estuaires étudiés, année après année, dès lors que des données sont disponibles. Si les variations de l'ENSO peuvent apporter des conditions climatiques fortement contrastées d'une année sur l'autre, les prélèvements ne sont pas réalisés selon une date fixée, mais plutôt selon des conditions saisonnières fixées. Ainsi, quand bien même la saison sèche de l'année 2021 fut réduite et/ou décalée dans le temps par un intense phénomène « La Niña¹⁸ » (*Bulletins climatiques annuels*), les prélèvements eurent lieu dans des conditions saisonnières similaires à celles des années « El Niño¹³ ». Supposant que les importantes surfaces et proportions d'espaces naturels dans les écosystèmes estuariens guyanais aient absorbé les effets de l'anthropisation à l'échelle des 10 dernières années, nous nous attendons à ce que la communauté de poissons d'un estuaire donné ne varie pas significativement d'une année de prélèvement à une autre.

Le paramètre spatial, abordé à l'échelle du territoire avec la comparaison inter-estuaire des communautés ichthyologiques, pourrait s'avérer plus discriminant. En effet, si certaines dissimilarités étaient déjà significatives dans le travail de *Mignien et al. (2021)*, d'autres pourraient le devenir avec la prise en compte des nouvelles données. Les facteurs hydrographiques les plus discriminants étaient déjà définis : le débit moyen annuel lui-même corrélé à la superficie du bassin versant et à la longueur du cours principal d'une part, et la largeur de l'embouchure d'autre part. Ces éléments pouvant varier jusqu'à un facteur 10 entre certains estuaires de Guyane, nous nous attendons à ce que les différences déjà observées demeurent, et que d'autres, moins importantes, deviennent significatives. Si tel est le cas, nous observerons probablement des variations dans la distribution des abondances de différentes espèces ubiquistes entre communautés, mais aussi des apparitions et disparitions d'espèces endémiques¹⁴ d'une MET à une autre. La MET de l'Approuague, pour laquelle aucun résultat n'était disponible en 2021, sera par ailleurs un cas d'étude remarquable combinant une large embouchure de plus de 10km (mesure via Géoportail) avec un débit annuel moyen modéré de 304m³/s (*Mérona et al., 2012*).

Enfin, nous nous attendons à ce que la prise en compte du facteur saisonnier avec des données inédites sur la saison des pluies fasse apparaître des variations de composition des communautés étudiées. En effet, les migrations de poissons ayant lieu en saison des pluies pourraient faire apparaître ou disparaître certaines espèces d'une zone donnée par rapport aux conditions de saison sèche. Dans un contexte d'attente de validation de l'indicateur poisson estuaire, cela pourrait faire émerger un autre paramètre important à prendre en compte dans le protocole, la pondération et/ou l'interprétation des notes finales. Nos principales questions sont rappelées ci-dessous, ainsi que les résultats attendus.

À partir des données récoltées dans les MET de Guyane française depuis 2015, existe-t-il des variations de communauté ichthyologique significativement corrélées...

- à l'année de prélèvement, sur un même estuaire ?
- aux différents estuaires ?
- à la saison (saison sèche, saison des pluies), sur un même estuaire ?

Si oui, ces variations relèvent-elles de changements dans la composition spécifique, ou dans la structuration (abondances relatives) des communautés ?

Nous nous attendons à une stabilité interannuelle des communautés, dissimilaires entre elles d'un estuaire à l'autre, et d'une saison à l'autre sur un même estuaire. Nous supposons que ces variations attendues soient dues à la fois à des compositions spécifiques différentes et à des structurations différentes.

2 - Matériel et méthode

2.1 - Zone et contexte de l'étude

Depuis 2015, le travail de suivi des communautés ichthyologiques par le laboratoire Hydreco se répartit sur huit estuaires principaux (*Figure 1*). Ceux-ci s'inscrivent au grand ensemble géologique précambrien²³ du plateau des Guyanes et sont sous influence des marées de type semi-diurnes au régime méso-tidal²⁰. Les MET guyanaises se caractérisent par des fonds vaseux à sablo-vaseux, voire graveleux par endroit, et sont connectées entre elles par des réseaux de mangroves et de vasières²⁶ (*Lampert 2012*).

Dans un souci de reproductibilité et pour des raisons pratiques, les campagnes de pêche se tenaient jusqu'en 2021 en saison sèche, aux mois de septembre et octobre. A compter de 2023, la nature du suivi précisée ci-après a évolué. Cela a permis d'explorer la dimension saisonnière du suivi de communauté en réalisant de nouveaux prélèvements en saison des

pluies. Dans cette étude, trois MET ont fait l'objet de pêches au chalut benthique⁵ en saison des pluies : Maroni, Montsinéry et Mahury. Une seule campagne de pêche avait été réalisée à la même période auparavant, en 2023, sur le Montsinéry.

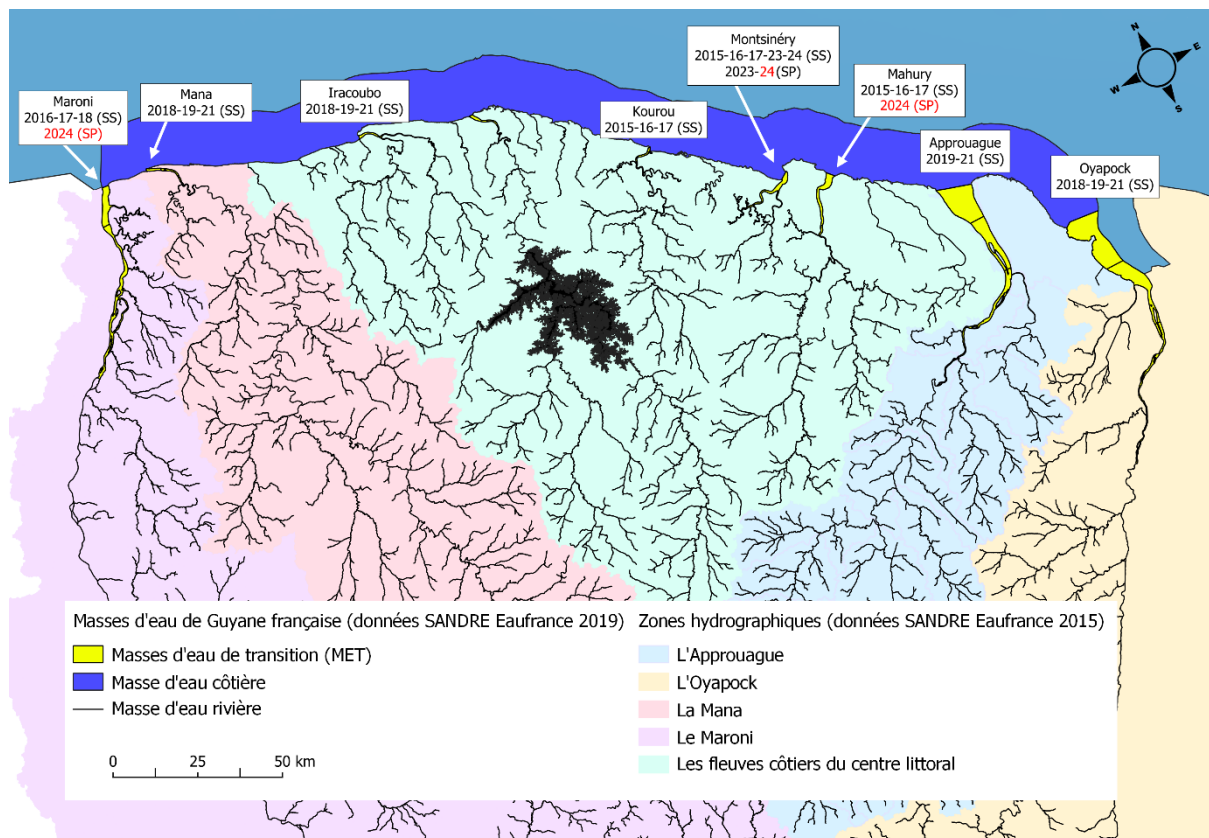


Figure 1 : années et saisons de prélèvement sur les neuf principaux estuaires de Guyane depuis 2016.

D'ouest en est, les superficies des bassins versants et débits moyens annuels des différents fleuves sont les suivants : Maroni (65830km², 1700m³/s), Mana (12090km², 311m³/s), Iracoubo (744km², 243m³/s), Sinnamary (6565km², 243m³/s), Kourou (1749km², 101m³/s), Mahury (3114km², 101m³/s), Approuague (10250km², 304m³/s), Oyapock (26820km², 835m³/s) (valeurs tirées de de Mérona et al., 2012). En rouge sont notées les campagnes de pêche menées durant le stage.

2.2 - Méthode d'échantillonnage

L'échantillonnage des poissons dans ces MET se fait selon le protocole technique standardisé de *Lepage et al. (2008)* avec du matériel de pêche au chalut benthique et au verveux²⁷. Le chalut benthique utilisé a une largeur d'un mètre cinquante pour une hauteur de soixante centimètres. Le filet, profond de quatre mètres vingt, reste bien ouvert grâce à une chaîne qui traîne sur le fond. Différentes tailles de mailles se succèdent : 11x11mm à l'entrée, 8x8mm au milieu et 6x6mm au fond du chalut (*Figure 2*). Le protocole utilisé respecte la norme AFNOR PR XP T 90-701 relative à "l'échantillonnage au chalut à perche des communautés de poissons dans les estuaires". Pour tracter ses engins de pêche, le laboratoire Hydreco dispose d'un bateau de 6,20m équipé d'un moteur de 60 chevaux 4 temps, nommé « la Dorothee ». Une manille et une cale ont été ajoutées afin de maintenir la corde du chalut pendant que celui-ci est tracté à une vitesse de 4 à 6km/h pendant six minutes. Une fois ce temps écoulé, le bateau vire du côté de la corde et une bouée reliée au chalut remonte à la surface, indiquant sa position pendant que celui-ci est remonté à la force des bras. Selon l'importance de la mission et les moyens humains, la pirogue « AquaBlue » de 8m peut être utilisée comme soutien pour récupérer les poissons prélevés et réaliser d'autres mesures.

En effet, avant chaque trait de chalut ou chaque pose de verveux, les conditions physico-chimiques (température, salinité, conductivité, turbidité, taux de dioxygène dissous, pH) sont mesurées à l'aide de matériel adapté (bouteille NISKIN³, turbidimètre, sondes) (*Figure 3*). Cela permet de caractériser l'environnement et de s'assurer que les conditions de salinité

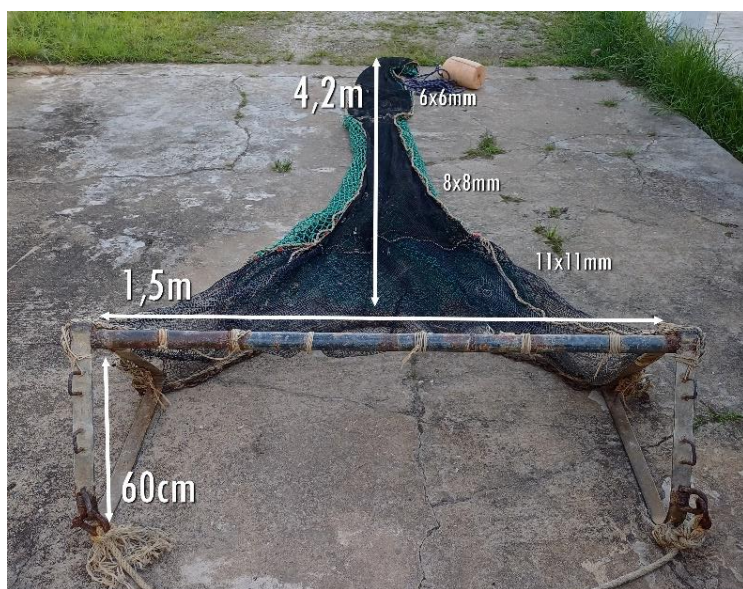


Figure 2 : dimensions et maillage du chalut benthique.

© Emmanuel Caussé

correspondent bien à la définition de la zone (oligo, méso ou polyhaline) que l'on souhaite échantillonner, selon la définition de *Habert (2012)*. Les conditions de marée (horaire et hauteur de la basse et de la haute mer) sont donc également notées. Au début et à la fin de chaque trait de chalut, les coordonnées GPS ainsi que l'heure sont relevées, ce qui permet de calculer la vitesse effective moyenne du navire tirant le chalut. Enfin, une valeur de profondeur moyenne le long du trait de chalut est estimée à l'aide de l'échosondeur ou d'un profondimètre pour mieux caractériser l'habitat.

Les verveux sont disposés à l'étal de marée haute, faisant face à des incursions de quelques mètres de largeur du cours d'eau dans la mangrove ou la ripisylve²⁴. Le courant de marée descendante pousse alors les poissons et crustacés vers le dispositif, qui peut éventuellement être reculé à intervalles de deux heures afin d'éviter son assèchement avec la baisse du niveau d'eau.



Figure 3 : mesure des paramètres physico-chimiques (gauche) et mise à l'eau du chalut benthique (droite) lors d'une campagne de pêche occasionnelle au large de l'estuaire du Maroni le 7 juin 2024.

© Olivier Tostain

Ainsi, les données de communauté des poissons dans les MET de Guyane proviennent majoritairement d'un protocole de suivi MET mené entre 2015 et 2021 et prévoyant un minimum de 10 traits de chalut par zone de salinité. Un exemple d'organisation spatiale de ce plan d'échantillonnage est donné par la *Figure 4* pour la MET du Kourou en saison sèche de

l'année 2016. Cependant, d'autres données plus récentes ont pu être ajoutées et traitées de la même manière, provenant souvent d'études d'impact de travaux. Les commanditaires des travaux ont en effet certaines fois l'obligation de réaliser des suivis de type BACI (Before After Controle Impact) sur l'ichtyofaune, et par conséquent, d'échantillonner celle-ci. C'est par exemple le cas pour le chantier de la construction du pont du Larivot en MET du Montsinéry, pour le dragage du chenal en MET du Maroni ou pour l'agrandissement de la zone portuaire du dégrad⁸ des Cannes en MET du Mahury. Dans ce contexte, les méthodes de pêche au chalut benthique et de relevé physico-chimique sont les mêmes, mais la pêche au verveux abandonnée : sa mise en place reste complexe, voire impossible dans certaines zones selon la morphologie des estuaires. Les prélèvements ne se concentraient alors que sur certains points géographiques contraints et indépendants des gradients de salinité. Par ailleurs, si la salinité ne varie que dans une gamme de valeurs restreinte à l'instant t dans le périmètre étudié pour les travaux, l'ensemble des prélèvements peut alors concerner une unique zone de salinité, sans que l'on cherche à réaliser le même nombre de traits de chalut dans les autres zones. Cela explique l'absence de prélèvement dans certaines zones de certaines MET après 2021.

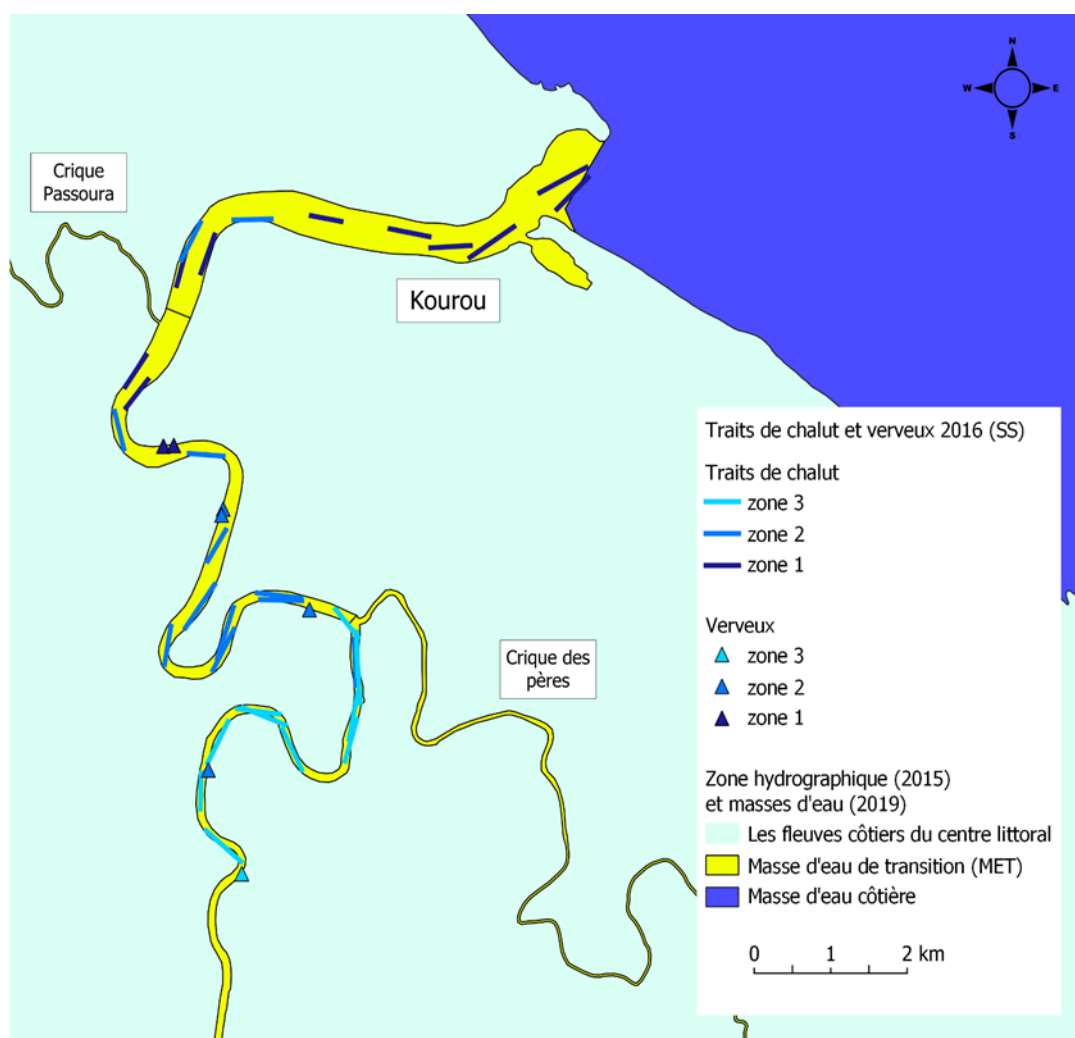


Figure 4 : traits de chalut et poses de verveux sur la MET du fleuve Kourou en 2016 selon les zones définies par Habert (2012), protocole MET.

SS : saison sèche

Notons que des adaptations des protocoles peuvent être décidées spontanément lorsque la réalité des conditions terrain l'exige. Par exemple, la mission du Mahury le 26 juin 2024 s'est soldée par un échec en raison de l'envasement répété du chalut dans le chenal

principal. Contrairement aux autres estuaires, celui du Mahury est régulièrement dragué pour que des porte-conteneurs puissent manœuvrer au niveau du dégrad des Cannes. Lors de son report le 12 juillet, les traits de chalut ont plutôt été réalisés à marée haute de part et d'autre du chenal où la vase était plus dense, et les conditions physico-chimiques relevées exceptionnellement qu'après chaque trait, en cas de succès.

Les individus ainsi prélevés et remontés à bord sont majoritairement conservés pour être, au laboratoire, identifiés au rang spécifique, mesurés (longueur standard en mm) et pesés (en g). Certains spécimens peuvent être photographiés et gardés en collection. Les plus gros individus peuvent être traités directement à bord et relâchés (*Figure 5*). Au-delà de 30 individus pour une espèce donnée, un tirage aléatoire représentatif de 30 individus est réalisé pour mesures individuelles, et un poids global est effectué sur le reste des individus. Les poids globaux portent souvent sur les juvéniles de poisson, parfois présents en très grand nombre

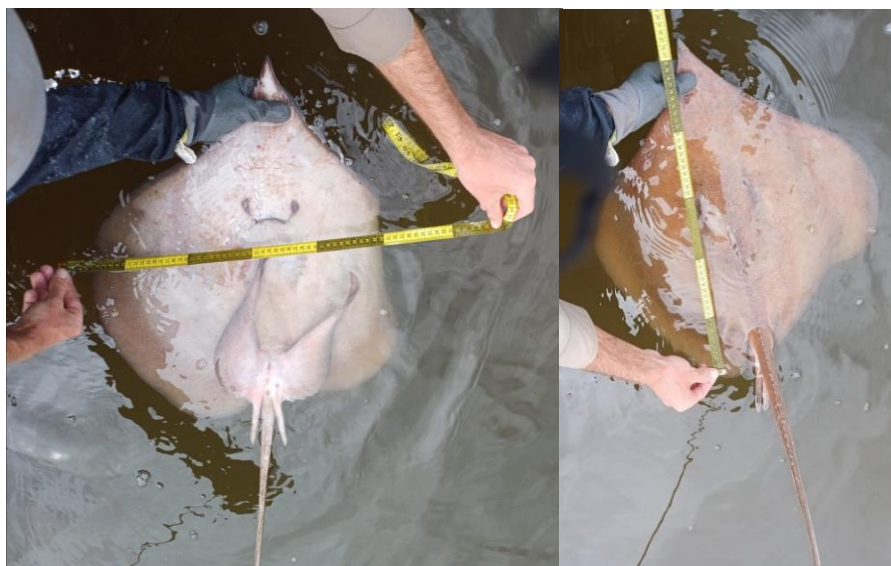


Figure 5 : mesure approximative d'une raie-bécune (*Fontitrygon geijskesi*) avant sa relâche, espèce considérée en danger critique d'extinction d'après l'IUCN, le 12 juillet 2024 dans l'estuaire du Mahury.

© Hadrien Lalagüe

et identifiables seulement jusqu'au genre. La majeure partie des espèces rencontrées sont répertoriées dans le guide d'aide à l'identification des espèces de poissons et de macro-invertébrés des estuaires de Guyane (*Feunteun, 2017*). Des ouvrages plus spécifiques à certains groupes de poissons peuvent être consultés (par exemple *Vanhoucke et al. (2022)*).

2.3 - Analyse des données

L'ensemble des données nouvellement acquises complète les bases de données pré-existantes, et l'ensemble fait l'objet d'analyses statistiques réalisées à l'aide du logiciel Rstudio (version de R 4.2.3), enrichi du package « vegan » et d'autres cités ci-après. Les représentations cartographiques sont quant à elles produites via le logiciel SIG QGIS, dans sa version 3.28.11.

Un travail d'homogénéisation de la base de données est réalisé au préalable. Une attention particulière est accordée au pré-traitement des données pour la réalisation des différentes analyses, concernant notamment la prise en compte des individus indéterminés au niveau spécifique selon le rang taxonomique étudié. En effet, la prise en compte de ces individus indéterminés risquerait de modifier artificiellement la valeur de la richesse taxonomique lorsqu'on travaille au rang de l'espèce, et pas au rang de la famille.

L'exploration des données prend la forme de courbes d'accumulation, de distributions d'abondance des espèces, d'estimations et de calculs d'indices de biodiversité tels que décrits par *Marcon (2018)* (richesse spécifique observée S_{obs} et indices *Chao1*, de Shannon H' , de Pielou J' , de Simpson D et d'Hurlbert PIE). L'indice *Chao1* est une estimation de la richesse

réelle prenant en compte les espèces rares (singletons et doubletons) potentiellement sous-échantillonnées. Il se calcule par la formule suivante :

$$Chao1 = S_{observée} + \frac{F_1^2}{2F_2}$$

Avec :

- $S_{observée}$ le nombre d'espèces observées (richesse observée).
- F_1 le nombre d'espèces observées une seule fois (singletons).
- F_2 le nombre d'espèces observées deux fois (doubletons).

L'indice de Shannon (ou indice de diversité), croît avec la diversité des espèces dans une communauté, en tenant compte à la fois du nombre d'espèces (richesse) et de leur abondance relative (équitabilité) :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$$

Avec :

- S le nombre total d'espèces (richesse spécifique).
- p_i la proportion des individus de l'espèce i par rapport au total des individus.

L'équitabilité de Pielou mesure la distribution équitable des individus entre les espèces (une valeur de 1 indiquant que toutes les espèces sont également représentées). Cet indice dérivé de l'indice de Shannon indiquant à quel point une communauté est équitable en termes d'abondance des espèces se calcule comme :

$$J' = \frac{H'}{\ln(S)}$$

Avec :

- H' l'indice de Shannon.
- S la richesse spécifique.

L'indice de Simpson mesure la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard dans une communauté appartiennent à la même espèce. Cet indice met plus de poids sur les espèces dominantes que celui de Shannon et varie de 0 (diversité maximale) à 1 (diversité minimale). Il se calcule par la formule suivante :

$$D = \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Avec :

- S la richesse spécifique.
- n_i l'abondance de l'espèce i dans l'échantillon.
- N l'abondance totale

L'indice de Hurlbert est une version de l'indice de Simpson, ajusté à la taille de l'échantillon et centré sur la probabilité de rencontrer deux individus de différentes espèces. Il se calcule comme :

$$PIE = \frac{N}{N - 1} \left(1 - \sum_{i=1}^S p_i^2\right)$$

Avec :

- S la richesse spécifique.
- p_i la proportion d'individus de l'espèce i .
- N le nombre total d'individus dans la communauté.

Des représentations graphiques claires aident également à évaluer la pertinence du protocole (choix des engins de pêche et zonation des MET selon la salinité notamment), sa robustesse

(effort d'échantillonnage), et de mettre en évidence les premières grandes tendances observables. Celles-ci sont réalisées à l'aide des packages « ggplot2 » et « pheatmap » notamment.

La majeure partie des résultats s'inscrit dans la continuité des travaux de *Mignien et al. (2021)* afin de vérifier, à partir de données actualisées, l'existence d'éventuelles différences inter-estuariennes et inter-saisonnières dans les communautés ichtyologiques estuariennes. Le calcul d'indices de dissimilarité de Bray Curtis sous forme de matrices de distances est retenu comme un outil pertinent. Celui-ci prend en compte les abondances relatives des différentes espèces, et intègre les zéros (absences d'espèces) de manière robuste et appropriée. Largement utilisé, notamment dans l'étude de *Mignien et al. (2021)*, il est facilement interprétable et permet les comparaisons. Le calcul de l'indice est le suivant :

$$BC_{jk} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^p \min(N_{ij}, N_{ik})}{\sum_{i=1}^p (N_{ij} + N_{ik})}$$

Avec :

- N_{ij} l'abondance d'une espèce i dans l'échantillon j et N_{ik} l'abondance de la même espèce i dans l'échantillon k .
- Le terme $\min(,)$ correspondant au minimum obtenu pour deux comptes sur les mêmes échantillons. Les sommes situées au numérateur et dénominateur sont réalisées sur l'ensemble des espèces présentes dans les échantillons.

Ainsi, l'indice varie entre 0 (échantillons identiques en termes de composition spécifique et de structure d'abondances) et 1 (échantillons ne partageant aucune espèce commune et/ou comprenant des structures d'abondances différentes). La significativité des résultats est vérifiée par le test statistique de Mantel. Celui-ci permet de comparer les matrices de distances obtenues avec les matrices des différents facteurs (Année, Saison, Méthode, Station ou Zone). L'hypothèse nulle H_0 est l'absence de corrélation entre les matrices. Un coefficient de corrélation de Pearson est calculé entre chaque matrices prises deux à deux, et comparé à une distribution permutée sous l'hypothèse nulle. Une p-value égale ou inférieure à 0,05 indique alors une corrélation significative au seuil de 95% entre les valeurs de distances de Bray Curtis obtenues et le facteur considéré. À l'inverse, si la p-value est supérieure à 0,05, les valeurs de distances obtenues ne peuvent pas être expliquées significativement par le facteur considéré.

Afin de déterminer si les dissimilarités obtenues sont le fruit de groupes qui présentent des compositions spécifiques distinctes, ou simplement des structures d'abondances différentes pour des pools d'espèces identiques, nous utilisons la fonction « *indval()* » du package « *labdsv* ». Celle-ci permet de déterminer quelles sont les espèces les plus caractéristiques ou représentatives de chaque groupe définis d'échantillons. Les espèces représentatives de chaque groupe sont identifiées, ainsi que la significativité de leur indication, et leurs abondances relatives. Les abondances relatives obtenues par la fonction *indval()* peuvent servir à représenter les structures d'abondance de certaines espèces. La valeur indicatrice *indval*, exprimée en pourcentage, est calculée comme suit :

$$Indval_{ij} = A_{ij} \times B_{ij} \times 100$$

Avec :

- $A_{ij} = \frac{N_{indiv}us_{ij}}{N_{indiv}us_j}$ la spécificité, proportion moyenne d'occurrence de l'espèce i dans les échantillons du groupe j .
- $B_{ij} = \frac{N_{sites}_{ij}}{N_{sites_j}}$ la constance ou fidélité, proportion d'échantillons du groupe j où l'espèce i est présente.

Ainsi, une valeur indicatrice élevée se rapprochant de 100% indique que l'espèce est fortement associée au groupe en question. Cela peut être dû à une forte spécificité (l'espèce est fréquemment/abondamment rencontrée) et/ou à une forte constance (l'espèce est régulièrement présente dans les différents relevés).

Afin de poursuivre le raisonnement au niveau spécifique, nous pouvons déterminer les éventuelles « zones préférentielles » de différentes espèces. Pour ce faire, nous calculons le pourcentage de l'abondance moyenne des espèces par zone, par rapport à leur abondance totale dans les trois zones. Si la part de l'abondance totale de certaines espèces dans une des trois zones atteint ou dépasse 50%, on parle de zone préférentielle.

Enfin, dans le but de quantifier les influences relatives des différents facteurs sur les variations des communautés de poissons estuariennes de Guyane, des modèles linéaires généralisés (GLM) sont construits à l'aide des packages « MASS » et « car ». Une attention particulière est portée sur la sélection des variables explicatives pour éviter les facteurs colinéaires. Les variables réponses sont les indices de biodiversité préalablement calculés. Une procédure AIC (Akaike Information Criterion) est employée pour déterminer les modèles les plus pertinents, faisant un juste compromis entre qualité de l'ajustement et complexité. Les facteurs retenus peuvent alors varier d'un modèle à un autre, dans une certaine mesure. Une Anova de type III permet de quantifier l'importance de chaque facteur dans les modèles, ainsi que de tester leur significativité. Les pourcentages d'explication de la déviance¹¹ par chaque facteur sont également calculés. Pour finir, une analyse des résidus²³ (distribution selon la loi Normale) est effectuée systématiquement afin de déterminer si un passage des données au logarithme népérien est nécessaire ou pas.

3 - Résultats

3.1 - Pertinence et robustesse de la méthode d'échantillonnage

3.1.1 - Apports spécifiques et partagés des méthodes de pêche au chalut benthique et au verveux

Pour l'ensemble des campagnes de pêche réalisées en saison sèche entre 2015 et 2021, et comprenant à la fois des données issues de pêche au chalut benthique et des données issues de pêche au verveux, nous calculons des indices de dissimilarité de Bray Curtis. Afin d'éviter tout biais lié à d'éventuelles variations spatio-temporelles des communautés ichthyologiques, nous ne comparons que les données spécifiques de communauté obtenues au verveux et au chalut sur un même estuaire, dans une même zone, une même année. Les valeurs moyennes des indices de Bray Curtis obtenus et les p-values du test de Mantel correspondantes sont données par le *Tableau 1*.

Tableau 1 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis obtenues par comparaison des données de pêche obtenues au chalut benthique et au verveux sur de mêmes MET-zone-années.

Les p-values du test de Mantel en **rouge** indiquent les valeurs de dissimilarité significatives. Données de saison sèche n'incluant pas les espèces indéterminées.

			Dissimilarité moyenne de Bray Curtis chalut/verveux	p-value du test de Mantel
Kourou	Zone 1	2015	0,967	0,282
		2016	0,964	0,103
	Zone 2	2015	0,846	0,186
		2016	0,934	0,057
		2017	0,971	0,002
	Zone 3	2015	0,919	0,431
2017		0,981	0,001	
Mahury	Zone 1	2015	0,963	0,002
		2016	0,951	0,016
		2017	0,992	0,001
	Zone 2	2015	0,849	0,117
		2016	0,978	0,005
		2017	0,995	0,006
	Zone 3	2015	0,856	0,206
		2017	0,974	0,005
Montsinéry	Zone 1	2015	0,893	0,125
		2016	0,982	0,052
		2017	0,924	0,397
	Zone 2	2015	0,946	0,146
		2017	1	0,119
	Zone 3	2015	0,932	0,037
Maroni	Zone 1	2016	0,881	0,178
	Zone 2	2016	0,958	0,062
	Zone 3	2016	0,973	0,003
Mana	Zone 1	2019	0,871	0,005
	Zone 2	2018	0,908	0,001
		2018	1	0,481
	Zone 3	2019	1	0,019
		2021	0,97	0,007
Approuague	Zone 3	2019	1	0,093
		2021	1	0,002
Iracoubo	Zone 1	2019	0,933	0,001
	Zone 2	2021	0,841	0,03
	Zone 3	2021	0,973	0,014

Pour plus de la moitié des campagnes de pêche réalisées en saison sèche où les deux méthodes de pêche (chalut benthique et verveux) ont été employées, nous constatons des indices de dissimilarité significatifs élevés (>0,841). On ne pêche donc significativement pas les mêmes espèces de poisson (ou en abondances variables) au chalut benthique et au verveux, notamment en zone 1 du Mahury et sur l'Iracoubo toutes zones confondues. Notons que si la compartimentation précise des données par MET-zone-année évite certains biais, elle divise également le nombre de réplicas par modalité. Cela explique possiblement que certaines valeurs pourtant très élevées (voire égales à 1) de l'indice de Bray Curtis ne soient pas significatives.

Si l'on compare les résultats de pêche au chalut benthique et au verveux sur la même période 2015-2021, en confondant cette fois-ci les MET, zones et années, la fonction indval() permet d'identifier les espèces représentatives de chacune des deux méthodes. Les principales espèces représentatives pour lesquelles la p-value est inférieure à 0,01 sont référencées dans le *Tableau 2* avec leur abondance relative et leur valeur indicatrice pour la méthode concernée.

Tableau 2 : liste des espèces représentatives de chaque méthode de pêche (chalut benthique et verveux) avec abondances relatives et valeurs indicatrices correspondantes.
Seules les espèces représentatives dont la p-value est inférieure à 0,005 sont présentées, et classées par ordre décroissant en fonction de leur valeur indicatrice. Données de saison sèche confondant les MET et zones de salinité sur la période 2015-2021, n'incluant pas les espèces indéterminées.

	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)
Chalut benthique	<i>Stellifer rastrifer</i>	100	46,8
	<i>Aspredo aspredo</i>	100	44,8
	<i>Macrodon ancylodon</i>	99	41,7
	<i>Cathorops spixii</i>	92	35,2
	<i>Apionichthys dumerili</i>	99	31,9
	<i>Stellifer stellifer</i>	98	31,7
	<i>Gobioides broussonnetii</i>	97	25,9
	<i>Notarius rugispinis</i>	100	19,3
Verveux	<i>Sphoeroides psittacus</i>	90	40,1
	<i>Anchoviella guianensis</i>	90	15,8
	<i>Oligoplites saliens</i>	94	15,6
	<i>Pterengraulis atherinoides</i>	99	14,4
	<i>Caranx latus</i>	91	13,3
	<i>Lycengraulis grossidens</i>	78	12
	<i>Bryconops caudomaculatus</i>	100	9,7
	<i>Sphoeroides testudineus</i>	90	7,9
	<i>Mugil incilis</i>	100	7,8
	<i>Moenkhausia grandisquamis</i>	99	6,7
	<i>Tomeurus gracilis</i>	100	4,9
	<i>Acestrorhynchus microlepis</i>	100	4,8
	<i>Eleotris pisonis</i>	82	4,8
	<i>Hypostomus plecostomus</i>	92	4,5
	<i>Poptella brevispina</i>	100	3,9
	<i>Triportheus brachipomus</i>	100	3,9
	<i>Caranx hippos</i>	99	2,9
	<i>Eleotris amblyopsis</i>	100	2,9
	<i>Pristella maxillaris</i>	96	2,8

Le *Stellifer rastrifer* est l'espèce représentative par excellence pour la pêche au chalut benthique avec une valeur indicatrice de 46,8%, tandis que le *Sphoeroides psittacus* est le meilleur indicateur pour la pêche au verveux avec une valeur indicatrice de 40,1%. Les abondances relatives extrêmement élevées (entre 78 et 100%), selon la méthode utilisée, confirment les résultats précédents : chaque méthode de pêche capture des espèces différentes. Par exemple, 100% des *Stellifer rastrifer* ont été capturés au chalut benthique. On constate également que les espèces représentatives significatives au seuil de 1% sont plus nombreuses pour la pêche au verveux, mais avec des valeurs indicatrices plus faibles. En effet, la valeur indicatrice moyenne des espèces capturées principalement au chalut est de 34,7% tandis que celle des espèces principalement capturées au verveux n'est que de 9,4%. Ceci indique que les espèces représentatives du verveux sont plus « occasionnelles », moins fréquentes et/ou plus irrégulièrement présentes que celles du chalut benthique. Ceci peut être mis en lien avec l'efficacité de la méthode, considérant la capacité de certains poissons à éviter le dispositif (en sautant par-dessus par exemple).

Pour aller plus loin, nous représentons à l'aide de la *Figure 6* la contribution de chaque méthode à la richesse spécifique observée lors des différentes campagnes de pêche.

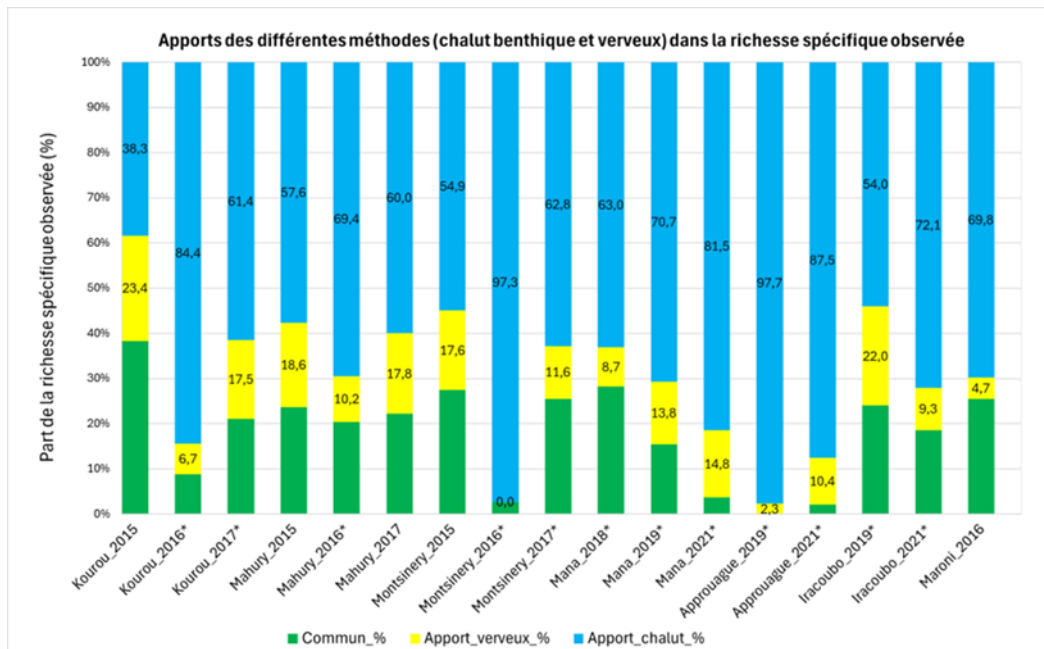


Figure 6 : part de la richesse spécifique observée propre à la pêche au verveux, au chalut benthique, ou commune aux deux méthodes, lors des différentes campagnes.

Les « * » indiquent que les verveux n'ont pas été disposés dans les trois zones de salinité pour la MET-année en question (voir Tableau 1). Données de saison sèche confondant les zones de salinité, n'incluant pas les espèces indéterminées.

Selon les années et les MET, certaines espèces de poissons sont capturées uniquement au chalut benthique (en moyenne 69,6%), d'autres uniquement par les verveux (en moyenne 12,3%), et d'autres par les deux méthodes (en moyenne 18,1%). Le chalut benthique capture donc indéniablement une part plus importante de la richesse spécifique observée, quand bien-même se priver de la pêche au verveux reviendrait à perdre 0 à 23,4% de cette richesse. Notons cependant qu'en raison de difficultés à trouver des sites de pose adaptés et comparables entre estuaires pour les verveux (Mignien et al., 2021), ceux-ci sont rarement disposés dans les trois zones de salinité lors d'une même campagne, et souvent en nombre restreint.

3.1.2 - Effort d'échantillonnage et courbes d'accumulation

Dans l'optique de vérifier la robustesse d'un protocole expérimental, les courbes d'accumulation (ou Species Accumulation Curve SAC) peuvent être un bon moyen de vérifier si l'effort d'échantillonnage est suffisant. Dans notre cas, si les courbes d'accumulation présentent une asymptote¹ horizontale (plateau), cela signifie que l'effort d'échantillonnage est suffisant et qu'augmenter le nombre de traits de chalut ou de poses de verveux ne permettrait pas d'augmenter considérablement la richesse spécifique observée. Les courbes d'accumulation sont réalisées par zone de salinité pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de l'une ou l'autre des méthodes (verveux en Figure 7 ou chalut benthique en Figure 8) sur la période 2015-2024.

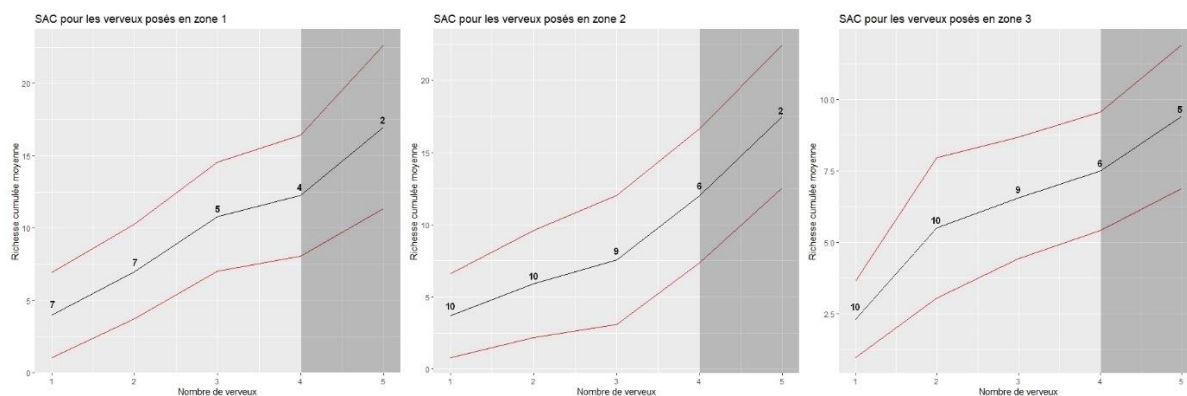


Figure 7 : courbes d'accumulation (SAC) moyennées par zone pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au verveux.

Les chiffres annotés sur la courbe d'accumulation moyennée indiquent le nombre de données disponibles pour le calcul de la moyenne, le nombre de poses de verveux allant de 2 à 5 pour les 7 à 10 campagnes de pêche concernées selon la zone. Les courbes rouges délimitent l'écart-type autour de la moyenne. En grisé, le calcul de la moyenne ne reposant plus que sur $x/2$ valeurs ou moins, x étant le nombre de campagnes de pêche de départ avec au moins 2 verveux posés. Données de saison sèche sur différentes MET, n'incluant pas les espèces indéterminées.

Les courbes d'accumulations concernant les campagnes de pêche au verveux dans les différentes zones de salinité, tous estuaires et années confondus, affichent une croissance quasi-continue. La richesse cumulée moyenne au 5^e verveux est d'environ 17 en zone 1 et 2, contre seulement 9 en zone 3. Ce résultat est lui-même à nuancer du fait que le nombre de verveux posés par campagne de pêche décroît plus ou moins vite selon la zone : seules 2 campagnes de pêche font état de 5 poses de verveux en zone 1 et 2, contre 5 en zone 3. Aucun plateau ne semble se profiler, et l'effort d'échantillonnage pour la méthode de pêche au verveux demeure donc insuffisant.

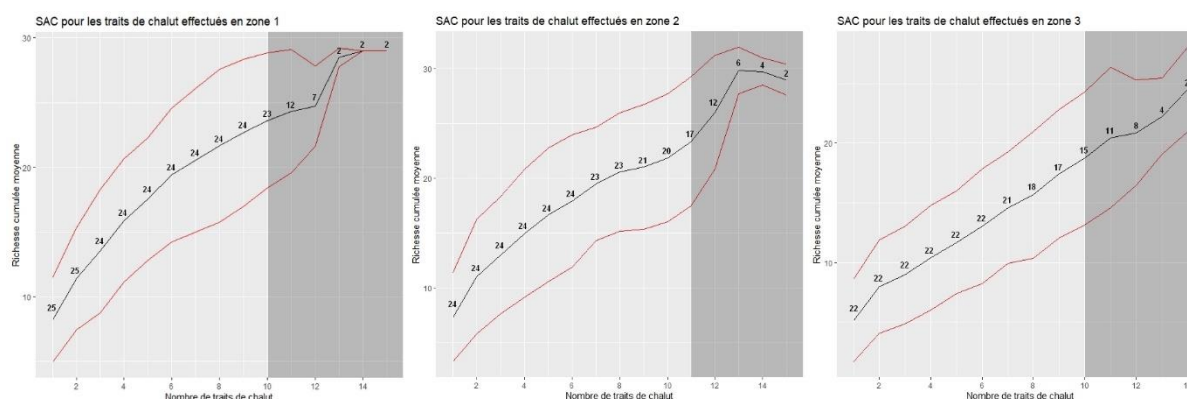


Figure 8 : courbes d'accumulation (SAC) moyennées par zone pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au chalut benthique.

Les chiffres annotés sur la courbe d'accumulation moyennée indiquent le nombre de données disponibles pour le calcul de la moyenne, le nombre de traits de chalut allant de 2 à 15 pour les 22 à 25 campagnes de pêche concernées selon la zone. Les courbes rouges délimitent l'écart-type autour de la moyenne. En grisé, le calcul de la moyenne ne reposant plus que sur $x/2$ valeurs ou moins, x étant le nombre de campagnes de pêche de départ avec au moins 2 traits de chalut. Données de saison sèche sur différentes MET, n'incluant pas les espèces indéterminées.

Si l'on exclut les zones grisées des différentes courbes d'accumulation moyennes pour les pêches au chalut benthique, la richesse cumulée moyenne se situe environ entre 19 pour la zone 3 et 24 pour les zones 1 et 2. Ce qui importe davantage ici est l'allure des courbes : un plateau semble se dessiner en zone 1 et 2 aux alentours du dixième trait de chalut. La diminution plus ou moins brusque du nombre de campagnes de pêche comptant plus de 10

traits par zone perturbée ensuite le calcul de la richesse cumulée moyenne. En zone 3 cependant, la richesse cumulée moyenne croît quasi-linéairement. Cela suggère que l'effort d'échantillonnage d'environ 10 traits de chalut est insuffisant en moyenne pour capter l'essentiel de la richesse spécifique en zone 3, et par conséquent que chaque zone de salinité pourrait nécessiter un effort d'échantillonnage qui lui est propre. Dans la *Figure 9*, nous nous affranchissons de la zonation des MET par classes de salinité.

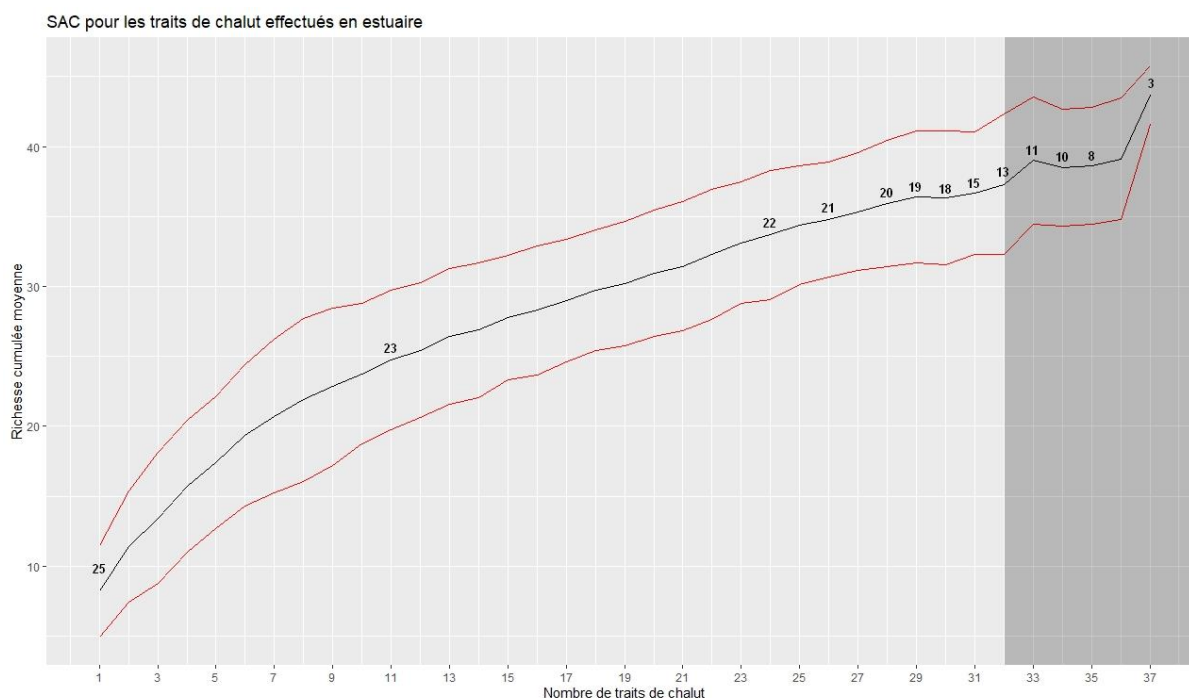


Figure 9 : courbe d'accumulation (SAC) moyennée toutes zones confondues pour l'ensemble des campagnes de pêche faisant usage de la méthode de pêche au chalut benthique.

Les chiffres annotés sur la courbe d'accumulation moyennée indiquent le nombre de données disponibles pour le calcul de la moyenne, le nombre de traits de chalut allant de 10 à 37 pour les 25 campagnes de pêche concernées. Les courbes rouges délimitent l'écart-type autour de la moyenne. En grisé, le calcul de la moyenne ne reposant plus que sur 25/2 valeurs ou moins, 25 étant le nombre de campagnes de pêche de départ avec au moins 10 traits de chalut effectués. Données de saison sèche sur différentes MET, n'incluant pas les espèces indéterminées.

A l'échelle des estuaires, pris dans leur globalité sans considération pour les zones de salinité, un plateau se dessine pour un effort d'environ 30 traits de chalut, ce qui correspond à une richesse taxonomique cumulée moyenne d'environ 37.

En raison de ces premiers résultats, des précédents (dissimilarités significatives entre prélèvements au chalut et au verveux en *Tableau 1*, contribution à la richesse observée plus importante pour le chalut que pour le verveux en *Figure 6*), et de l'abandon du verveux dans les campagnes de pêche répondant aux appels d'offres récents (2023, 2024), nous traiterons dans la suite uniquement les données issues de campagnes de pêche au chalut benthique.

3.1.3 - Zonation des estuaires

Dans cette partie, nous nous attachons à vérifier la pertinence du découpage des MET selon les 3 classes de salinité de *Habert (2012)* dans le protocole d'échantillonnage des communautés de poissons estuariennes. Des indices *Chao1* calculant une richesse estimée pour tous les traits de chalut effectués en saison sèche sur la période 2015-2024 et regroupés par zones de salinité dans la *Figure 10*.

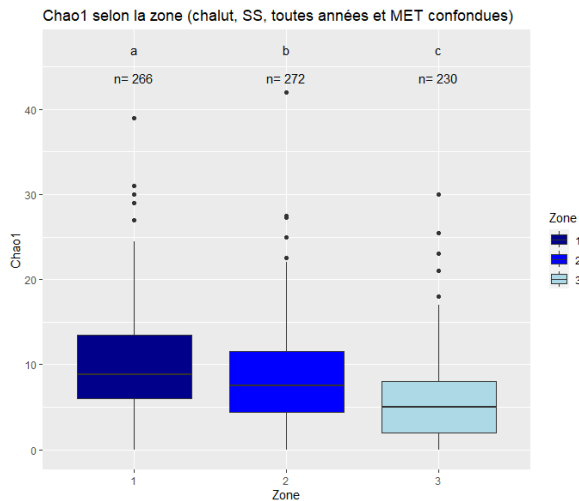


Figure 10 : indices Chao1 pour les traits de chalut réalisés en saison sèche selon la zone haline.

Test statistique de Wilcoxon avec ajustement de Bonferroni (les lettres de significativité indiquent des différences significatives). Données confondant les traits de chalut des différentes MET sur la période 2015-2024, n'incluant pas les espèces indéterminées.

Comme le suggéraient les courbes d'accumulation de la Figure 8, la zone 3 (avec une médiane d'environ 5) présente une richesse spécifique estimée significativement plus faible que les deux autres zones (avec des médianes d'environ 7 à 8). On constate également que la zone 1 présente des indices Chao1 significativement supérieurs à ceux de la zone 2. Vérifions maintenant la dissimilarité inter-zone des communautés de poissons estuariennes, détaillée en Figure 11.

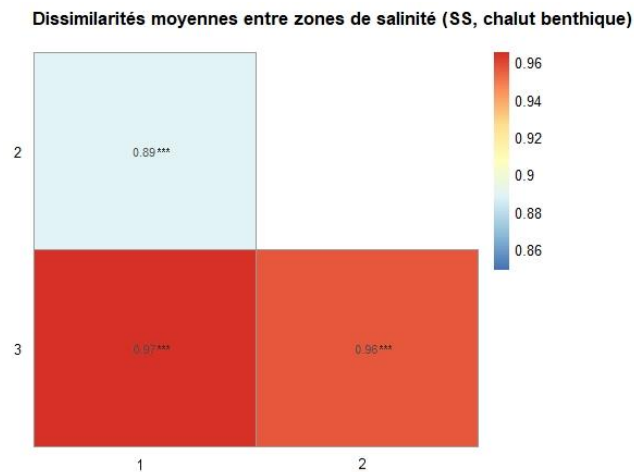


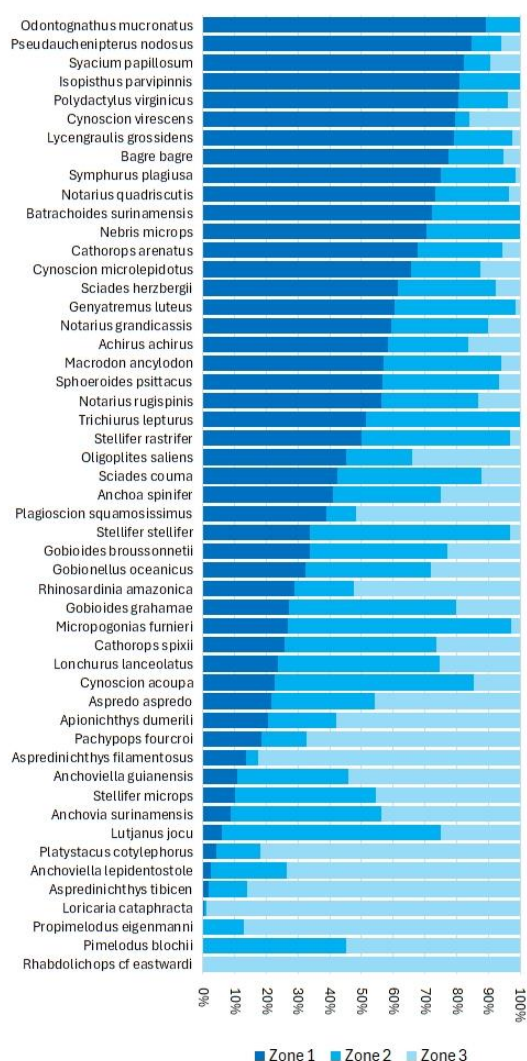
Figure 11 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis inter-zone pour les traits de chalut effectués en saison sèche sur les différents estuaires entre 2015 et 2024.

« *** » : p-value inférieure ou égale à 0,001 pour le test statistique de Mantel réalisé sur tous les traits de deux zones distinctes. Données n'incluant pas les espèces indéterminées.

Les traits de chalut effectués dans des zones de salinité distinctes, quelles qu'elles soient, sont significativement dissimilaires selon les indices de Bray Curtis. Cependant, les traits des zones 1 et 2 sont moins dissimilaires entre eux (0,89 en moyenne) qu'avec ceux de la zone 3 (respectivement 0,97 et 0,96).

Selon les résultats de la fonction indval(), *Macrodon ancylodon* est le meilleur indicateur significatif de la zone 1 avec une valeur indicatrice de 37,7%. De même, *Stellifer rastrifer* (indval = 26,7%) et *Propimelodus eigenmanni* (indval = 25,9%) sont les meilleures espèces représentatives significatives des zones 2 et 3, respectivement. La Figure 12 permet ainsi de connaître la zone préférentielle de chaque espèce.

Zones préférentielles (en pourcentage de l'abondance moyenne) de chaque espèce



Ainsi, 43,1% des 51 espèces capturées fréquemment (au moins 30 individus) au chalut benthique sur les différents estuaires lors des saisons sèches de 2015 à 2024 se trouvent préférentiellement dans la zone 1. De la même façon, 11,8% se trouvent préférentiellement dans la zone 2 et 25,5% se trouvent préférentiellement dans la zone 3. Seuls un cinquième des espèces ne présentent pas de zone préférentielle. Au regard de ces résultats et des précédents (*Figures 10 et 11*), nous fonctionnerons systématiquement par zone de salinité dans la suite des analyses.

Figure 12 : part de l'abondance totale moyenne de chaque espèce par zone de salinité.

Données de saison sèche tous estuaires confondus sur la période 2015-2024, n'incluant pas les espèces indéterminées. Un seuil arbitraire de 30 individus minimum capturés est fixé, de sorte à s'affranchir des espèces rares capturées exceptionnellement dans l'une ou l'autre des zones avec une grande part d'aléatoire.

3.2 - Indices de biodiversité et dissimilarités : comparaisons spatio-temporelles des communautés ichthyologiques des MET de Guyane

3.2.1 - Stabilité temporelle intra-MET

La stabilité temporelle des communautés ichthyologique sur un même estuaire, lors d'une même saison, et pour une même zone de salinité, est testée par calcul d'indices de dissimilarité de Bray Curtis. Les indices obtenus pour les traits de chalut d'une année sont comparés deux à deux avec ceux d'une autre année. La significativité du test de Mantel ainsi que les valeurs moyennes de dissimilarité sont données par les *Tableau 3 à 5*.

Tableau 3 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 1 d'un même estuaire selon les années.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001 pour les tests statistiques de Mantel. En gras, les résultats significatifs. En bleu, l'année 2021 particulièrement pluvieuse marquée par un phénomène « La Niña ». Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

		Maroni		Mana		Iracoubo		Kourou		Montsinéry				Mahury		Approuague	Oyapock	
		2016	2017	2018	2019	2018	2019	2015	2016	2015	2016	2017	2023	2015	2016	2019	2018	2019
Maroni	2017	0,68**																
	2018	0,82**	0,77***															
Mana	2019			0,64														
	2021			0,76***	0,68*													
Iracoubo	2019					0,61												
	2021					0,76***	0,67***											
Kourou	2016							0,95**										
	2017							0,98***	0,73									
Montsinéry	2016									0,95***								
	2017									0,95***	0,94***							
	2023									0,98***	0,93***	0,84						
	2024									0,93	0,98**	0,89	0,76					
Mahury	2016													0,89***				
	2017													0,88**	0,78*			
Approuague	2021															0,75		
Oyapock	2019																0,75**	
	2021																0,7***	0,9***

Tableau 4 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 2 d'un même estuaire selon les années.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001 pour les tests statistiques de Mantel. En gras, les résultats significatifs. En bleu, l'année 2021 particulièrement pluvieuse marquée par un phénomène « La Niña ». Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

		Maroni		Mana		Iracoubo		Kourou		Montsinéry			Mahury		Approuague	Oyapock	
		2016	2017	2018	2019	2018	2019	2015	2016	2015	2016	2017	2015	2016	2019	2018	2019
Maroni	2017	0,76***															
	2018	0,83***	0,79*														
Mana	2019			0,81*													
	2021			0,77***	0,77												
Iracoubo	2019					0,77											
	2021					0,75	0,79										
Kourou	2016							0,98***									
	2017							0,99***	0,84***								
Montsinéry	2016									1***							
	2017									1***	0,84						
	2024									0,92***	1***	1***					
Mahury	2016												0,91***				
	2017												0,97***	0,91***			
Approuague	2021														0,77*		
Oyapock	2019															0,74	
	2021															0,83**	0,82

Tableau 5 : dissimilarités moyennes des traits de chalut réalisés en zone 3 d'un même estuaire selon les années.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001 pour les tests statistiques de Mantel. En gras, les résultats significatifs. En bleu, l'année 2021 particulièrement pluvieuse marquée par un phénomène « La Niña ». Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

		Maroni		Mana		Iracoubo		Kourou		Montsinéry		Mahury		Approuague	Oyapock	
		2016	2017	2018	2019	2018	2019	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2019	2018	2019
Maroni	2017	0,82***														
	2018	0,9***	0,91**													
Mana	2019			0,96												
	2021			0,95	0,96											
Iracoubo	2019					0,83***										
	2021					0,79	0,77**									
Kourou	2016							0,93**								
	2017							0,98***	0,96***							
Montsinéry	2016									0,81						
	2017									0,91	0,77					
Mahury	2016											0,9*				
	2017											0,96***	0,9**			
Approuague	2021													0,93**		
Oyapock	2019														0,88*	
	2021														0,91***	0,81*

Les valeurs de dissimilarité interannuelle ainsi obtenues au sein des mêmes MET varient de 0,61 à 0,98 pour les traits de chalut en zone 1, de 0,74 à 1 pour ceux de la zone 2 et de 0,77 à 0,98 pour ceux de la zone 3. Ces valeurs relativement élevées, et pour la plupart significatives, suggèrent une certaine instabilité temporelle intra-estuaire des communautés ichthyologiques. Notons que le phénomène La Niña de l'année 2021 ne semble pas renforcer particulièrement ces variations temporelles, avec des valeurs de dissimilarité moyenne et des p-values comparables à celles obtenues en comparant deux années classiques ensemble.

3.2.2 - Comparaison inter-estuaire des communautés ichthyologiques

Des indices de dissimilarité de Bray Curtis sont calculés à partir des relevés sur les différentes MET en saison sèche sur la période 2015-2024, par zone de salinité (Figure 13 à 15).

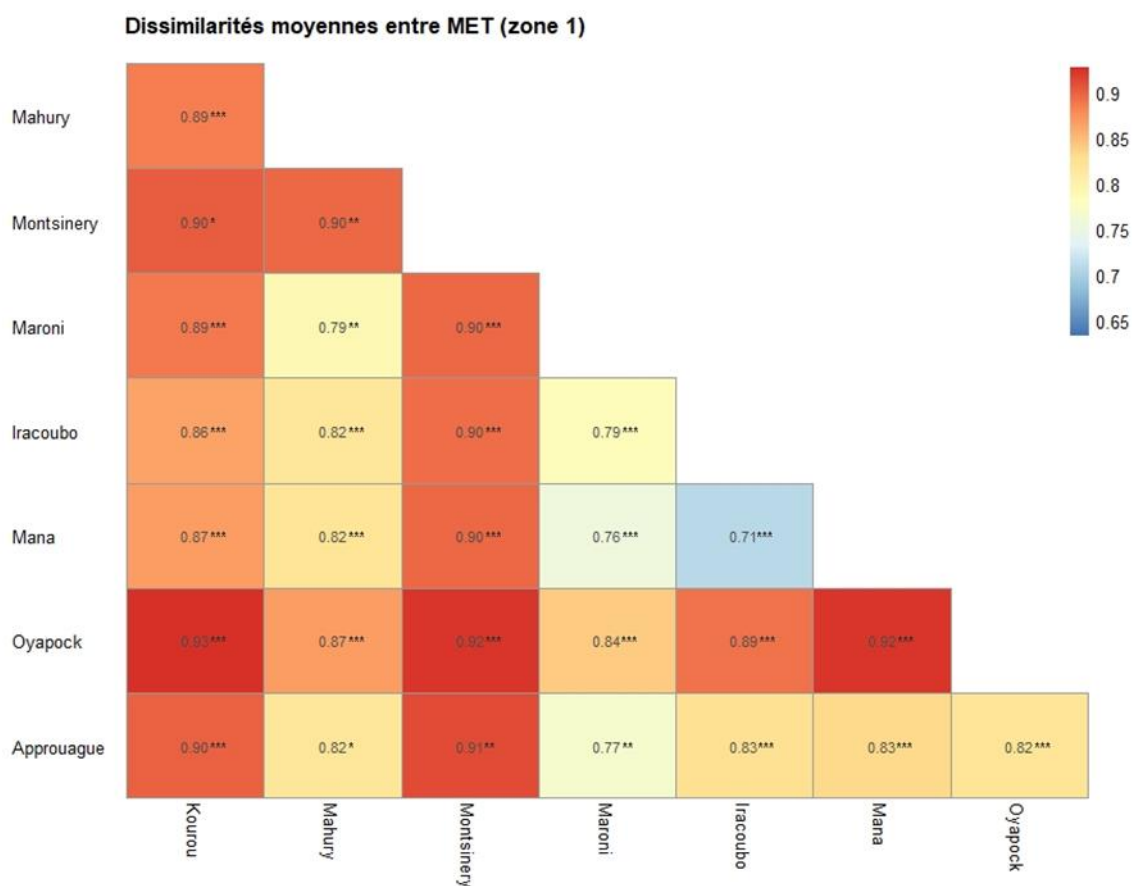


Figure 13 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 1 sur la période 2015-2024.

« * » : p-value $\leq 0,05$; « ** » : p-value $\leq 0,01$; « *** » : p-value $\leq 0,001$ pour les tests statistiques de Mantel. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

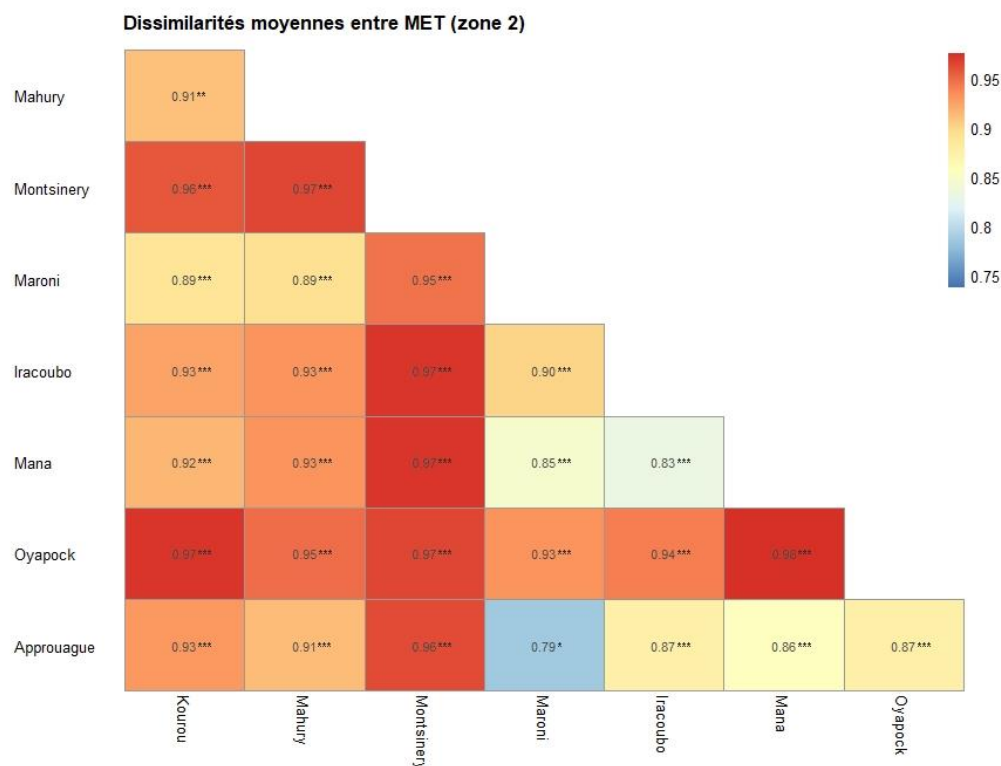


Figure 14 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 2 sur la période 2015-2024.

« * » : p-value $\leq 0,05$; « ** » : p-value $\leq 0,01$; « *** » : p-value $\leq 0,001$ pour les tests statistiques de Mantel. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

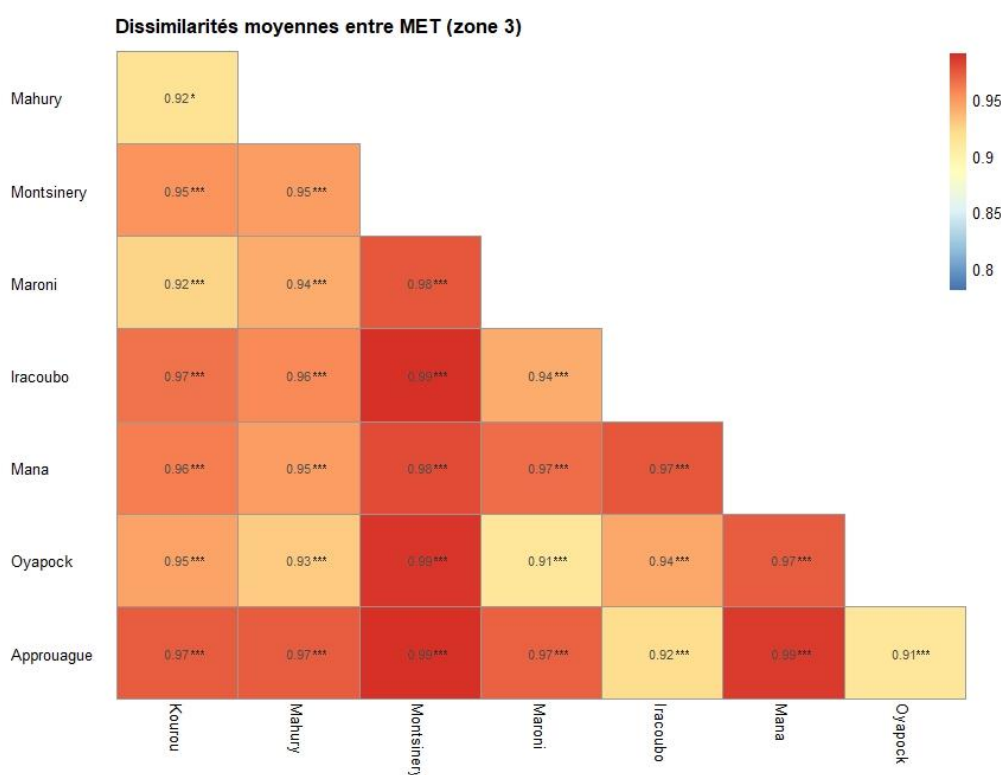


Figure 15 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre les différentes MET de Guyane pour les traits de chalut effectués en zone 3 sur la période 2015-2024.

« * » : p-value $\leq 0,05$; « ** » : p-value $\leq 0,01$; « *** » : p-value $\leq 0,001$ pour les tests statistiques de Mantel. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Données de saison sèche, n'incluant pas les espèces indéterminées.

L'ensemble des dissimilarités de Bray Curtis inter-MET obtenues à partir des traits de chalut effectués par zone de salinité en saison sèche sont significatives selon les tests statistiques de Mantel. Néanmoins, un contraste est observable, avec des valeurs moyennes de dissimilarité plus ou moins élevées entre MET comparées deux à deux.

En zone 1, une valeur minimale de 0,71 est obtenue entre les MET de la Mana et de l'Iracoubo. L'Oyapock et le Montsinéry présentent des valeurs de dissimilarité moyennes élevées avec les autres MET, allant respectivement de 0,82 à 0,93 et de 0,90 à 0,92. Le reste des MET comparées deux à deux présentent des valeurs intermédiaires, allant de 0,76 (Mana-Maroni) à 0,90 (Kourou-Approuague).

En zone 2, les valeurs moyennes de dissimilarité sont globalement plus élevées. Les tendances restent néanmoins les mêmes pour l'Oyapock et le Montsinéry, qui présentent des valeurs fortes allant respectivement de 0,87 à 0,98 et de 0,95 à 0,97. Les MET de l'Approuague et du Maroni obtiennent la valeur minimale de 0,79 et le reste des dissimilarités moyennes inter-MET oscille entre 0,83 (Mana-Iracoubo) et 0,93.

La zone 3 présente les valeurs moyennes de dissimilarité inter-MET les plus élevées, avec un minimum de 0,91 (Oyapock-Maroni et Oyapock-Approuague). Les MET du Montsinéry et de l'Approuague se distinguent alors des autres par des valeurs extrêmes atteignant 0,99.

Les résultats de la fonction *indval()* présentés dans le *Tableau 6* permettent de découvrir les espèces représentatives qui font la singularité des différentes MET, selon les zones de salinité.

Les valeurs indicatrices significatives sont très variables, allant de 6,1% (Montsinéry zone 2) à 70,8% (Iracoubo zone 3). Ainsi, nous pouvons distinguer les excellents scores d'indication de *Micropogonias furnieri* pour les zones 1 et 2 de la Mana (respectivement 68,1% et 61,9%), d'*Aspredo aspredo* pour les trois zones de l'Iracoubo (64,3% à 70,8%), d'*Aspredinichthys tibicen* également pour la zone 3 de l'Iracoubo (62,4%), et de *Bagre bagre* pour la zone 1 de l'Approuague (57,2%).

Une certaine cohérence se retrouve dans l'indication de certaines MET par une espèce, quelle que soit la zone. *Aspredo aspredo* et *Aspredinichthys tibicen* sont des indicateurs significatifs de l'Iracoubo quelle que soit la zone, tout comme *Stellifer stellifer* pour le Kourou, *Bagre bagre* pour l'Approuague, et *Lonchurus lanceolatus* pour l'Oyapock. La structure d'abondance complète de l'*Aspredo aspredo* en zone 3 des différents estuaires est présentée par la *Figure 16*. D'autres espèces peuvent être représentatives de MET différentes selon la zone de salinité. C'est par exemple le cas de *Macrodon ancylodon*, indicateur du Maroni en zone 1 et de l'Oyapock en zone 2 et 3.

En zone 3 et en saison sèche, l'*Aspredo aspredo* se trouve sur toutes les MET, sauf celle du Montsinéry. Néanmoins, sa structure d'abondance est fortement déséquilibrée, avec une part écrasante des individus pêchée sur l'Iracoubo (77,5% contre 3,2% en moyenne pour les autres estuaires).

Tableau 6 : listes des espèces indicatrices significatives des différentes MET de Guyane, obtenues à partir des données de saison sèche sur la période 2015-2024, par zone de salinité.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Les résultats de la fonction indval() sont obtenus en filtrant les données par zone de salinité et en répétant l'analyse trois fois consécutives pour les trois zones. Ainsi, les valeurs d'abondance relative et de valeur indicatrice entre les différents estuaires ne concerne que les poissons pêchés dans une même zone. Données n'incluant pas les espèces indéterminées.

Zone 1				Zone 2				Zone 3			
	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)		Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)		Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)
Maroni	<i>Cynoscion virescens</i> ***	78,2	24,6		<i>Pimelodus blochii</i> ***	83,6	18,3		<i>Anchoviella lepidontostole</i> ***	91,3	44,5
	<i>Macrodon ancylodon</i> **	28	23,2		<i>Plagioscion squamosissimus</i> **	76,6	14,9		<i>Cathorops spixii</i> **	47	26,4
Mana					<i>Cynoscion virescens</i> **	100	9,8		<i>Stellifer microps</i> *	34,9	23
	<i>Micropogonias furnieri</i> ***	74,9	68,1		<i>Anchoiella lepidontostole</i> *	85,9	8,4		<i>Plagioscion squamosissimus</i> **	40,3	19,6
	<i>Cynoscion acoupa</i> ***	58,7	39,1						<i>Pimelodus blochii</i> **	56	15
	<i>Stellifer rastrifer</i> **	28,4	25,8		<i>Micropogonias furnieri</i> ***	67,9	61,9		<i>Hypophthalmus marginatus</i> *	100	9,8
	<i>Isopisthus parvipinnis</i> ***	50,4	22,9		<i>Cynoscion acoupa</i> ***	68,1	54,1		<i>Doras micropoeus</i> ***	100	17,4
	<i>Syacium papillosum</i> **	92	11,1		<i>Stellifer rastrifer</i> **	43,6	35,9		<i>Symphurus plagiusa</i> *	100	8,7
Iracoubo					<i>Anchoa spinifer</i> *	45,2	14,6				
	<i>Aspredo aspredo</i> ***	67,8	65,7		<i>Isopisthus parvipinnis</i> **	59,7	12,3				
	<i>Gobioides grahamae</i> **	68,6	17,1		<i>Syacium papillosum</i> **	72,2	10,6				
	<i>Aspredinichthys tibenensis</i> **	40,3	10,1		<i>Oligoplites saliens</i> *	74,1	8,7				
Kourou					<i>Aspredo aspredo</i> ***	68,5	64,3		<i>Aspredo aspredo</i> ***	77,5	70,8
	<i>Notarius grandicassis</i> ***	84,6	35		<i>Aspredinichthys tibenensis</i> ***	68,3	44,8		<i>Aspredinichthys tibenensis</i> ***	99,3	62,4
	<i>Stellifer stellifer</i> **	44,6	26,2		<i>Sciades couma</i> **	48,2	10,5		<i>Platystacus cotylephorus</i> ***	88,5	53,1
	<i>Achirus achirus</i> *	38	10,5		<i>Hypnanus geijskesi</i> *	100	6,3		<i>Apionichthys dumerili</i> ***	66,1	41,5
	<i>Genyatremus luteus</i> *	36,7	10,1						<i>Loricaria cataphracta</i> ***	75,4	32,3
	<i>Chaetodipterus faber</i> *	45,2	9,3		<i>Stellifer stellifer</i> ***	64,6	42,5		<i>Propimelodus eigenmanni</i> **	32,1	22
Montsinéry					<i>Notarius grandicassis</i> ***	79,1	20,8		<i>Eleotris pisonis</i> **	100	14,3
	<i>Lycengraulis grossidens</i> ***	87,6	20,5		<i>Notarius rugispinis</i> ***	41,6	18,6		<i>Sciades couma</i> **	100	14,3
	<i>Polydactylus virginicus</i> ***	68,5	14,6		<i>Sphoeroides psittacus</i> ***	46,8	18,5		<i>Achirus achirus</i> *	46,8	10,7
	<i>Cynoscion microlepidotus</i> *	67	12,9		<i>Sciades herzbergii</i> **	57,9	10,7		<i>Sternopygus macrurus</i> *	82,4	9,4
	<i>Trypauchen vagina</i> **	100	10,6						<i>Stellifer stellifer</i> **	62,6	20,9
	<i>Sciades couma</i> *	45,3	9,9		<i>Lutjanus jocu</i> ***	80,4	24,4		<i>Cathorops arenatus</i> *	61,4	13
Mahury	<i>Rhinosardinia amazonica</i> *	100	8,5		<i>Trypauchen vagina</i> **	100	12,1				
	<i>Gobioides broussonnetii</i> ***	57,5	32,3		<i>Sphoeroides testudineus</i> *	77,6	7,1		<i>Lutjanus jocu</i> ***	100	38,5
	<i>Apionichthys dumerili</i> *	26,3	15,6		<i>Bairdiella ronchus</i> *	100	6,1		<i>Sphoeroides testudineus</i> ***	100	30,8
	<i>Odontognathus mucronatus</i> **	44,6	15,3		<i>Pachypops fourcroy</i> *	100	6,1		<i>Sphoeroides psittacus</i> **	48,3	18,6
	<i>Stellifer microps</i> *	32,6	14,3		<i>Rhinosardinia amazonica</i> *	100	6,1		<i>Lycengraulis grossidens</i> **	57,3	13,2
	<i>Platystacus cotylephorus</i> **	57	10,7		<i>Anchovia surinamensis</i> ***	82,1	42,2		<i>Pachypops fourcroy</i> *	49,5	11,4
Approuague					<i>Brachyplatystoma vaillantii</i> **	94	15,2				
	<i>Bagre bagre</i> ***	80,1	57,2						<i>Anchoviella guianensis</i> **	67,7	13
	<i>Symphurus plagiusa</i> ***	64,8	30,9		<i>Bagre bagre</i> ***	91	33,1		<i>Pimelodella geryi</i> *	100	7,7
	<i>Sciades herzbergii</i> **	67,8	19,4		<i>Gobionellus oceanicus</i> ***	81,8	18,6				
	<i>Sphoeroides psittacus</i> *	47,9	16		<i>Apionichthys dumerili</i> **	26,7	18,2		<i>Gobioides grahamae</i> ***	88,6	25,3
	<i>Notarius quadriscutis</i> ***	77,4	14,7		<i>Nebris microps</i> **	85,5	11,7		<i>Stellifer rastrifer</i> **	97,2	23,1
	<i>Trachinotus cayennensis</i> ***	100	14,3		<i>Symphurus plagiusa</i> *	43,7	9,9		<i>Bagre bagre</i> *	100	9,5
	<i>Nebris microps</i> ***	45,9	13,1						<i>Brachyplatystoma vaillantii</i> **	100	9,5
	<i>Gobionellus oceanicus</i> **	51	12,1								
Oyapock	<i>Aspredinichthys filamentosus</i> **	51,1	9,7		<i>Lonchurus lanceolatus</i> ***	81,5	50,3				
	<i>Lonchurus lanceolatus</i> ***	64,8	35,2		<i>Macrodon ancylodon</i> ***	30,1	27,5		<i>Lonchurus lanceolatus</i> **	95,9	19,7
					<i>Propimelodus eigenmanni</i> ***	35	13,4		<i>Macrodon ancylodon</i> *	75,5	17,8
					<i>Gobioides grahamae</i> *	68,5	8,1		<i>Eigenmannia limbata</i> **	100	17,6
									<i>Rhabdolichops eastwardi</i> **	100	17,6
									<i>Steatogenys elegans</i> *	100	8,8

3.2.3 - Variation saisonnière des communautés ichthyologiques

Des indices de biodiversité sont estimés ou calculés afin de comparer en première approche les données de saison sèche et de saison des pluies issues des pêches au chalut benthique. Les données sont confondues par zones et années de prélèvement, pour les MET du Montsinéry, du Maroni et du Mahury (étant les seules à avoir fait l'objet d'au moins une campagne de pêche en saison des pluies). Une série de boxplots⁴ permet une présentation graphique synthétique des résultats (Figure 17).

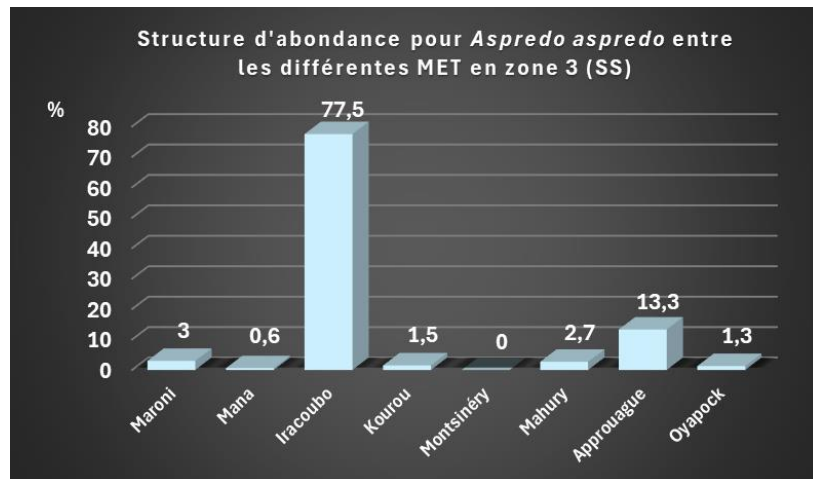


Figure 16 : structure d'abondance du poisson-chat banjo, ou « croncron » (*Aspredo aspredo*), entre MET pour la zone 3.

Données de saison sèche, toutes années confondues.

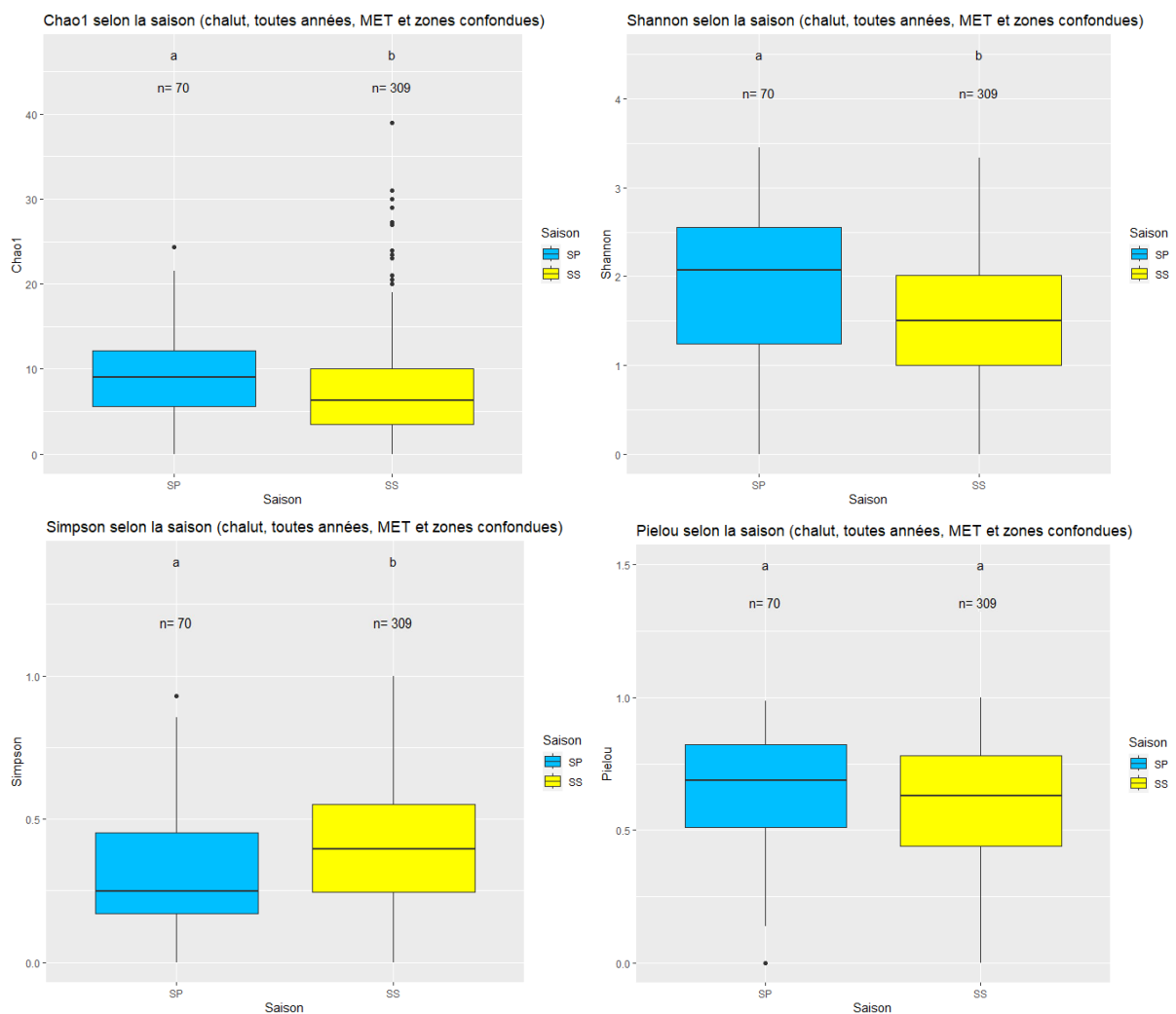


Figure 17 : comparaison saisonnière des indices de biodiversité (Chao1, Shannon, Simpson & Pielou).

SS : saison sèche. SP : saison des pluies. Test statistique de Wilcoxon avec ajustement de Bonferroni (les lettres de significativité indiquent les éventuelles différences significatives). Données de pêche au chalut benthique n'incluant pas les espèces indéterminées et confondues par zones et années de prélèvement pour les estuaires du Montsinéry, du Maroni et du Mahury.

Les prélèvements de saison des pluies affichent des indices de Shannon, de Pielou et une richesse estimée *Chao1* plus élevés que ceux de saison sèche. Ces résultats sont significatifs pour les indices de Shannon et *Chao1* selon le test de Wilcoxon avec ajustement de Bonferroni. Les indices de Simpson des prélèvements de saison des pluies sont quant à eux significativement inférieurs à ceux de saison sèche. Notons que la quantité de données disponibles diffère presque d'un facteur 5 entre saison des pluies et saison sèche, les prélèvements de saison sèche n'ayant débuté qu'en 2023 sur les trois estuaires concernés (Figure 1).

Pour le calcul des indices de dissimilarité de Bray Curtis présentés dans le *Tableau 7*, les données sont malgré tout discriminées selon la MET et la zone, mais pas l'année de prélèvement. Les indices ne sont calculés que pour comparer la saison sèche et la saison des pluies dans la même zone d'un même estuaire, avec des années de prélèvement qui diffèrent sur la période 2015-2024.

Tableau 7 : dissimilarités moyennes de Bray Curtis entre prélèvements en saison sèche et en saison des pluies sur une même MET dans une même zone de salinité.

« *** » : p-value <= 0,001 pour les tests statistiques de Mantel. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Données de pêche au chalut benthique n'incluant pas les espèces indéterminées.

			Saison sèche SS					
			Montsinéry			Maroni		Mahury
			Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Zone 3	Zone 1
Saison des pluies SP	Montsinéry	Zone 1	0,9					
		Zone 2	0,93***					
		Zone 3	0,96***					
	Maroni	Zone 1				0,74		
		Zone 3				0,86		
	Mahury	Zone 1						0,86

Les valeurs de dissimilarité moyennes obtenues entre saison sèche et saison des pluies sont plus élevées et significatives pour les zones 2 et 3 du Montsinéry (respectivement 0,93 et 0,96), moins élevées et non significatives pour les autres MET-zones (0,74 à 0,90). Les *Tableaux 8 à 10* présentent malgré tout les espèces représentatives significatives d'une saison et zone données pour les différentes MET, lorsque des données sont disponibles.

Tableau 8 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Montsinéry.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Les résultats de la fonction indval() sont obtenus en une fois, en combinant les facteurs « Saison » et « Zone ». Cela signifie que les valeurs d'abondance relative et de valeur indicatrice concernent les poissons pêchés dans les 3 zones, en saison sèche et en saison des pluies. Une croix « x » indique qu'aucune espèce représentative significative n'a été trouvée. Données n'incluant pas les espèces indéterminées.

	Zone 1			Zone 2			Zone 3		
	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)
Saison sèche	x			x			Anchovia surinamensis ** Platystacus cotylephorus * Lutjanus jocu *	82,4 86,4 48,7	25,3 19,9 18,7
Saison des pluies	Stellifer rastrifer**	55,4	55,4	Aspredo aspredo *	47,2	18,9	Sphoeroides psittacus *	41,8	31,4
	Oligoplites saliens ***	73,6	42,1				Trypauchen vagina**	46,7	29,2
	Odontognathus mucronatus**	72,1	41,2				Rhinosardinia amazonica *	62,4	23,4
	Macrodon ancylodon*	67,4	38,5				Isopisthus parvipinnis *	64,5	16,1
	Selene vomer**	71,6	30,7						
	Anchoa spinifer*	52,9	30,2						
	Bagre bagre*	61,9	26,5						
	Cathorops arenatus*	57,2	24,5						

Tableau 9 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Maroni.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Les résultats de la fonction indval() sont obtenus en une fois, en combinant les facteurs « Saison » et « Zone ». Cela signifie que les valeurs d'abondance relative et de valeur indicatrice concernent les poissons pêchés dans les 3 zones, en saison sèche et en saison des pluies. Données n'incluant pas les espèces indéterminées.

	Zone 1			Zone 2			Zone 3		
	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)
Saison sèche	<i>Stellifer rastrifer</i> *	46,5	46,5	<i>Gobioides broussonnetii</i> *	65,3	28,7	<i>Plagioscion squamosissimus</i> *	57	27,8
	<i>Macrodon ancylodon</i> *	49,7	41,2						
	<i>Isopisthus parvipinnis</i> *	96,2	27,5						
	<i>Odontognathus mucronatus</i> *	93,2	21,3						
Saison des pluies	<i>Lonchurus lanceolatus</i> ***	98,9	98,9	Absence de donnée			<i>Stellifer microps</i> *	64,6	49,7
	<i>Cathorops arenatus</i> ***	76,1	60,9				<i>Doras micropoeus</i> **	100	30,8
	<i>Cynoscion microlepidotus</i> ***	92,1	55,3				<i>Loricaria cataphracta</i> *	52,4	28,2
	<i>Sphoeroides psittacus</i> ***	90,2	54,1				<i>Plagioscion auratus</i> *	86,3	26,6
	<i>Cynoscion virescens</i> **	56,9	45,5						
	<i>Aspistor quadriscutis</i> **	100	40						
	<i>Aspredinichthys filamentosus</i> **	92,5	37						
	<i>Amphilius rugispinis</i> **	69,8	27,9						
	<i>Chaetodipterus faber</i> *	100	20						

Tableau 10 : listes des espèces représentatives significatives des différentes saisons et zone de salinité pour la MET du Mahury.

« * » : p-value <= 0,05 ; « ** » : p-value <= 0,01 ; « *** » : p-value <= 0,001. Les années de prélèvement varient selon les MET et sont données par la Figure 1. Les résultats de la fonction indval() sont obtenus en une fois, en combinant les facteurs « Saison » et « Zone ». Cela signifie que les valeurs d'abondance relative et de valeur indicatrice concernent les poissons pêchés dans les 3 zones, en saison sèche et en saison des pluies. Une croix « x » indique qu'aucune espèce représentative significative n'a été trouvée. Données n'incluant pas les espèces indéterminées.

	Zone 1			Zone 2			Zone 3		
	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)	Espèce	Abondance relative (%)	Valeur indicatrice (%)
Saison sèche	<i>Cathorops spixii</i> ***	98,5	55,4	<i>Anchovia surinamensis</i> *	81	41,6	x		
	<i>Gobioides broussonnetii</i> *	66,6	37,5						
	<i>Apionichthys dumerili</i> *	60,9	36,2						
	<i>Sphoeroides psittacus</i> *	59,8	28						
	<i>Odontognathus mucronatus</i> *	64,9	22,3						
	<i>Bagre bagre</i> *	100	12,5						
Saison des pluies	<i>Cynoscion virescens</i> ***	100	50	Absence de donnée					
	<i>Trypauchen vagina</i> ***	100	50						
	<i>Pachypops fourcroyi</i> **	98	49						
	<i>Anchoa spinifer</i> *	86,3	43,2						
	<i>Macrodon ancylodon</i> *	69,6	34,8						
	<i>Lycengraulis grossidens</i> **	94,9	31,6						
	<i>Genyatremus luteus</i> **	87,1	29						
	<i>Symphurus plagiusa</i> *	69,6	23,2						
	<i>Chaetodipterus faber</i> *	96,4	16,1						

Quelles que soient les MET et zones de salinité, nous constatons des listes d'espèces représentatives plus longues pour la saison des pluies que pour la saison sèche. Parmi les espèces représentatives, certaines présentent des scores de valeur indicatrice particulièrement élevés : *Stellifer rastrifer* (55,4%) pour la zone 1 du Montsinéry en saison des pluies, *Lonchurus lanceolatus* (98,9%), *Cathorops arenatus* (60,9%) et *Cynoscion microlepidotus* (55,3%) pour la zone 1 du Maroni en saison des pluies, et *Cathorops spixii* (55,4%) pour la zone 1 du Mahury en saison sèche.

Les structures d'abondance complètes de trois espèces de poisson (*Stellifer stellifer*, *Notarius rugispinis* et *Odontognathus mucronatus*) entre Saisons-Zones pour la MET du Montsinéry sont présentées en Figure 18.

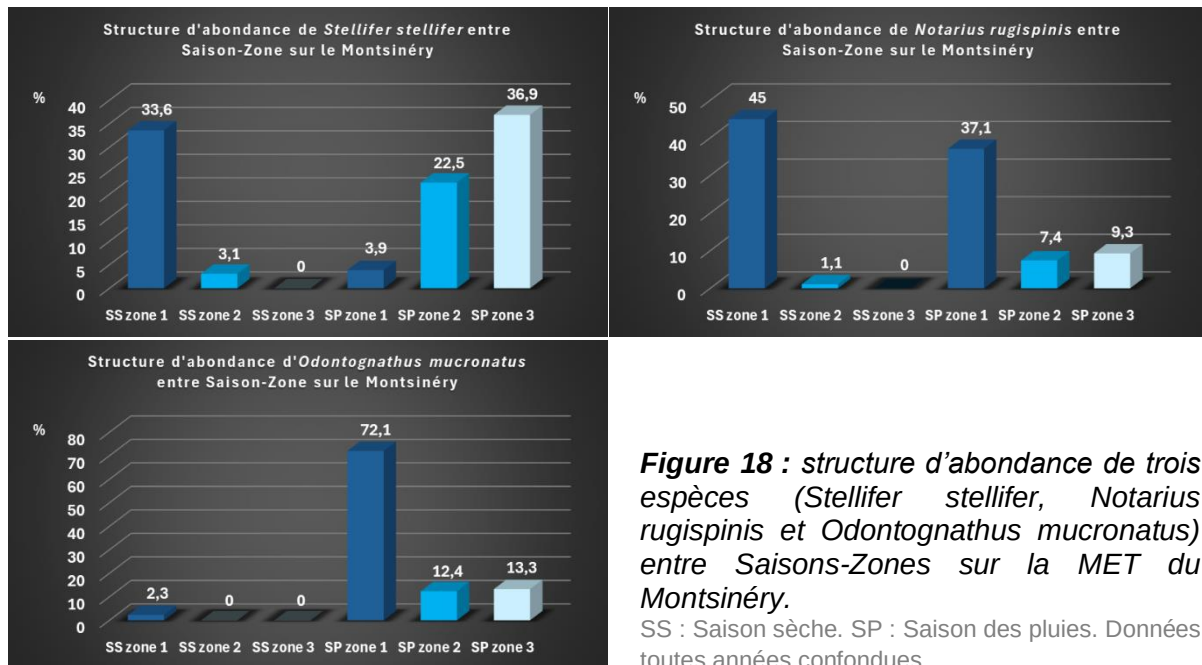


Figure 18 : structure d'abondance de trois espèces (*Stellifer stellifer*, *Notarius rugispinis* et *Odontognathus mucronatus*) entre Saisons-Zones sur la MET du Montsinéry.

SS : Saison sèche. SP : Saison des pluies. Données toutes années confondues.

Les structures d'abondance présentées à titre d'exemple illustrent trois cas. Premièrement, *Stellifer stellifer* est un poisson bien présent sur la MET du Montsinéry quelle que soit la saison (37% en SS, 63% en SP). Cependant, 92% de son abondance en saison sèche se trouve en zone 1, tandis que 94% de son abondance en saison des pluies se trouve en zone 2 et 3.

Deuxièmement, *Notarius rugispinis* est aussi présent sur la MET du Montsinéry en saison sèche (46%) comme en saison des pluies (54%). Cependant, il est aussi majoritairement présent dans une même zone quelle que soit la saison : 98% de son abondance en saison sèche se trouve en zone 1, et 69% de son abondance en saison des pluies se trouve également en zone 1.

Enfin, *Odontognathus mucronatus* est un poisson qui présente une structure d'abondance fortement déséquilibrée entre saison sèche (2%) et saison des pluies (98%). En saison des pluies sur le Montsinéry, les trois quarts de son abondance se trouvent en zone 1.

3.3 - Ajustement d'un modèle par la fonction glm()

Cette partie a pour objet la construction d'un modèle explicatif des variations des indices de biodiversité par la fonction glm(), comprenant une procédure AIC pour la sélection des facteurs les plus importants. Une attention particulière est portée sur l'exclusion des facteurs colinéaires⁶ et le choix d'interactions entre facteurs pour lesquelles les plans factoriels sont complets. Ainsi, nous retenons les facteurs et interactions suivants : « Année », « Saison », « Station », « Zone », « Profondeur moyenne », « Température », « pH », « Année*Zone », « Saison*Zone » et « Station*Zone ». Parmi eux, plusieurs sont des variables physico-chimiques continues rendues discrètes par une subdivision en classes :

- Zone : 30PSU > « 1 » ≥ 18PSU > « 2 » ≥ 5PSU > « 3 » ≥ 0PSU
- Profondeur moyenne : 1m < « 1 » ≤ 3m < « 2 » ≤ 6m < « 3 » ≤ 9m < « 4 » ≤ 12m < « 5 » ≤ 15m
- Température : 25°C < « 1 » ≤ 26°C < « 2 » ≤ 27°C < « 3 » ≤ 28°C < « 4 » ≤ 29°C < « 5 » ≤ 30°C < « 6 » ≤ 31°C < « 7 » ≤ 32°C < « 8 » ≤ 33°C
- pH : 3 < « 1 » ≤ 4 < « 2 » ≤ 5 < « 3 » ≤ 6 < « 4 » ≤ 7 < « 5 » ≤ 8 < « 6 » ≤ 9 < « 7 » ≤ 10 < « 8 » ≤ 11

Pour la richesse spécifique observée S, la procédure AIC retourne un score minimal de 4076 pour un modèle intégrant l'ensemble des facteurs et interactions, exceptés « pH » et

« Saison*Zone ». L'Anova de type III renvoie des effets plus ou moins importants de chaque facteurs (Année, Saison, Station, Zone, Profondeur moyenne, Température) et interaction (Année*Zone et Station*Zone) sur les variations de la richesse spécifique observée. Selon les p-values associées aux résultats du test F, tous ces effets sont significatifs. La déviance du modèle sans prédicateur est de 10 594 pour 799 degrés de liberté⁹, quand celle du modèle ajusté est de 6 611 sur 743 degrés de liberté. Une part conséquente des variations de la richesse spécifique observée n'est donc pas explicable par les facteurs du modèle. Des résultats similaires sont obtenus pour les modèles explicatifs des variations des autres indices de biodiversité, dont les pourcentages de déviance expliquée par chaque facteur sont donnés en *Tableau 11*.

Tableau 11 : pourcentages de déviance expliquée par les différents facteurs des modèles explicatifs des variations des indices de biodiversité.

« * » : p-value ≤ 0,05 ; « ** » : p-value ≤ 0,01 ; « *** » : p-value ≤ 0,001 pour le test F de l'Anova type III. Certains modèles font l'objet d'un passage au logarithme en vue d'améliorer la distribution des résidus. Le facteur « Station » désigne ici les différentes MET. Données de pêche au chalut benthique sur la période 2015-2024.

Variable réponse	Pourcentage de déviance expliquée par les facteurs du modèle (%)																	
Richesse observée S	=	Zone***	+	Station***	+	Prof_moy***	+	Année***	+	Température*	+	Saison*	+	Station:Zone***	+	Année:Zone*	+	Résidus
		4,65		7,74		3,83		3,15		1,44		0,54		4,77		2,79		71,09
log(Richesse estimée Chao1)	=	Zone***	+	Prof_moy***	+	Station***	+	Année***	+	Température**	+	Résidus						
		8,2		4,8		5,7		2,8		2,1		76,4						
Shannon H'	=	Prof_moy***	+	Saison*	+	Station***	+	Zone**	+	Année*	+	pH*	+	Année:Zone***	+	Station:Zone**	+	Résidus
		2,61		0,67		5,29		1,24		1,6		1,49		7,21		3,76		76,12
log(Hurlbert)	=	Station***	+	pH**	+	Prof_moy***	+	Année*	+	Zone**	+	Station:Zone***	+	Résidus				
		4		2,4		2,6		1,9		1,1		5,3		82,7				
Pielou_E	=	Zone***	+	Station**	+	pH*	+	Station:Zone**	+	Résidus								
		1,8		2,4		2		4,5		89,2								

Les facteurs et interactions retenus diffèrent pour les modèles explicatifs des variations des différents indices de biodiversité. Malgré cela, ils ont systématiquement des effets significatifs sur ces variations, à différents niveaux. La zone et la station (MET) sont deux facteurs récurrents qui se retrouvent dans tous les modèles. Ils expliquent respectivement

1,1% à 8,2% et 2,4% à 7,7% de la déviance des modèles. La profondeur moyenne et l'année de prélèvement semblent aussi être des facteurs importants. Ils sont significatifs dans la plupart des modèles et explicatifs de 2,6% à 4,8% de la déviance pour la profondeur moyenne, et de 1,6% à 3,2% de la déviance pour l'année de prélèvement. La saison de prélèvement n'apparaît comme facteur significatif que dans deux des cinq modèles, et à des niveaux excessivement bas (environ 0,6%). La principale observation qui ressort des constructions et tests de

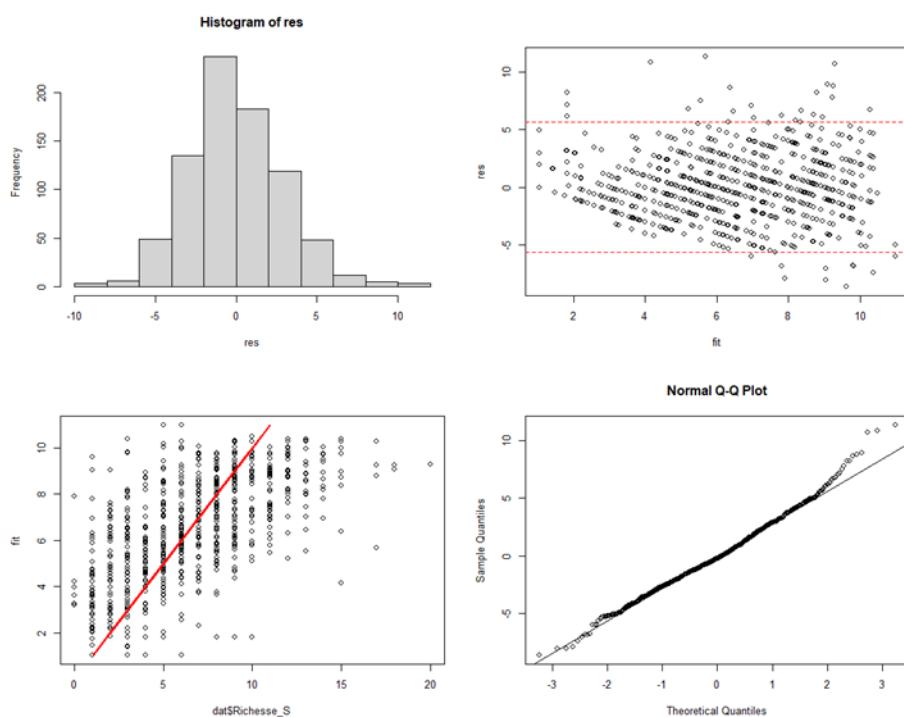


Figure 19 : analyse et distribution des résidus du modèle glm() explicatif des variations de la richesse spécifique observée.

1 : histogramme des résidus, 2 : ajustement des résidus,
3 : ajustement des richesses, 4 : Q-Q plot des résidus.

modèles est la part écrasante des résidus, expliquant 71,1% à 89,2% de la déviance de ceux-ci.

L'analyse des résidus du modèle glm() explicatif des variations de la richesse observée montre que ceux-ci se distribuent selon la loi Normale, avec une queue de distribution légèrement déséquilibrée pour les valeurs de résidus les plus élevées (*Figure 19*).

4 - Discussion

4.1 - Aspects protocolaires

Les premiers résultats portant sur les aspects protocolaires du suivi des communautés ichthyologiques estuariennes par le laboratoire Hydreco depuis 2015 ont permis de vérifier la pertinence et la robustesse des méthodes employées. En ce qui concerne la méthode de pêche, le chalut benthique permet de capturer une part plus importante de la richesse spécifique, et est plus facilement reproductible que le verveux (*Figure 6*). Cela explique que le chalut benthique fut retenu comme seule méthode pour répondre aux exigences des inventaires à réaliser dans le cadre des appels d'offres de 2023 et 2024. Néanmoins, la pêche au verveux apporte un complément intéressant, certaines espèces étant capturées quasi-exclusivement avec cette méthode et étayant une liste d'espèces représentatives relativement conséquente (*Tableau 2*). Cela fait sens, puisque les habitats échantillonnés par les deux méthodes ne sont pas les mêmes (les verveux sont disposés plus proches du bord, à la sortie de petites incursions peu profondes des estuaires dans la mangrove). Aussi, des courbes d'accumulation moyennées sur l'ensemble des campagnes de pêche au chalut benthique réalisées entre 2015 et 2024 ont permis d'estimer l'effort d'échantillonnage nécessaire (*Figure 8*). Par lecture graphique, il semble que 10 à 12 traits soient suffisant en moyenne pour capturer l'essentiel de la richesse spécifique avec cette méthode en zone 1 et 2. L'allure de la courbe en zone 3 indique que l'effort nécessaire devrait être supérieur à celui des autres zones, avec un minimum de 12 traits. Aussi, les résultats obtenus dans la présente étude sont bien le fruit d'une méthode de pêche, ne permettant d'accéder qu'à une part de la biodiversité benthique à démersale¹⁰, dans des profondeurs de 2m minimum et sur des substrats sablo-vaseux (majoritaires dans les estuaires). Le laboratoire Hydreco a récemment fait l'acquisition d'un chalut pélagique, qui devrait permettre d'accéder à une nouvelle dimension des communautés ichthyologiques à l'avenir. Des filets maillants sont aussi occasionnellement utilisés, capturant, selon la taille des mailles, des poissons de plus ou moins grande taille. Ces engins de pêche passifs permettent non seulement de pêcher plus proche du bord, mais également de ne capturer que les poissons mobiles qui se déplacent lors d'un cycle de marée. Cette mobilité des poissons capturés est une information en elle-même, à laquelle le chalut benthique ne donne pas accès, prélevant aussi bien un poisson enfoui dans la vase qu'un poisson en mouvement proche du fond. Pour en citer une dernière, la barrière chinoise est une autre méthode passive qui pourrait pêcher efficacement dans les MET, à condition d'obtenir les dérogations nécessaires pour lever l'interdiction des arrêtés préfectoraux.

Le protocole d'échantillonnage des MET suit le découpage de celles-ci en trois zones, basées sur la salinité in situ¹⁷, comme proposé par *Habert (2012)*. De fortes dissimilarités significativement corrélées au facteur « Zone » sont obtenues, avec une valeur particulièrement élevée entre les communautés de poissons de la zone 3 et celles des deux autres zones (*Figure 11*). *Bœuf et Payan (2001)* ont affirmé le lien entre salinité et taux de croissance des poissons, avec un coût métabolique de l'osmorégulation²¹ débattu selon les auteurs et les espèces, de 10% à 50% du budget énergétique total. Ainsi, pour des poissons d'eau douce de zone 3, nous pouvons supposer que les apports alimentaires d'une migration en zone 2 ne compenseraient pas la perte énergétique causée par l'augmentation de la salinité. D'après *Marshall et Grosell (2005)*, les poissons estuariens, à proprement parlé,

possèdent des cellules de transport d'ions osmosensibles qui leur permettent de faire face aux fréquents changements de salinité de leur environnement. Nous pouvons supposer que cela concerne davantage d'espèces des zones 1 et 2. Enfin, une dernière différence notable entre les zones de salinité réside dans leur proximité et leur étendue spatiale. Les zones de salinité intermédiaire sont de fait plus restreintes et plus chevauchantes que la zone 3, pouvant s'étendre en eau douce jusqu'au plus haut point d'inversion du courant de marée (c'est-à-dire souvent jusqu'au premier saut²⁵).

Sans parler d'espèce représentative, les dissimilarités des communautés ichthyologiques entre zones semblent s'expliquer à la fois par des compositions spécifiques et des structures d'abondances différentes. En effet, rappelons que seuls 20% des espèces pêchées fréquemment (au moins 30 individus) ne présentent pas de zone préférentielle (part de l'abondance moyenne supérieure ou égale à 50% dans une zone donnée) (Figure 12). En saison sèche, on constate assez clairement une diminution de la richesse spécifique à mesure que l'on remonte les estuaires, passant de la zone 1 polyhaline à la zone 2 mésohaline, puis de la zone 2 à la zone 3 oligohaline (Figure 10). Ward et al. (2002) ont montré la diversité des habitats fluviaux (barres, îles, crêtes, dépressions, digues, terrasses, cônes, deltas, plaines inondables marginales, dépôts de débris de bois...), en expliquant son maintien par l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments. Gorman et Karr (1978) avaient par ailleurs montré une corrélation entre la diversité spécifique des poissons et la complexité de l'habitat fluvial. Les richesses spécifiques significativement inférieures obtenues pour la zone 3 (Figure 10), susceptible de présenter une plus grande hétérogénéité d'habitats que les autres zones, sont donc contradictoires. Cependant, la complexité et la disparité de l'habitat fluvial pourraient expliquer l'efficacité amoindrie du chalut benthique en zone 1 (Figure 8), et par conséquent les niveaux de richesse spécifique inférieurs obtenus avec cette méthode. Les valeurs moyennes de dissimilarité globalement plus élevées en zone 3 que dans les deux autres zones (Figure 13 à 15) pourraient alors s'expliquer par une présence marquée d'espèces endémiques inféodées à des micro-habitats plus diversifiés, mais aussi à une part d'aléatoire résultant de l'efficacité amoindrie du chalut benthique dans cette zone. Alors, si le découpage en trois zones de salinité semble pertinent du point de vue écologique, il gagnerait certainement à être redétaillé pour la zone 3 en particulier. Seulement, du point de vue opérationnel, ajouter des zones augmenterait considérablement le nombre et la complexité des prélèvements sur le terrain. L'efficacité de la définition des MET par Habert (2012) réside donc dans un juste compromis entre réalité écologique et capacités opérationnelles.

Une limite de ce découpage en zones de salinité, au-delà de leurs inégales étendues spatiales, réside dans leur mobilité permanente au gré des marées et des pluies (saisonnières). Cela fait qu'il est difficile de savoir, lorsqu'une espèce est trouvée dans une zone puis une autre, si cela est le résultat d'une réelle migration de l'espèce concernée le long du gradient de salinité, ou simplement le fruit de prélèvements dans des conditions de marées ou de pluviométrie différentes. Dit autrement, est-ce les poissons ou les zones qui se déplacent ? Cette question



Figure 20 : photographie en aquarium d'un *Stellifer stellifer*.

© Hadrien Lalagüe – Hydreco

se pose par exemple pour certaines espèces courantes telles que le *Stellifer stellifer* (Figure 18 et 20), dont l'abondance maximale se trouve en zone 1 lors de la saison sèche et en zone 2 et 3 lors de la saison des pluies, sur l'estuaire du Montsinéry. Un travail visant à cartographier les abondances des espèces et le déplacement des zones entre saison sèche et saison des pluies permettrait de faciliter les interprétations.

4.2 - Différenciation des communautés entre MET

L'intégration des données de pêche des années 2019 et postérieures ont permis, avec la même méthode que *Mignien et al. (2021)*, de confirmer certaines tendances dans la comparaison inter-estuaire des communautés. La MET de l'Oyapock montre bel et bien des valeurs de dissimilarité particulièrement élevées et significativement corrélées à la comparaison des MET entre elles, en zone 1 et 2 (*Figures 13 et 14*). Cela pourrait s'expliquer par une activité de pêche illégale non déclarée et non réglementée (INN) par des navires brésiliens, particulièrement concentrée à la sortie de l'estuaire de l'Oyapock (*Levrel, 2012*) (*Annexe 1*). D'autre part, la MET du Montsinéry devient celle qui compte le plus de campagnes de pêche, et apparaît désormais comme très dissimilaire des autres MET de Guyane en termes de communautés ichthyologiques, quelle que soit la zone (*Figures 13 à 15*). La MET du Montsinéry présente des conditions particulières. Avec une superficie de bassin versant restreinte et une absence de saut, la zone 3 se contraint aux faibles apports d'eau douce de deux affluents : la crique patate et la rivière cascades (*Annexe 2*). Des données sont disponibles pour une rivière connexe de morphologie comparable, la rivière Tonnégrande, et indiquent un débit moyen annuel de 8,7m³/s (HydroPortail eaufrance). Ces particularités hydromorphologiques sont probablement à l'origine des valeurs de dissimilarité élevées des communautés ichthyologiques. Les données récentes récoltées sur l'Approuague ont aussi permis d'intégrer cette nouvelle MET aux comparaisons. Celle-ci se démarque par ailleurs des autres MET en zone 3, avec des valeurs moyennes de dissimilarité remarquables (*Figure 15*). Les campagnes de pêche sur l'Approuague ont eu lieu en 2019, et lors de l'année 2021 marquée par une importante pluviométrie en début de saison sèche avec un phénomène la Niña. En conséquence, certains prélèvements en zone 3 ont été effectués très en aval de l'estuaire, alors que d'autres ont aussi été effectués jusqu'à plus de 50km en amont de l'embouchure (*Annexe 3*). Ce large éventail de conditions de prélèvement pour la zone 3 contribuent certainement à l'obtention de données de communauté particulièrement dissimilaires des autres.

Les valeurs de dissimilarité globalement plus élevées en zone 3 qu'en zone 1 et 2 (*Figures 13 à 15*) peuvent également s'expliquer sur une échelle de temps beaucoup plus longue par l'isolement des espèces dans les milieux fluviaux d'eau douce. En effet, les espèces de zone 1 ont la possibilité de se déplacer plus ou moins le long de la côte d'un estuaire à un autre. En revanche, les communautés présentes en zone 3 sont principalement composées d'espèces d'eau douce, évoluant dans des milieux fermés et isolés sur de longues périodes. Elles résultent donc de successions de phases d'isolement et de communication entre les fleuves, survenues lors des transgressions et des régressions marines du Quaternaire (*Hubert et Renno, 2006*). Ces événements, combinés à des phénomènes de radiation adaptative et d'extinction, auraient conduit à des communautés de poissons assez distinctes entre les différents fleuves aujourd'hui.

Cependant, le résultat principal à retenir de la présente étude réside dans la significativité systématique des dissimilarités inter-estuariers par le même test de Mantel que *Mignien et al. (2021)*. Cela remet en question l'élaboration d'un indice poisson-estuaire pour « un seul type d'estuaire » qui considérerait les communautés ichthyologiques des différentes MET de Guyane comme une entité uniforme et rarement dissimilaire. Au contraire, les paramètres hydrographiques perçus comme discriminants pour les différentes MET de Guyane dans le rapport de *Mignien et al. (2021)* (débit moyen annuel, superficie du bassin versant et longueur du cours principal d'une part, largeur de l'embouchure d'autre part) pourraient se répercuter sur les communautés et expliquer leurs importantes différences. Des paramètres environnementaux, de pression, ou d'habitat propres à chaque MET pourraient également façonner les communautés ichthyologiques, et nous en évoquerons certains dans l'interprétation des modèles linéaires généralisés.

De manière générale, pour l'ensemble des calculs de dissimilarité de Bray Curtis (prenant en compte la composition spécifique mais aussi les abondances relatives des espèces), la non prise en compte des individus indéterminés à l'espèce pourrait augmenter artificiellement les scores de dissimilarité. Dans les faits, les individus indéterminés le sont souvent en raison de leur stade juvénile, rendant l'identification morphologique impossible dans la plupart des cas. Seulement, ces juvéniles (de *Stellifer* et d'*Ariidae* principalement) sont souvent présents en grand nombre, surpassant les abondances des autres espèces bien déterminées. Pour ces raisons, les inclure dans les calculs de dissimilarité diminuerait probablement les valeurs obtenues.



Figure 21 : photographie en aquarium d'un poisson-chat banjo, ou « croncron » (*Aspredo aspredo*).

© Hadrien Lalagüe – Hydreco

La fonction `indval()` permet encore une fois de faire apparaître les espèces représentatives des différentes MET, particulièrement impliquées dans les dissimilarités. Ainsi, certains estuaires se distinguent par des listes d'espèces représentatives plus étayées que les autres : Approuague en zone 1 et Iracoubo en zone 3 notamment (*Tableau 6*). Ces estuaires ont par conséquent une composition spécifique propre, avec des abondances relatives atteignant parfois 100% (espèce présente uniquement sur la MET-zone en question). Seulement, il est intéressant de constater que les MET

présentant les plus fortes valeurs moyennes de dissimilarité (Montsinéry et Oyapock en zone 1 et 2, Montsinéry et Approuague en zone 3) ne sont pas celles qui comptent le plus d'espèces représentatives significatives. La dissimilarité ne s'explique donc pas seulement par des compositions spécifiques propres, mais parfois simplement par des structures d'abondance différentes, ou même l'absence d'espèces. L'*Aspredo aspredo* en est un bon exemple (*Figures 16 et 21*). En zone 3 (comme dans les autres zones), l'*Aspredo aspredo* est un excellent indicateur de la MET de l'Iracoubo (*Tableau 6*). Or, celui-ci est aussi présent dans toutes les autres MET, exceptée celle du Montsinéry (*Figure 16*). Ainsi, il contribue à la fois à la dissimilarité entre Iracoubo et les autres estuaires par sa structure d'abondance fortement déséquilibrée, mais également entre Montsinéry et les autres estuaires par son exceptionnelle absence.

Ainsi, dans l'éventualité d'utiliser *Aspredo aspredo* comme bioindicateur de la qualité des MET, il serait bon d'expliquer sa présence remarquable sur l'Iracoubo par un facteur environnemental ou une pression anthropique variant par rapport aux autres MET. Dans son élaboration d'indice poisson-estuaire, *Mignien et al. (2021)* adopte une approche fonctionnelle en distinguant des espèces démersales, carnivores, insectivores et/ou résidentes. *Aspredo aspredo* étant une espèce résidente (*Léopold, 2004*), il serait, d'après la construction de l'indicateur par *Mignien et al. (2021)*, sensible à la dégradation des habitats et aux pollutions par les PCB (polychlorobiphényles) et HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Sa présence serait alors le témoin de la préservation et de la qualité des habitats, au moins en rapport avec une pollution faible ou nulle par les PCB et HAP. Or, il est probable que l'estuaire de Iracoubo ne présente pas des niveaux de pollution aux PCB et HAP particulièrement moins importants que ceux des 7 autres MET de Guyane, l'état chimique de la plupart des cours d'eau étant bon d'après l'état des lieux de l'Office de l'eau de la Guyane en 2019 (*Annexe 4*). La présence et l'abondance particulièrement marquées de l'*Aspredo aspredo* dans la MET de l'Iracoubo restent donc jusqu'à maintenant inexplicables.

4.3 - Différenciation saisonnière des communautés d'une même MET

Malgré des données de pêche en saison des pluies peu abondantes et lacunaires, certains résultats semblent être favorables à l'hypothèse d'une différenciation saisonnière des communautés au sein d'un même estuaire et d'une même zone. Confondant les trois zones de salinité et les MET du Montsinéry, du Maroni et du Mahury (ayant toutes trois fait l'objet d'au moins une campagne de pêche en saison des pluies), nous obtenons des différences significatives d'indice de biodiversité entre saison sèche et saison des pluies. Celles-ci concernent plus particulièrement les indices *Chao1*, de *Shannon* et de *Simpson* (Figure 17). La richesse estimée par l'indice *Chao1* apparaît par exemple significativement supérieure en saison des pluies. Cela pourrait coïncider avec les comportements d'agrégation de poissons et la présence notable d'espèces rares observés par Le Joncour et al. (2020), aux abords des estuaires guyanais en saison des pluies : bien qu'aucune tendance saisonnière significative n'ait été trouvée, les estuaires montraient des abondances et des diversités plus élevées en saison des pluies, avec cohabitation d'espèces marines et estuariennes. Rousseau et al. (2017) ont quant à eux montré que sur le Mahury, les variations de structure des communautés d'ichtyoplancton étaient davantage corrélées aux sites (mangrove située plus ou moins en amont) qu'à des variations saisonnières. Aussi, une majorité des poissons rencontrés réalisaient l'entièreté de leur cycle de vie dans les mangroves ou les estuaires. La saison n'est donc jusqu'à présent pas admise dans la littérature comme un facteur structurant clairement les communautés ichthyologiques estuariennes de Guyane.

Dans notre cas, les valeurs moyennes de dissimilarité obtenues entre les communautés sont relativement élevées, mais significativement corrélées au facteur « Saison » seulement pour les zones 2 et 3 du Montsinéry (Tableau 7). L'obtention de nouvelles données de pêche sur un estuaire donné en saison sèche et saison des pluies, si possible pour une même année, permettrait peut-être de confirmer la tendance. Les résultats de la fonction indval() indiquent un plus grand nombre d'espèces représentatives significatives pour la saison des pluies que pour la saison sèche (Tableaux 8 à 10). Il semble alors que les espèces présentes en saison sèche soient des espèces résidentes également présentes en saison des pluies (et donc représentatives d'aucune des deux saisons), comme l'ont montré Rousseau et al., 2017 pour l'ichtyoplancton. Il peut également s'agir d'espèces trop rares pour être significativement représentatives. Le poisson-chat *Notarius rugispinis* serait un bon exemple d'espèce résidente sur le Montsinéry, présente en abondance quelle que soit la saison (Figure 18 et 22). À l'inverse, une mane d'espèces représentatives significatives et non résidentes se trouvent dans les MET en saison des pluies uniquement (Tableaux 8 à 10). Le poisson-papier guyanais *Odontognathus mucronatus* en serait un bon exemple sur la MET du Montsinéry (Figure 18 et 23).



Figure 22 : photographie en aquarium d'un *Notarius rugispinis*.

© Alexandre Marceniuk - Smithsonian Tropical Research Institute

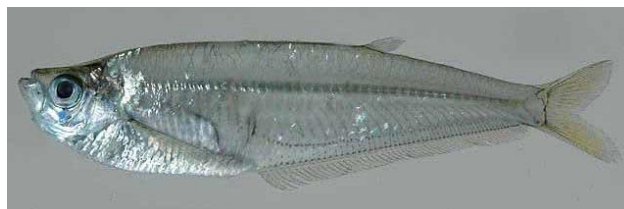


Figure 23 : photographie en aquarium d'un *Odontognathus mucronatus*.

© Smithsonian Tropical Research Institute

Nous remarquons également que certaines espèces peuvent être représentatives de la saison sèche dans une MET donnée, et de la saison des pluies dans une autre MET. C'est par exemple le cas de *Stellifer rastrifer*, *Macrodon ancylodon* et *Odontognathus mucronatus*, tous trois indicateurs significatifs de la saison sèche en zone 1 du Maroni, et de la saison des pluies en zone 1 du Montsinéry (Tableaux 8 et 9). Les paramètres hydrographiques précédemment évoqués comme potentiels facteurs

explicatifs de la structuration des communautés entre estuaires pourraient une fois de plus fournir une explication plausible, par leur variation saisonnière. En effet, le débit moyen annuel de 1700m³/s du Maroni est largement supérieur à celui des autres fleuves de Guyane (Mérona et al., 2012), y compris celui du Montsinéry. En saison des pluies, l'écart de débit du Montsinéry avec celui du Maroni en saison sèche devrait logiquement s'amenuiser. Outre la saisonnalité, le facteur « débit » pourrait alors s'avérer plus discriminant pour certaines espèces comme *Stellifer rastrifer*, *Macrodon ancylodon* et *Odontognathus mucronatus*, avec possiblement un effet « pallier » (débit limite à partir duquel l'espèce est présente/absente).

Enfin, rappelons que le climat équatorial guyanais peut être perturbé par les variations de l'ENSO. D'une année sur l'autre, les précipitations intenses causées par le phénomène « La Niña » peuvent se changer en longs épisodes de sécheresse sous l'influence d'« El Niño ». Cela aura pour effet éventuel de décaler les saisons dans le temps (dates de début, de fin et/ou durée). Jusqu'à présent, les éventuelles différences de structuration et de composition des communautés ichthyologiques estuariennes de Guyane entre mêmes saisons d'années El Niño et La Niña n'ont pas été étudiées. En effet, le critère saisonnier est relativement arbitraire (absence de valeur dérivée) et ne tient pas compte des quantités de précipitations ayant eu lieu auparavant. La prise en compte d'un facteur « débit » et/ou « précipitations cumulées » dans l'analyse pourrait permettre d'étudier plus précisément ces phénomènes.

4.4 - Importance relative des facteurs et inconnu : modélisation et limites

Divers facteurs explicatifs ont pu être cités et testés. Les données de pêche, discriminées selon ces facteurs, ont révélé des dissimilarités fortes et significatives, ou des écarts de valeur d'indices de biodiversité. Cependant, tester les dissimilarités de communautés ichthyologiques selon différents facteurs pris un à un ne renseigne pas leur implication relative dans l'explication de la variance. La construction de modèles linéaires généralisés permet de quantifier l'importance relative des différents facteurs. Une relative instabilité interannuelle des communautés de poissons d'un même estuaire, pêchés lors d'une même saison et dans une même zone, a été mise en évidence par les dissimilarités des *Tableaux 3 à 5*. Le facteur « Année » a donc été pris en compte dans la construction des modèles explicatifs de la variance de plusieurs indices de biodiversité, et retenu quatre fois sur cinq par la procédure AIC (*Tableau 11*). Cependant, le pourcentage de déviance expliqué par ce facteur ne dépasse pas 3,2% pour les modèles concernés. Bien que des variations de communauté n'impliquent pas forcément de variations de certains indices de biodiversité, ces résultats de modélisation nous permettent de reconsidérer l'influence de l'année de prélèvement, pas tellement structurant. Le facteur saisonnier est par ailleurs lui aussi extrêmement faible, retenu seulement dans deux des cinq modèles et explicatif d'environ 0,6% de la déviance. Pour autant, les remarques précédentes visant à renforcer la robustesse des analyses par l'acquisition de nouvelles données de saisonnalité restent valables. Enfin, les différents modèles font sens avec les dissimilarités inter-estuaires préalablement obtenues (*Figures 13 à 15*) puisque le facteur « Station » (c'est-à-dire les différentes MET) y est systématiquement représenté, et explique jusqu'à 7,7% de la déviance.

L'information principale émanant des modèles reste la part écrasante des résidus dans l'explication de la déviance, allant de 71 jusqu'à 89% (*Tableau 11*). Cela signifie que les facteurs sélectionnés dans la construction des modèles échouent à expliquer la majeure partie de la variance des indices de biodiversité portant sur les communautés ichthyologiques. Dit autrement, il existe probablement des variables plus pertinentes pour expliquer les fluctuations des indices portant sur les communautés des poissons estuariens en Guyane française. Cette partie vise donc à expliquer la prédominance des résidus par l'absence de certaines variables environnementales, physiques, biotiques ou anthropiques, faisant les limites de la présente étude et des perspectives intéressantes pour les travaux à venir. Nous avons montré des différences significatives de richesse entre les trois zones de salinité (*Figure 10*), le facteur « Zone » étant explicatif de 8,2% de la déviance pour le modèle portant sur les variations de

Chao1 (Tableau 11). La profondeur moyenne est explicative de 4,8% de la déviance pour le même modèle. Or, la géomorphologie des estuaires fait qu'en général, la zone aval proche de la mer est plus large et moins profonde que la zone 3, plus en amont. Effectivement, pour l'ensemble des prélèvements réalisés par Hydreco depuis 2015, confondant les saisons et les différents estuaires, des profondeurs moyennes de 4,3m, 4,5m et 5,4m sont calculées pour les zones 1, 2 et 3, respectivement. Il se pourrait alors que les facteurs « Profondeur moyenne » et « Zone » soient colinéaires pour certaines MET, réduisant la puissance explicative du modèle GLM.

Parmi les caractéristiques de l'habitat qui pourraient être porteuses d'information, le type de substrat, n'est pas pris en compte lors des prélèvements. *Mérigoux et Ponton (1998)* ont pourtant montré la spécialisation de certains poissons dans un régime alimentaire à base de débris végétaux et de substrat lors de leurs premiers stades de développement, sur le fleuve Sinnamary en Guyane française. Au sein même des différents habitats, *Gorman et Karr (1978)* ont également observé des spécialisations alimentaires sur des ressources précises. Dans les MET, les différents substrats n'ont pas la même productivité et se répartissent spatialement : en aval, les mangroves, vasières et tapis de feuilles mortes sont particulièrement productifs. Plus en amont, les bancs de sable, plus ou moins larges d'un estuaire à l'autre, apportent peu ou pas de ressources nutritives. Les systèmes productifs se trouvent plus ségrégués proches des bordures, au niveau de la ripisylve. Cela pourrait encore une fois expliquer les difficultés rencontrées par la méthode du chalut benthique en zone 3 (*Figure 8*) et les richesses inférieures qui y sont obtenues (*Figure 10*). Un type de substrat particulier peut également être prisé par certaines espèces pour leur reproduction. Ce phénomène est largement étudié pour de nombreux poissons d'eau douce et amphihalins, et *DeMartini (1991)* a par exemple montré que le succès reproducteur du poisson crapaud *Porichthys notatus* était limité par la quantité de substrat adapté à la fixation des embryons.

Un autre facteur environnemental facilement accessible mais dont les effets sont mal connus est celui de la phase lunaire. Empiriquement, les pêcheurs locaux s'accordent à dire que la pêche est meilleure 3 à 4 jours avant la pleine lune. Dans la littérature scientifique, *Gibson (2003)* a mis en évidence l'utilisation du cycle des marées dans les déplacements de certains crustacés et poissons pour la reproduction, l'alimentation ou l'évitement de prédateurs. L'isopode *Eurydice pulchra* modulait par exemple ses migrations intertidales sur une base semi-lunaire. À ce propos, le laboratoire Hydreco ne récolte pas seulement des poissons lors de ses campagnes de pêche, mais également nombre d'invertébrés aquatiques. Les crevettes, parfois présentes en grande quantité, font partie intégrante de l'alimentation des poissons estuariens. *Soe et al. (2021)* ont montré la spécialisation de certains poissons de l'estuaire tropical de la baie de Pattani, en Thaïlande, dans la prédation des crevettes. D'après les retours d'expérience des opérateurs du laboratoire Hydreco, il arrive fréquemment que les traits de chalut les plus poissonneux soient également riches en crevettes. Il serait donc pertinent de se demander si la présence de certains poissons dans les estuaires ne serait pas corrélée à celle des crevettes, et d'intégrer ce facteur biotique aux modèles.

D'autre part, le protocole exige une vitesse et un temps de traction du chalut standardisés. Cependant, sous l'effet des marées et des quantités de précipitation, le débit varie en permanence dans les MET. Le volume d'eau qui passe par le chalut benthique lors de deux traits réalisés une même durée à la même vitesse peut donc varier lui aussi. Or, certains poissons capturés étant de petite taille et ayant une faible capacité de nage, sont plus ou moins entraînés par les courants. La variation du débit, et donc du volume d'eau passant dans le chalut, y compris sur de courtes échelles de temps (quelques minutes/heures lors d'un cycle de marée), pourrait se répercuter directement sur l'abondance de ces individus charriés par les courants. Accéder au débit en temps réel par l'intermédiaire d'un débitmètre, ou retenir un facteur intermédiaire tel que le coefficient de marée, pourrait permettre de gagner en précision.

Si la part importante des espaces naturels atténue les effets de l'anthropisation pour les estuaires guyanais (*Mignien et al., 2021*), à l'image de la plupart des cours d'eau en bon état chimique (*Annexe 4*), il n'en demeure pas moins que des pressions de pêche se répartissent inégalement entre les différents estuaires. En effet, la Guyane est marquée par une importante activité de pêche INN. La production de la pêche INN serait 2,5 à 3 fois supérieure à celle de la pêche déclarée (environ 3000 tonnes) selon les estimations de l'Ifremer pour l'année 2010. Cette activité de pêche INN jette un flou lorsqu'il s'agit de quantifier précisément la pression de pêche s'exerçant sur les côtes et dans les estuaires guyanais. Cependant, *Levrel (2012)* a également cartographié la répartition des navires illégaux contrôlés ou déroutés par les autorités maritimes, et celle-ci apparaît concentrée en certains points : la plupart des navires de pêche illégaux exercent à l'Est aux abords des estuaires de l'Oyapock et de l'Approuague (navires brésiliens), ou à l'Ouest aux abords des estuaires du Maroni, de la Mana et de l'Iracoubo (navire surinamais) (*Annexe 1*).

Enfin, outre les nombreux facteurs variant en permanence et influençant probablement la distribution des espèces chacun à leur manière, la distribution très hétérogène des poissons dans les MET, parfois à échelle restreinte, relève aussi du mode de vie en banc chez certaines espèces. Face à cela, un protocole d'échantillonnage inadéquat ou un effort insuffisant peuvent renforcer une part d'aléatoire inhérente à la pêche. Il arrive en effet que d'un trait sur l'autre, tous deux effectués dans les mêmes conditions, le chalut rencontre un banc de poisson. Des écarts d'abondance majeurs peuvent alors survenir, sans que cela soit justifié par une quelconque variation des conditions environnementales. À titre d'exemple, 10 000 juvéniles d'*Ariidae* indéterminés ont été capturés sur le Montsinéry en 2023, en un seul trait de chalut. Travailler en présence-absence permettrait de s'affranchir de ces biais aléatoires mais nous priverait d'information sur les structures d'abondance qui participent aux dissimilarités entre communautés.

5 - Conclusion

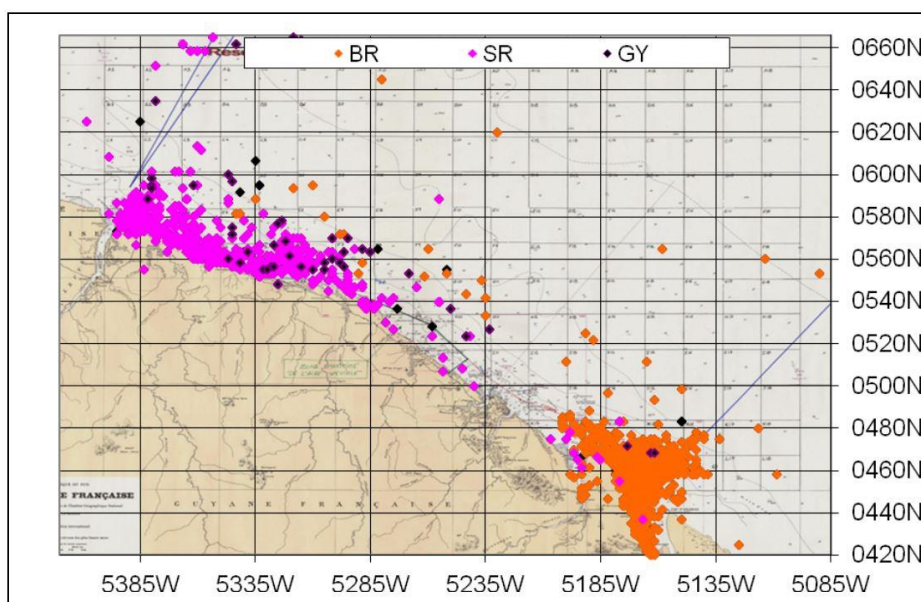
Dans la continuité des premiers résultats obtenus par *Mignien et al. (2021)*, la présente étude confirme que des dissimilarités significatives existent entre les communautés ichtyologiques des toutes les MET de Guyane, divisées en trois zones de salinité distinctes (polyhaline, mésohaline et oligohaline). Celles-ci sont dues à des variations de composition spécifique et de structures d'abondance, restant parfois inexpliquées. Alors que nous nous attendions à une stabilité interannuelle des communautés d'un même estuaire, certaines MET ont présenté des dissimilarités significatives d'une année sur l'autre, pour une même zone de salinité, toujours prélevée en saison sèche. Des modèles linéaires généralisés ont permis de nuancer ce résultat en n'attribuant qu'un très faible pourcentage de la variation d'indices de biodiversité au facteur « Année ». L'influence de la saison (saison des pluies ou saison sèche) sur la richesse et la diversité des communautés est également minime. Une partie des résultats a mis en évidence les limites du chalut benthique en tant que méthode de prélèvement et de la salinité comme seule critère de découpage structurant le plan d'échantillonnage. De ces limites doivent découler les révisions méthodologiques qui permettront de mieux prendre en compte les nombreux facteurs naturels et anthropiques qui régissent la composition et la structuration des communautés. En définitive, l'élaboration d'un indicateur fonctionnel basé sur la bio-indication des poissons, dans un milieu aussi complexe et changeant que les masses d'eau de transition, est un défi qui reste entier et fera certainement l'objet de travaux futurs.

Bibliographie

- Albert, P.** (1996). Suivi écologique des communautés de poissons en aval du barrage de Petit Saut (Guyane française).
- Barletta, M., Barletta-Bergan, A., Saint-Paul, U. and Hubold, G.** (2003). Seasonal changes in density, biomass, and diversity of estuarine fishes in tidal mangrove creeks of the lower Caeté Estuary (northern Brazilian coast, east Amazon). *Marine Ecology Progress Series* **256**, 217–228.
- Bœuf, G. and Payan, P.** (2001). How should salinity influence fish growth? *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* **130**, 411–423.
- Borcard, D., Gillet, F. and Legendre, P.** (2018). *Numerical Ecology with R*. Cham: Springer International Publishing.
- De Mérona, B. and Tejerina-Garro, F. L.** (2012). Fish-habitat relationships in French Guiana rivers: a review.
- DeMartini, E. E.** (1991). Spawning success of the male plainfin midshipman. II. Substratum as a limiting spatial resource. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **146**, 235–251.
- Elliott, M. and Quintino, V.** (2007). The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin* **54**, 640–645.
- Gibson, R. N.** (2003). Go with the flow: tidal migration in marine animals. In *Migrations and Dispersal of Marine Organisms* (ed. Jones, M. B.), Ingólfsson, A.), Ólafsson, E.), Helgason, G. V.), Gunnarsson, K.), and Svavarsson, J.), pp. 153–161. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Gorman, O. T. and Karr, J. R.** (1978). Habitat Structure and Stream Fish Communities. *Ecology* **59**, 507–515.
- Habert, A.** (2012). Redécoupage des masses d'eau de transition dans le cadre de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau. *Rapport final NBC-DEAL*, 204p.
- Hubert, N. and Renno, J.-F.** (2006). Historical biogeography of South American freshwater fishes. *Journal of Biogeography* **33**, 1414–1436.
- Kennish, M. J.** (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation* **29**, 78–107.
- Le Joncour, A., Blanchard, F. and Tagliarolo, M.** (2020). Spatio-seasonal patterns of demersal fish communities on the French Guiana Coast. *Regional Studies in Marine Science* **35**, 101105.
- Leopold, M.** (2004). Poissons de mer de Guyane : Guide illustré. *Ifremer*.
- Lepage, M., Girardin, M. and Bouju, V.** (2008). Inventaire poisson dans les eaux de transition, procédure : protocole d'échantillonnage pour les districts de la façade Atlantique et Manche.

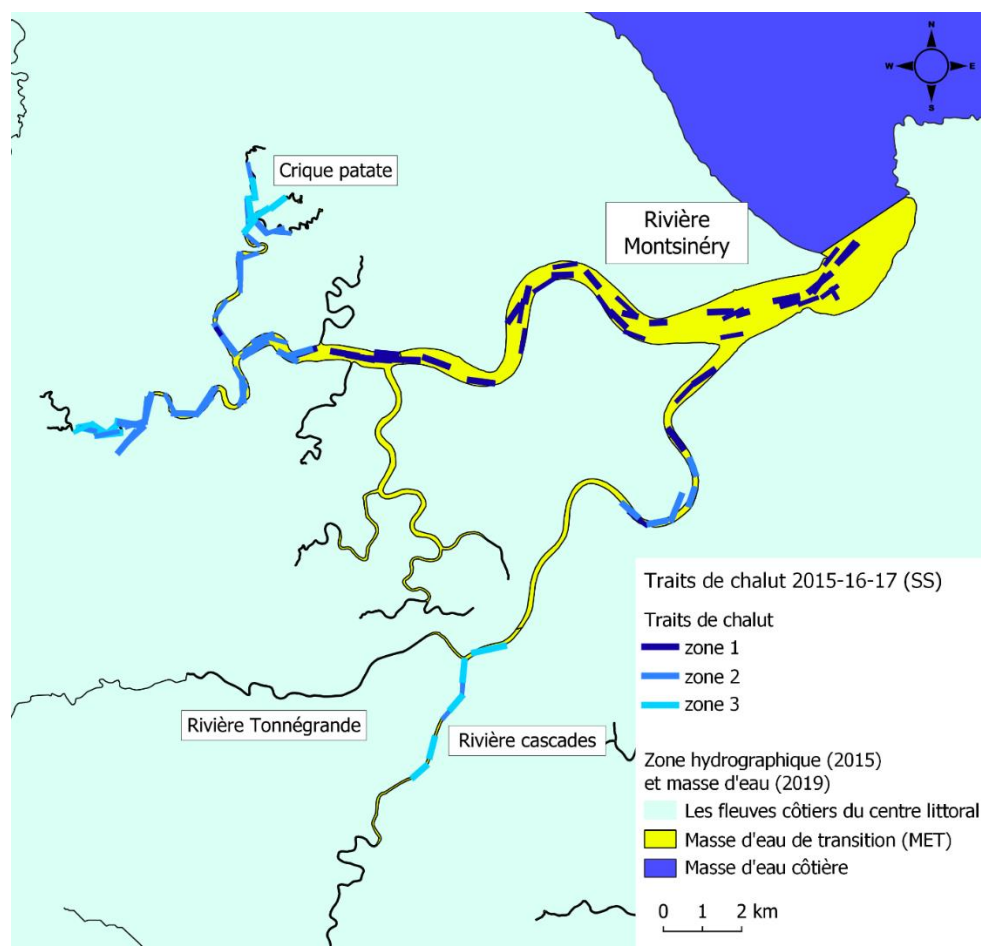
- Levrel, A.** (2012). Estimation de la pêche illégale étrangère en Guyane française. *Ifremer*.
- Marshall, W. and Grosell, M.** (2005). Ion transport, osmoregulation, and acid-base balance. *Ion Transport, Osmoregulation, and Acid-base Balance in Homeostasis and Reproduction* 177–210.
- Mérigoux, S. and Ponton, D.** (1998). Body shape, diet and ontogenetic diet shifts in young fish of the Sinnamary River, French Guiana, South America. *Journal of Fish Biology* **52**, 556–569.
- Mignien, L., Lepage, M. and Pierre, M.** (2021). Elaboration d'un indicateur poissons adapté aux Masses d'Eau de Transition de la Guyane - Projet PEGUY.
- Pérez-Domínguez, R., Maci, S., Courrat, A., Lepage, M., Borja, A., Uriarte, A., Neto, J. M., Cabral, H., St.Raykov, V., Franco, A., et al.** (2012). Current developments on fish-based indices to assess ecological-quality status of estuaries and lagoons. *Ecological Indicators* **23**, 34–45.
- Pottier, G., Bargier, N. and Vigouroux, R.** (2022). Mise à jour de l'Indice Poisson Guyane (IPG).
- Rousseau, Y., Blanchard, F. and Gardel, A.** (2017). Spatiotemporal dynamics of larval fish in a tropical estuarine mangrove: example of the Mahury River Estuary (French Guiana). *Dispersal during Early Life History of Fish* **01**, 235–246.
- Soe, K. K., Pradit, S. and Hajisamae, S.** (2021). Feeding habits and seasonal trophic guilds structuring fish community in the bay mouth region of a tropical estuarine habitat. *Journal of Fish Biology* **99**, 1430–1445.
- Tejerina-Garro, F. L. and Mérona, B. de** (2010). Flow seasonality and fish assemblage in a tropical river, French Guiana, South America. *Neotrop. ichthyol.* **8**, 145–154.
- Vanhoucke, M., Bordin, A. and Dewynter, M.** (2022). Petit Guide illustré des requins et raies de Guyane : 33 espèces des estuaires, du plateau continental et du domaine océanique. *GEPOG*.
- Ward, J. V., Tockner, K., Arscott, D. B. and Claret, C.** (2002). Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology* **47**, 517–539.

Annexes



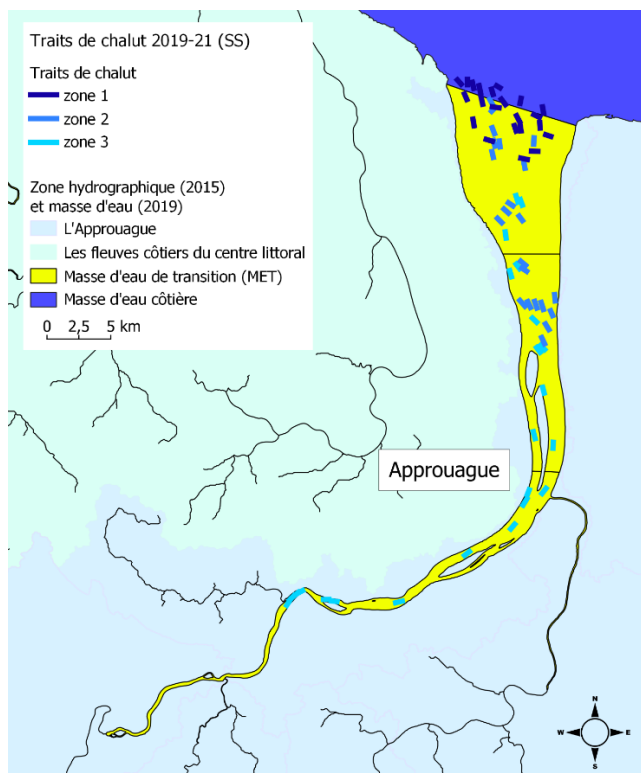
Annexe 1 : Position des navires contrôlés et ou dérivés lors des actions air/mer des autorités maritimes entre 2002 et 2012. (issu de Levrel, 2012).

BR : navires brésiliens, SR : navires surinamais, GY : navires guyaniens.



Annexe 2 : traits de chalut benthique sur la MET du Montsinéry en 2015, 2016 et 2017.

SS : saison sèche



Annexe 3 : traits de chalut benthique sur la MET de l'Approuague en 2019 et 2021.
SS : saison sèche



Annexe 4 : cartographie de l'état chimique des masses d'eau de Guyane en 2019 (issue de l'état des lieux de l'Office de l'eau de Guyane).

	Diplôme : Master Spécialité : SML-Biologie Parcours : Sciences halieutiques et aquacoles (SHA) Spécialisation / option : Gestion des pêches et des écosystèmes continentaux et côtiers (GPECC) Enseignant référent : Étienne Rivot	
Auteur(s) : Emmanuel Caussé Date de naissance* : 06/04/2001 Nb pages : 44 Annexe(s) : 4 (2 pages) Année de soutenance : 2024		Organisme d'accueil : Hydreco Guyane Adresse : 12 rue Gustave Eiffel BP 823 97310 KOUROU GUYANE Maître(s) de stage : Hadrien Lalagüe & Grégory Quartarollo
Titre français : Étude comparative spatio-temporelle des communautés ichthyologiques dans les masses d'eau de transition (MET) de Guyane française. Titre anglais : Comparative spatio-temporal study of ichthyological communities in transitional water bodies (TWB) of french Guiana.		
Résumé : Depuis 2015, le laboratoire Hydreco réalise des prélèvements d'ichtyofaune dans les principales masses d'eau de transition (MET) de Guyane française, selon un protocole standardisé de pêche au chalut benthique. Les premières données ont permis l'élaboration d'un nouvel « indicateur poisson-estuaire » adapté aux masses d'eau de transition de Guyane (<i>Mignien et al., 2021</i>). En attente de sa validation, le présent stage s'attache à intégrer les nouvelles données pour comparer les communautés de poissons entre estuaires et entre saisons. Des valeurs de dissimilarité élevées significativement corrélées aux MET et aux saisons comparées deux à deux sont obtenues. Ces résultats s'expliquent à la fois par des variations de compositions spécifiques et de structures d'abondance des communautés. Toutefois, la modélisation des variations d'indices de biodiversité montre une prédominance des résidus dans l'explication de la déviance. Une révision du modèle prenant en compte de nouvelles variables (environnementales, d'habitat, biotiques ou de pression anthropique) semble alors nécessaire à la validation d'un indicateur fonctionnel. Mignien, L., Lepage, M. and Pierre, M. (2021). Elaboration d'un indicateur poissons adapté aux Masses d'Eau de Transition de la Guyane. <i>INRAE - Projet PEGUY</i>.		
Abstract : Since 2015, the Hydreco laboratory has been collecting ichthyofauna samples in the main transitional water bodies (TWB) of French Guiana, following a standardized benthic trawling protocol. The initial data led to the development of a new fish indicator adapted to the transitional water bodies of French Guiana (<i>Mignien et al., 2021</i>). While awaiting its validation, this internship focuses on integrating the new data to compare fish communities between estuaries and seasons. High dissimilarity values, significantly correlated with the TWB and seasons when compared in pairs, have been obtained. These results can be explained by variations in species composition and community abundance structures. However, modeling the variations in biodiversity indices shows a predominance of residuals in explaining the deviance. A revision of the model, taking into account new variables (environmental, habitat, biotic, or anthropogenic pressure), seems necessary for the validation of a functional indicator. Mignien, L., Lepage, M. and Pierre, M. (2021). Elaboration d'un indicateur poissons adapté aux Masses d'Eau de Transition de la Guyane. <i>INRAE - Projet PEGUY</i>.		
Mots-clés : poisson, communauté ichthyologique, estuaire, masse d'eau de transition, Guyane Key Words: fish, ichthyological communities, estuaries, transitional water body, french Guiana		

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

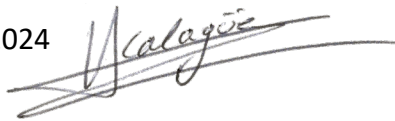
Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : 17/09/2024
(ou de l'étudiant-entrepreneur)



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ **Caussé Emmanuel**-----

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

- ☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- ☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- ☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☐ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-NC-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 10/09/24



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Date et signature de l'enseignant : le 19 sept 2024



Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la rédaction du mémoire

L'intelligence artificielle a été utilisée pour améliorer le texte ☐ Oui ☒ Non

Si oui, préciser pour quelle partie de texte et à quelles fins ?

Toute absence de déclaration précise sera considérée comme un manquement aux règles de l'éthique scientifique.

Date et Signature de l'auteur : 10/09/24



(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé