



Mémoire de stage

En vue de l'obtention de la première année de Master

De l'École Pratique des Hautes Études

Mention Sciences du Vivant – Parcours Biodiversité Environnement

Caractérisation des communautés zooplanctoniques du lagon de Mayotte : continuum rivières-récifs

Présenté par Mme Chloé Fouchs

Sous la direction de Guillaume Marchessaux et Delphine Thibault

Et le tutorat pédagogique de Erwan Delrieu-Trottin



Année universitaire 2024-2025

Le contenu et la forme de ce mémoire relèvent de la responsabilité exclusive de son auteur et de son ou ses encadrants de stage. Il n'engage ni la responsabilité de la structure d'accueil du stage, ni de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes - PSL. L'auteur atteste que les règles d'éthique et de déontologie scientifique ont été respectées pour l'ensemble de la conduite des travaux ayant conduit à la rédaction de ce mémoire.

L'Institut Méditerranéen d'Océanologie et Chloé Fouchs n'autorisent aucune diffusion de ce mémoire sans leur autorisation écrite.

Citation recommandée :

Fouchs Chloé, 2025. Caractérisation des communautés zooplanctoniques du lagon de Mayotte : continuum rivières-récifs. Mémoire de stage de première année du master Sciences du Vivant, Parcours Biodiversité – Environnement de l'Ecole Pratique des Hautes Études. 16 pages.

Introduction

Ces dernières décennies, l'océan a subi de nombreuses pressions, physiques et biogéochimiques, résultant des changements globaux induits par l'activité humaine (Doney, 2010). Parmi celles-ci, le réchauffement climatique accentue la stratification des masses d'eau, limite les apports en nutriments et perturbe les réseaux trophiques marins (Richardson, 2008). Ces modifications sont susceptibles d'affecter les organismes et le fonctionnement des écosystèmes (Doney *et al.*, 2012). Le zooplancton regroupe un ensemble d'organismes dérivants, planctoniques de manière permanente (holoplancton) ou temporaire (méroplancton, c'est-à-dire les larves d'organismes non planctoniques), largement répartis dans les milieux aquatiques et marins. Les copépodes, principaux représentants de l'holoplancton, comptent parmi les organismes pluricellulaires les plus abondants de la planète. Leur diversité et leur abondance, sensibles aux changements environnementaux, conditionnent l'équilibre des réseaux trophiques (Richardson, 2008). En jouant un rôle central dans les réseaux trophiques, en transférant l'énergie du phytoplancton vers les consommateurs supérieurs, le zooplancton contribue également au cycle du carbone et au recrutement des poissons (Huertas *et al.*, 2011). De fait, le zooplancton fait partie des organismes particulièrement sensibles aux modifications environnementales (Richardson, 2008). Température, acidification, salinité, ou événements climatiques extrêmes sont autant de facteurs susceptibles de modifier la structure et la dynamique des communautés zooplanctoniques (Schallenberg *et al.*, 2003; Richardson, 2008; Mohammed, 2013; Smith, 2016; Ratnarajah *et al.*, 2023). Des pressions anthropiques, telles que la pollution chimique ou plastique, affectent également ces communautés. Les plastiques représentent jusqu'à 80% des débris marins et, en se fragmentant, deviennent des microplastiques ingérés par les organismes, intégrant le réseau trophique (IUCN, 2021; Sharma *et al.*, 2021). Leur accumulation est accentuée dans les milieux côtiers semi-fermés (estuaires, lagons), où la circulation de l'eau est limitée (Vermeiren *et al.*, 2016). Dans ce contexte de perturbations multiples, déterminer les communautés zooplanctoniques constitue un indicateur essentiel de la dynamique des écosystèmes et de leur réponse à ces changements.

L'île de Mayotte connaît une forte croissance démographique, entraînant une intensification des pressions anthropiques, notamment liées à la gestion des déchets (Koechlin *et al.*, 1984). Le manque d'infrastructures adaptées, dont une unique décharge, aggrave la pollution, en particulier plastique, affectant les littoraux et les lagons. Un observatoire des déchets marins, créé en 2017, a révélé que la pêche et les cours d'eau sont les principales sources de transport de pollution vers la mer. Dans le cadre du projet PLASMA 2, qui a pour objectif de mieux comprendre l'origine des microplastiques, notamment via les cours d'eau, et leurs impacts sur les écosystèmes, cette étude cherche à déterminer de quelle manière les apports terrigènes

issus des rivières influencent la composition des communautés zooplanctoniques le long d'un gradient rivières-récifs à Mayotte. L'hypothèse posée est que ces apports influencent la structure des communautés, particulièrement au niveau des panaches des rivières.

Matériels et Méthodes

1 - Description des sites d'études

Mayotte, département français d'outre-mer situé dans l'archipel des Comores dans l'océan Indien, se trouve entre le continent africain et la côte nord-ouest de Madagascar. Elle se compose de plusieurs îlots, dont les deux principaux sont Grande-Terre et Petite-Terre, d'une superficie de 374 km². L'île est entourée d'un complexe récifo-lagunaire, dont près de 210 km de récifs frangeants et près de 140 km de récifs barrière, délimitant un lagon d'environ 1100 km². Ce lagon, l'un des plus grands et des mieux préservés, est caractérisé par une double barrière récifale, configuration rare à l'échelle mondiale. Plusieurs rivières se jettent dans ce lagon et une partie du littoral est bordée par des mangroves (Guilcher, 1963).

Dans le cadre du programme PLASMA 2, trois fleuves côtiers principaux (Gouloué, Maré et Ourovéni ; Fig.1) ont été choisis. Trois stations (panache, intermédiaire, et large) ont été échantillonnées pour chaque fleuve le long d'un transect partant de la côte vers le récif barrière en mars et novembre 2024 afin de couvrir les saisons humides et sèches (Fig.1). Un profil vertical de température et de salinité a été réalisé à chaque station entre la surface et le fond à l'aide d'une sonde CTD (SeaBird).

2 - Échantillonnages

Des prélèvements d'eau ont été réalisés afin de mesurer la concentration en chlorophylle-*a* (chl-*a*) à l'aide d'une bouteille Niskin à deux profondeurs : à 1 m de la surface et à 2 m au-dessus du fond. L'eau prélevée a été maintenue à l'obscurité jusqu'au retour au laboratoire. Les prélèvements de zooplancton ont été réalisés à l'aide d'un filet à zooplancton (maille de 200 µm, 60 cm de diamètre) sur l'ensemble de la colonne d'eau, de 2 m au-dessus du fond puis remontés à la main verticalement (à une vitesse ~1m s⁻¹). Le contenu du collecteur du filet a été transféré dans un flacon de 200 mL et fixé avec une solution tamponnée eau de mer/formol (concentration finale ~4%). Au total 36 échantillons d'eau pour la chl-*a* (surface et fond) et 18 échantillons de zooplancton ont été prélevés.

3 - Traitement des échantillons au laboratoire

Les échantillons d'eau de chaque station (surface et fond) ont été filtrés successivement sur 2 µm (filtre en polycarbonate) et GF/F en 2 ou 3 répliques. Ce double filtrage a permis de distinguer la chl-*a* du picophytoplancton (<2µm) et celle du nano- et microphytoplancton

(>2µm). Après filtration, les filtres ont été placés dans 5 mL d'acétone (90%) et conservés pendant 24h à 4°C dans l'obscurité afin d'extraire les pigments photosynthétiques, principalement la chl-*a*. La fluorescence des extraits a ensuite été mesurée à l'aide d'un fluorimètre (Turner Trilogy®) selon la méthode par acidification de Yentsch & Menzel (1963) modifiée par Holm-Hansen et al. (1965).

Les échantillons de zooplancton, initialement conservés au formol, ont été remis en suspension dans de l'eau fraîche sous hotte à l'aide d'un tamis de 80 µm, rincés, puis divisés en deux fractions à l'aide d'un tamis de 1000 µm (une fraction de 80-1000µm et une fraction >1000µm). Afin d'obtenir une densité optimale à l'analyse (~1500 individus), les échantillons trop denses ont été fractionnés avec une boîte Motoda. L'analyse a été réalisée avec le Zooscan, un système d'imagerie permettant d'obtenir une image numérique de l'échantillon (ou fraction analysée) pour tous les organismes de taille comprise entre 150 µm et 5 cm. Pour chaque échantillon, deux scans sont donc réalisés, soit au total, 36 scans. Chaque particule présente sur la surface du scanner est automatiquement visualisée par une vignette. L'ensemble des vignettes est alors transféré sur Ecotaxa (Picheral et al., 2017). Une pré-classification taxonomique est d'abord réalisée en utilisant différents sets d'entraînement. Chaque vignette doit ensuite être validée dans le niveau taxonomique proposé ou transférée manuellement dans la catégorie adéquate.

4 – Analyses et tests statistiques

À partir des résultats de fluorescence, la concentration en chl-*a* a été calculée selon la formule : $Chl_a \left(\frac{\mu g}{L} \right) = Fd \times \left(\frac{\tau}{\tau-1} \right) \times [(F_{avant} - F_{après})] \times \frac{V_{extrait}}{V_{filtré}}$ où Fd est le facteur de dilution, τ est le rapport d'acidification, F correspond à la fluorescence de l'échantillon, avant et après acidification, V correspond aux volumes d'eau de mer extraite et filtrée. Cette méthode permet une estimation de la concentration en chl-*a*, indicateur de la biomasse phytoplanctonique. Les concentrations de chl-*a* ont été représentées spatialement avec le logiciel Ocean Data View (version ODV 5.8.1).

L'abondance de cinq grands groupes zooplanctoniques (copépodes, autre holoplancton, méroplancton, gélatineux carnivores et gélatineux filtreurs) a été calculée et représentée spatialement à l'aide du logiciel QGIS (version 3.34). Le groupe des copépodes comprend la classe *Copepoda* (23 taxons). Le méroplancton regroupe des larves de taxons tels que les échinodermes, les bivalves ou les décapodes (17 taxons). L'autre holoplancton regroupe les autres organismes planctoniques tout au long de leur vie, tels que les *Creseidae*, les chaetognathes, ou les euphausiacés (19 taxons). Les gélatineux carnivores regroupent les cnidaires et les ctenophores (9 taxons), et les gélatineux filtreurs regroupent les tuniciers tels que

les appendiculaires (7 taxons). Au total, 75 taxons ont été identifiés dans la communauté zooplanctonique.

L'indice de diversité de Shannon a été calculé sur ces 75 taxons, selon la formule :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i) \text{ avec } p_i = (\text{nombre d'individus du taxon}) / (\text{nombre total d'individus}).$$

Afin de tester la significativité de l'effet de la saison sur les concentrations de chl-*a*, des modèles linéaires mixtes ont été utilisés, en incluant la saison comme effet fixe et la station comme effet aléatoire, afin de tenir compte de la variabilité entre les stations (package lme4 ; (Bates et *al.*, 2015)).

Afin de mettre en lien la composition des communautés zooplanctoniques avec les données environnementales (biotiques et abiotiques), une Analyse en Composantes Principales (ACP ; Pearson, 1901) avec clustering a été réalisée sous RStudio (version 2024.04.2+ 764 Chrome), à partir des variables biologiques et environnementales (FactoMineR ; Husson et *al.*, 2008). La matrice de données englobe des données environnementales (température, salinité, concentration en chlorophylle) et des données d'abondances en zooplancton des différents groupes taxonomiques. Après transformation des données en $\log(n+1)$, ces dernières ont été normalisées. L'ACP est tracée ainsi que le cercle des corrélations permettant d'identifier les facteurs influençant la composition des communautés zooplanctoniques entre les stations et entre les saisons.

Résultats

En mars, les températures variaient de 28 à 28,76 °C à Gouloué, de 29,1 à 29,7 °C à Oourovéni et de 29,22 à 29,95 °C à Maré, avec des salinités comprises entre 34,26 et 34,95, selon les stations. En novembre, les températures étaient plus élevées (28,62 à 31,77°C) et les salinités plus variables, allant de 31 à 41,5.

La concentration en chl-*a* dans la colonne d'eau varie de ~0,02 - 0,25 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à ~0,005 - 0,025 $\mu\text{g.L}^{-1}$ en mars et novembre 2024 respectivement (Fig.1). En mars, la station Gouloué présente la plus forte concentration en chl-*a* de la fraction $<2\mu\text{m}$, indiquant une dominance du picophytoplancton (~0,22 $\mu\text{.L}^{-1}$). À l'inverse, à la station Maré, c'est la fraction $>2\mu\text{m}$ qui est la plus concentrée, indiquant une prédominance du nano- et microphytoplancton. Dans l'ensemble, la concentration en chl-*a* diminue à l'approche du récif barrière, pour les deux fractions. En novembre, les concentrations en chl-*a* sont nettement plus faibles. D'après les modèles linéaires mixtes, les concentrations de chlorophylle $<2\mu\text{m}$ ($p = 8,8 \cdot 10^{-6}$) et $>2\mu\text{m}$ ($p = 1,7 \cdot 10^{-8}$) étaient significativement plus faibles lors de la campagne de novembre. La station Gouloué reste celle où la fraction $<2\mu\text{m}$ est la plus élevée, indiquant la dominance du picophytoplancton (~0,012 $\mu\text{.L}^{-1}$). Contrairement à mars, la concentration semble augmenter vers le récif pour cette fraction

à Gouloué. Aucune tendance marquée ne se dégage pour les autres stations, où les différences sont plus faibles.

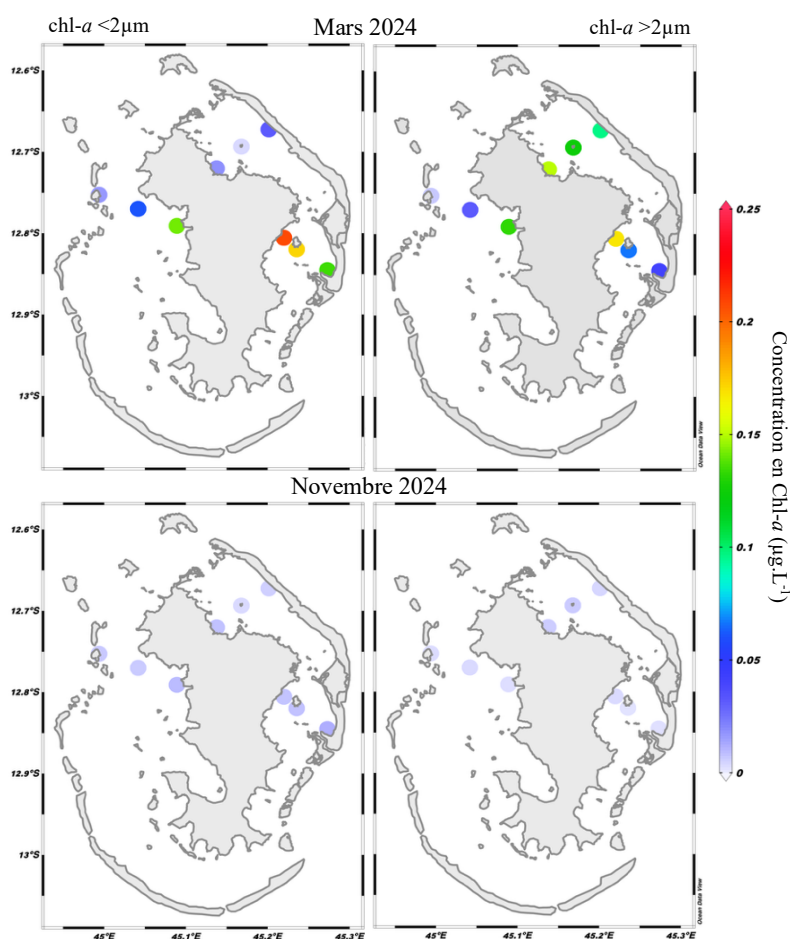


Figure 1 : Concentration de la chlorophylle-a dans la colonne d'eau des fractions $< 2\mu\text{m}$ et $> 2\mu\text{m}$ à Mayotte en mars et novembre 2024

La composition des communautés zooplanctoniques est représentée sous forme de camemberts, dont la taille représente l'abondance totale, tandis que les parts indiquent l'abondance de chaque groupe. En mars, l'abondance zooplanctonique totale est plus élevée qu'en novembre (moyenne \pm écart-type : $1010,88 \pm 732,48$ contre $682,59 \pm 413,74$ ind/m³) (Fig.2 ; détails en Annexe 1). En mars et en novembre, la station Gouloué présente la plus forte abondance en zooplancton ($2565,46$ ind/m³ en mars au large et $1414,42$ ind/m³ en novembre au panache), dominée par les copépodes (moyenne \pm écart-type : $1008,18 \pm 706,54$ en mars, $573,54 \pm 236,37$ en novembre), puis les gélatineux filtreurs (moyenne \pm écart-type : $436,73 \pm 78,4$ en mars, $331,09 \pm 54,24$ en novembre). En mars, l'abondance augmente vers le large, alors qu'elle tend à diminuer en novembre. Les communautés des stations Maré et Ourovéni, moins abondantes, sont également dominées par les copépodes. Par ailleurs, les indices de Shannon montrent qu'en mars, les stations situées au large présentent les valeurs les plus faibles (Gouloué large : $H' = 1,66$). À l'inverse, les stations du panache, comme Gouloué et Maré présentent les

indices les plus élevés ($H' = 2,38$ et $2,39$) respectivement. En novembre, Gouloué intermédiaire se distingue par l'indice le plus haut ($H' = 2,37$), et Maré large par le plus faible ($H' = 1,61$).

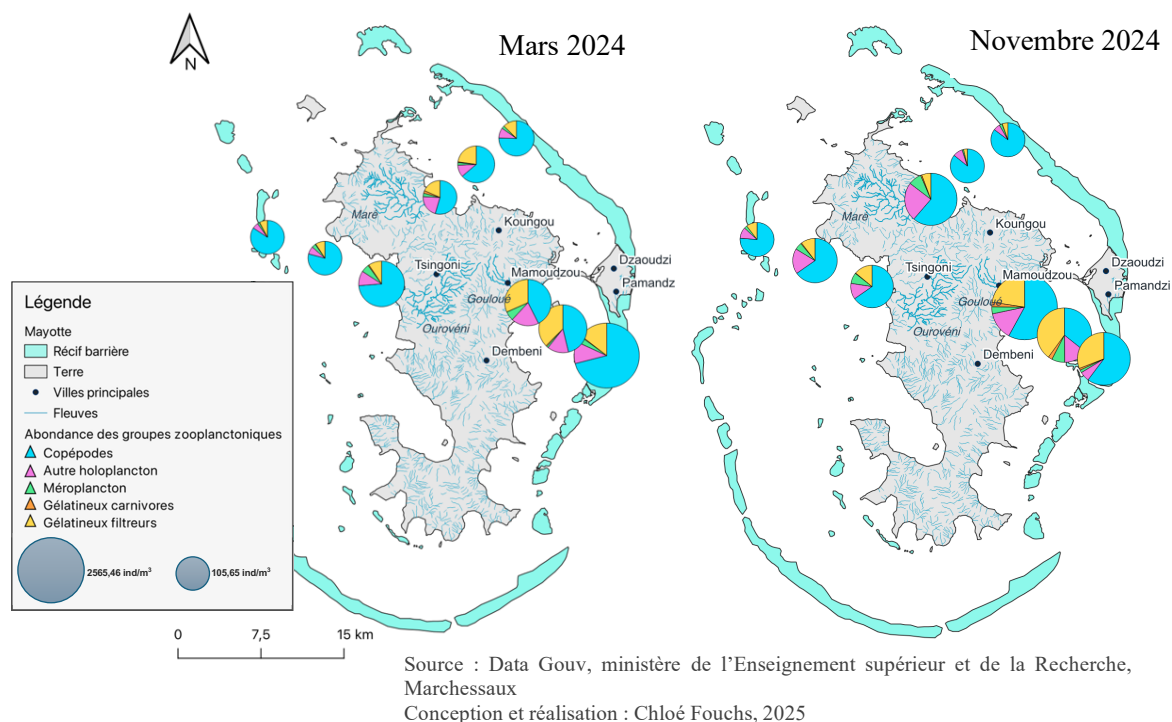


Figure 2 : Composition et abondances des communautés zooplanctoniques à Mayotte en mars et novembre 2024

Une ACP a été réalisée sur l'ensemble des variables environnementales et biologiques, afin d'explorer leurs relations et les patterns entre stations. Les deux axes expliquent ensemble 67,96% de la variabilité (Fig.3). Les stations sont projetées sur le plan factoriel et regroupées en quatre clusters par ellipse (Fig.3A), selon leur composition environnementale et biologique. Le cercle des corrélations (Fig.3B) indique comment chaque variable est corrélée aux deux axes principaux. Le cluster bleu regroupe Gouloué et Ourovéni panache en mars, caractérisées par des concentrations élevées en chl-*a*, une forte abondance zooplanctonique (méroplancton, holoplancton, copépodes et gélatineux filtreurs) et des températures plus faibles. Le cluster rouge regroupe des stations de novembre (Ourovéni panache et intermédiaire, Maré panache et large), qui sont marquées par des températures plus élevées et de faibles concentrations de chl-*a*. Le cluster vert, regroupant Gouloué panache et intermédiaire en novembre, se distingue des autres par une salinité et une température plus élevée, ainsi qu'une composition zooplanctonique dominée par les filtreurs carnivores. Enfin, le cluster noir regroupe des stations de mars et de novembre, principalement Maré et Ourovéni, et traduit des conditions intermédiaires.

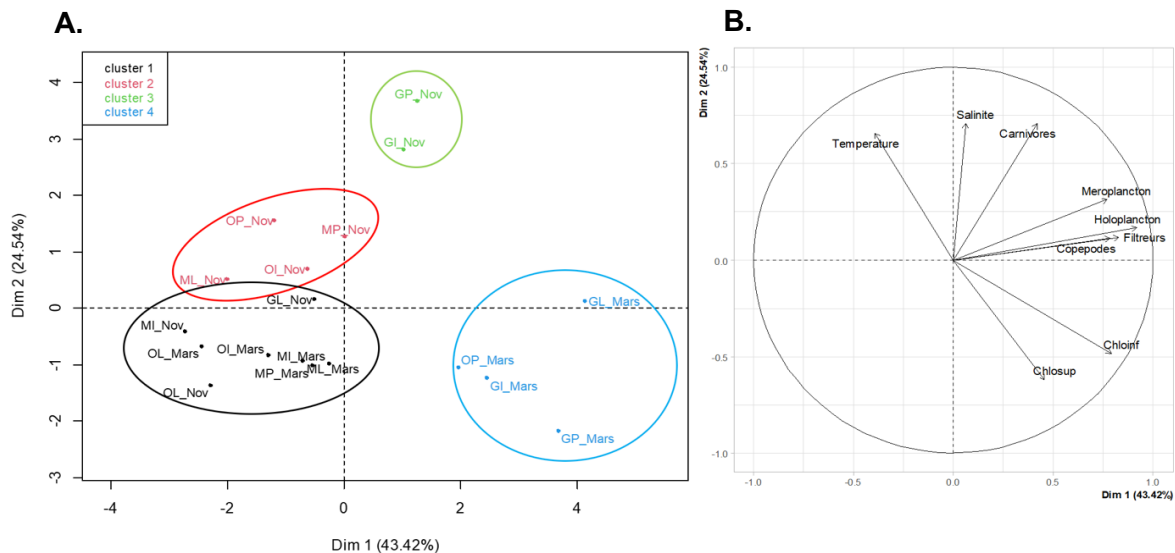


Figure 3 : Analyse en composantes principales de la composition zooplanctonique à Mayotte (A : Plan factoriel de l'ACP, B : Cercle des corrélations).

Discussion

Les résultats mettent en évidence une structure des communautés zooplanctoniques autour de plusieurs facteurs : la position des stations (panache, intermédiaire, large), la temporalité de l'échantillonnage, ainsi que les paramètres environnementaux tels que la salinité, la température ou la concentration en chl-*a*. Cette structure reflète une réponse des communautés aux variations des conditions du milieu.

La plus grande abondance de zooplancton a été observée au mois de mars (moyenne \pm écart-type : $1010,88 \pm 732,48$), pendant la saison humide, comme identifié par Paula et al. (1998) sur le plateau du Mozambique, à la suite des apports fluviaux de la saison des pluies. Ce maximum s'accompagne de concentrations en chl-*a* plus élevées qu'en novembre, suggérant un renforcement de la production primaire, en lien avec des apports en nutriments. Cette augmentation pourrait structurer directement les communautés zooplanctoniques, comme l'ont montré Langa & Calil (2020) dans le canal du Mozambique, où la biomasse du zooplancton augmente de façon linéaire avec celle du phytoplancton. Cela suggère que les variations spatiales et temporelles du phytoplancton jouent un rôle dans la structuration du zooplancton, notamment par le broutage et la disponibilité en ressources alimentaires. Ce renforcement, observé pendant la saison humide, pourrait être lié aux apports en nutriments d'origine terrigène. Dans la baie de Longoni à Mayotte, ces apports ont été associés à une hausse de la productivité phytoplanctonique, en lien avec l'augmentation en azote réduit (Vacelet et al., 1998).

Les copépodes dominent l'ensemble des stations, ce qui est cohérent avec leur rôle central dans les réseaux trophiques ainsi que leur forte abondance dans les écosystèmes marins (Richardson, 2008). Cette domination a été confirmée par plusieurs études dans le canal du Mozambique (Huggett, 2014 ; Dupuy et al., 2016). Toutefois, les gélatineux filtreurs, tels que les appendiculaires, constituent le second groupe majoritaire. Ces derniers sont capables de filtrer

des petites particules comme le picoplancton, et leur présence est souvent corrélée à une forte productivité primaire (Acuña et al., 2002; Lombard et al., 2009). En effet, les résultats montrent sa présence particulièrement à la station Gouloué, où la concentration de picophytoplancton est la plus élevée. Plusieurs études ont également noté la présence des gélatineux filtreurs (principalement les appendiculaires) dans la région et certaines ont même noté leur présence dans le panache d'un fleuve au Brésil, où les petites particules sont abondantes (Huggett, 2014; Dupuy et al., 2016; Neumann-Leitão et al., 2018).

L'indice de Shannon révèle qu'en mars, les stations au panache de Maré et Gouloué présentent les diversités spécifiques les plus élevées ($H' = 2,38$ et $2,39$), alors que les stations au large sont les moins diversifiées ($H' = 1,66$ à Gouloué large). En novembre, ce sont les stations Gouloué et Ourovéni intermédiaire qui se distinguent ($H' = 2,37$ et $2,52$), et les stations Maré large, Maré intermédiaire et Ourovéni large qui sont les moins diversifiées ($H' = 1,61$ à Maré large). La plus grande diversité aux panaches pendant la saison humide soutient l'hypothèse des apports terrigènes influençant la communauté zooplanctonique. Ces variations reflètent des différences spatio-temporelles dans la composition des communautés. Cette tendance s'observe également à travers les concentrations de chl-*a*. À la station Gouloué, en mars, notamment au panache, on observe une forte concentration en chl-*a*, dominée par le picophytoplancton, traduisant une réponse typique à un apport en nutriments. Neumann-Leitão et al. (2018) ont également observé une concentration de chl-*a* plus élevée dans le panache du fleuve Amazone qu'au large. Des apports souterrains ou des rejets anthropiques, tels que les eaux agricoles et domestiques non traitées, pourraient également influencer la structure des communautés phytoplanctoniques à Mayotte (Vacelet et al., 1998). Ces apports pourraient expliquer certaines concentrations accrues de chl-*a*. Aussi, la proximité de Gouloué au port de Mamoudzou, une zone soumise à une forte urbanisation et industrialisation, pourrait contribuer à l'eutrophisation observée dans cette station. Ces conditions favorables soutiendraient une diversité et une abondance planctoniques plus élevées à Gouloué.

L'ACP montre une structuration spatiale et temporelle des stations selon leurs caractéristiques environnementales et biologiques. Les stations influencées par les panaches fluviaux en mars se distinguent par une forte concentration de chl-*a* et une abondance zooplanctonique élevée, suggérant une réponse aux apports nutritifs de la saison humide. À l'inverse, les stations de novembre apparaissent globalement plus appauvries, en cohérence avec la réduction des apports terrigènes durant la saison sèche, reflétant des conditions plus oligotrophes. Les stations de Gouloué panache et intermédiaire se démarquent par une salinité plus élevée qu'au large, ce qui est surprenant. Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'influence des marées, qui n'ont pas été prises en compte dans les prélèvements, qui favorise l'intrusion

d'eau de mer vers la côte (Chevalier, 2017). En outre, le faible débit des fleuves en saison sèche atténue l'effet du panache. Les stations Maré et Orovéni en novembre sont marquées par des températures élevées et une faible concentration de chl-*a*. En saison sèche, il y a une diminution des apports terrigènes tels que les particules en suspension, les nutriments et la matière organique dissoute, qui jouent un rôle fondamental dans l'enrichissement côtier. (Cuet, 1989; Vacelet et al., 1998) ont montré que l'effet de ces apports est limité aux zones côtières et diminue fortement en saison sèche avec le recul du panache fluvial, ce qui expliquerait la faible concentration de chl-*a*. Cela suggère également que les stations Maré et Orovéni représentent un environnement plus oligotrophe. Enfin, plusieurs stations de mars et novembre sont similaires, avec une plus faible abondance et diversité, atténuant l'effet de la saisonnalité. Cela suggère que d'autres facteurs environnementaux influencent les communautés zooplanctoniques. Par exemple la présence de tourbillons cyclonique, par les fortes turbulences physiques en leur sein, modifient les régimes chimiques des eaux et influencent donc les communautés. Ils peuvent favoriser des blooms phytoplanctoniques en remontant des eaux riches en nutriments (Lamont et al., 2014). D'autres facteurs tels que le réchauffement climatique limite les apports en nutriments et ainsi la production de phytoplancton (Richardson, 2008).

Comme toute étude de terrain, certains biais doivent être pris en compte. L'absence de prise en compte des marées lors de l'échantillonnage peut avoir influencé la salinité, la circulation et la répartition du zooplancton. L'absence de répliques pour les échantillons zooplanctoniques limite également la robustesse des comparaisons spatiales et saisonnières. En laboratoire, des biais liés à l'utilisation du Zooscan ont pu affecter les données comme des organismes multiples sur une image. L'identification des organismes a aussi été contrainte par la faible résolution de certaines images, la ressemblance entre espèces et le manque de données spécifiques sur le zooplancton de Mayotte. D'autres facteurs non mesurés, comme les courants, ont pu également influencer la structure des communautés.

Conclusion

Autour de Mayotte, les variations d'abondance en zooplancton et phytoplancton, reflètent une variabilité en lien avec les variations environnementales comme les apports terrigènes ou la temporalité. La forte concentration de chl-*a* et l'abondance élevée de zooplancton en saison humide, montrent le rôle des nutriments, pouvant être issus des rivières, dans la production primaire. Les copépodes restent dominants, mais la présence marquée de gélatineux filtreurs, notamment à Gouloué, suggère une réponse directe à l'enrichissement en picophytoplancton. Les différences spatiales entre stations suggèrent aussi un impact de la distance à la côte et possiblement des pressions anthropiques locales. L'étude de nouveaux gradients tels que de

pollution chimique ou organique, permettrait de mieux comprendre les facteurs structurant le zooplancton. Un suivi à long terme, couplé à des analyses de contaminants, permettrait une meilleure évaluation de la résilience des communautés face aux changements environnementaux.

Références

- Acuña, J. L. et al. (2002). Phytoplankton ingestion by appendicularians in the North Water. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 49(22–23), 5101–5115.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1).
- Chevalier, C. (2017). The atypical hydrodynamics of the Mayotte Lagoon (Indian Ocean): Effects on water age and potential impact on plankton productivity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 196 (2017) 182e197.
- Cuet, P. (1989). *Influence des résurgences d'eaux douces sur les caractéristiques physico- chimiques et métaboliques de l'écosystème récifal de la Réunion (Océan Indien)*.
- Doney, S. C. (2010). The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry. *Science*, 328(5985), 1512–1516.
- Doney, S. C. et al. (2012). Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4(1), 11–37.
- Dupuy, C. et al. (2016). Trophic relationships between metazooplankton communities and their plankton food sources in the Iles Eparses (Western Indian Ocean). *Marine Environmental Research*, 116, 18–31.
- Guilcher, A. (1963). Quelques caractères des récifs-barrières et de leurs lagons. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 40(314), 2–15.
- Holm-Hansen, O., et al. (1965). Fluorometric Determination of Chlorophyll. *ICES Journal of Marine Science*, 30(1), 3–15.
- Huertas, I. E. et al. (2011). Warming will affect phytoplankton differently: Evidence through a mechanistic approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1724), 3534–3543.
- Huggett, J. A. (2014). Mesoscale distribution and community composition of zooplankton in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100, 119–135.
- Husson, F., Lê, S., & Josse, J. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1).
- IUCN. (2021). *Marine plastic pollution. IUCN Issues Brief*.
- Koechlin, J., & M. Boye. (1984). *Nature et hommes dans les îles tropicales* (CEGET-CRET, Bordeaux:).
- Lamont, T., et al. (2014). Characterisation of mesoscale features and phytoplankton variability in the Mozambique Channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100, 94–105.
- Langa, A. A. A., & Calil, P. H. R. (2020). On the role of physical processes on the surface chlorophyll variability in the Northern Mozambique Channel. *Ocean Dynamics*, 70(1), 95–114.
- Lombard, F., et al. (2009). Appendicularian ecophysiology I. *Journal of Marine Systems*, 78(4), 606–616.
- Mohammed, U. A. (Ed.). (2013). *Impacts of climate change on fisheries: Implications for food security in sub-saharan Africa*. Nova Publishers.
- Neumann-Leitão, al. (2018). Zooplankton From a Reef System Under the Influence of the Amazon River Plume. *Frontiers in Microbiology*, 9, 355.
- Paula, J., et al. (1998). Seasonal cycle of planktonic communities at Inhaca Island, southern Mozambique. *Journal of Plankton Research*, 20(11), 2165–2178.
- Pearson, K. (1901). LIII. *On lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559–572.
- Picheral M, Colin S, Irisson J-O (2017). *EcoTaxa, a tool for the taxonomic classification of images*
- Ratnarajah, L. et al. (2023). Monitoring and modelling marine zooplankton in a changing climate. *Nature Communications*, 14(1), 564.
- Richardson, A. J. (2008). In hot water: Zooplankton and climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 65(3), 279–295.
- Schallenberg, M., Hall, C., & Burns, C. (2003). Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecology Progress Series*, 251, 181–189.
- Sharma, S. et al. (2021). Microplastics in the environment: Occurrence, perils, and eradication. *Chemical Engineering Journal*, 408, 127317.
- Smith, J. (2016). *The effects of ocean acidification on zooplankton: Using natural CO2 seeps as windows into the future*.
- Vacelet, E. et al. (1998). Influence of freshwater and terrigenous material on nutrients, bacteria and phytoplankton in a high island lagoon: Mayotte, Comoro Archipelago, Indian Ocean. *Hydrobiologia*, 380(1–3), 165–178.
- Vermeiren, P. et al. (2016). Sources and sinks of plastic debris in estuaries: A conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1–2), 7–16.
- Yentsch, C., & Menzel, D. (1963). A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research, Voi. 10, . Pergamon Press Ltd.*, 221 to 231.

Annexes

Annexe 1 : Table des abondances et des indices de diversité de Shannon à Mayotte

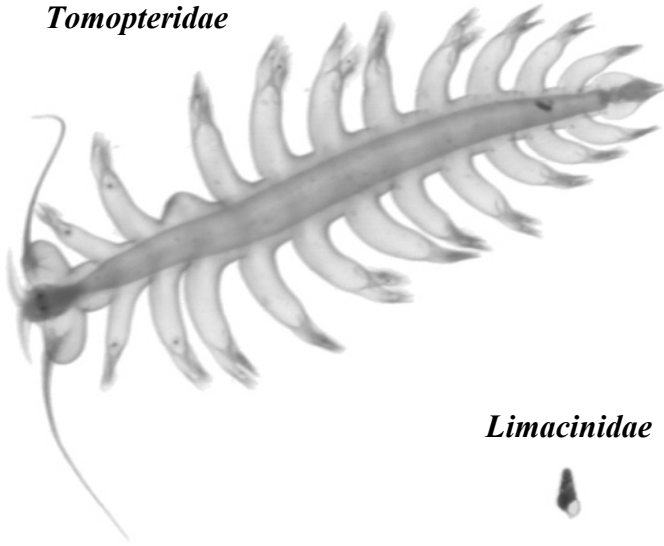
mars-24							
Station	Abondance (ind/m3)					Abondance totale	Indice de Shannon
	Copépodes	Autre holoplancton	Méropplancton	Gélatineux carnivores	Gélatineux filtreurs		
Goutoué panache	555,91	251,59	84,57	0,71	412,95	1305,73	2,38
Goutoué intermédiaire	646,28	200,71	16,42	9,62	524,27	1397,3	2,26
Goutoué large	1822,36	278,13	82,45	9,55	372,97	2565,46	1,66
Maré panache	241,8	93,65	14,63	11,09	81,86	443,03	2,39
Maré intermédiaire	526,07	86,99	18,87	5,31	187,84	825,08	2,17
Maré large	570,42	70,77	18,87	0,94	95,54	756,54	1,69
Ourovéni panache	933,35	133,01	72,02	9,37	117,81	1265,56	2,17
Ourovéni intermédiaire	342,91	32,29	16,7	2,21	39,48	433,59	2,31
Ourovéni large	88,99	6,16	2,1	0,26	8,13	105,64	2,06
						Moyenne	1010,88
						Ecart-type	732,48

Moyenne et écart-type par station					
Station	Copépodes	Autre holoplancton	Méropplancton	Gélatineux carnivores	Gélatineux filtreurs
Goutoué	1008,18 ± 706,54	243,48 ± 39,34	61,15 ± 38,75	6,63 ± 5,12	436,73 ± 78,4
Maré	446,1 ± 178,31	83,8 ± 11,77	17,46 ± 2,45	5,78 ± 5,09	121,75 ± 57,65
Ourovéni	455,08 ± 433,21	57,15 ± 66,98	30,27 ± 36,88	3,95 ± 4,8	55,14 ± 56,49

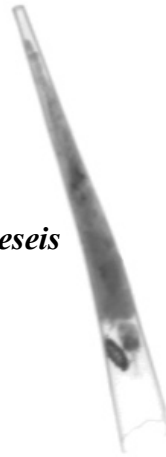
nov-24							
Station	Abondance (ind/m3)					Abondance totale	Indice de Shannon
	Copépodes	Autre holoplancton	Méropplancton	Gélatineux carnivores	Gélatineux filtreurs		
Goutoué panache	819,94	194,12	48,53	32,35	319,48	1414,42	2,14
Goutoué intermédiaire	348,67	137,77	75,49	23,59	390,19	975,71	2,37
Goutoué large	552,02	54,85	15,42	10,36	283,59	916,24	1,72
Maré panache	549,95	216,15	73,43	6,49	51,01	897,03	1,96
Maré intermédiaire	182,13	19,57	2,91	0	7,7	212,31	1,69
Maré large	305,02	23	9,55	0,71	19,46	357,74	1,61
Ourovéni panache	389,61	72,48	48,81	2,2	83,58	596,68	2,28
Ourovéni intermédiaire	424,08	119,77	34,16	4,22	67,1	649,33	2,52
Ourovéni large	94,44	13,05	3,54	0	12,83	123,86	1,69
						Moyenne	682,59
						Ecart-type	413,74

Moyenne et écart-type par station					
Station	Copépodes	Autre holoplancton	Méropplancton	Gélatineux carnivores	Gélatineux filtreurs
Goutoué	573,54 ± 236,37	128,91 ± 70,06	46,48 ± 30,09	22,1 ± 11,07	331,09 ± 54,24
Maré	345,7 ± 187,25	86,24 ± 112,52	28,63 ± 38,94	2,4 ± 3,56	26,06 ± 22,4
Ourovéni	302,71 ± 181,19	68,43 ± 53,47	28,84 ± 23,1	2,14 ± 2,11	54,5 ± 37,02

Polychaeta
Tomopteridae



Creseis



Calocalanus
Eucalanidae



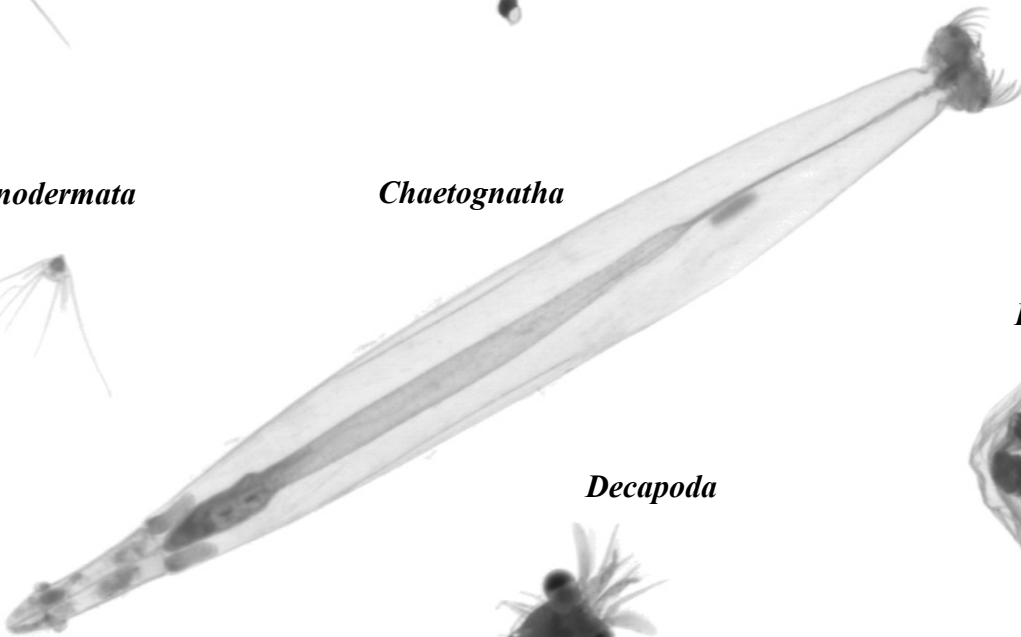
Limacinidae



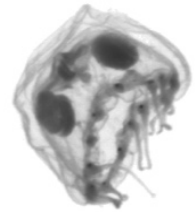
Echinodermata



Chaetognatha



Hydrozoa



Decapoda



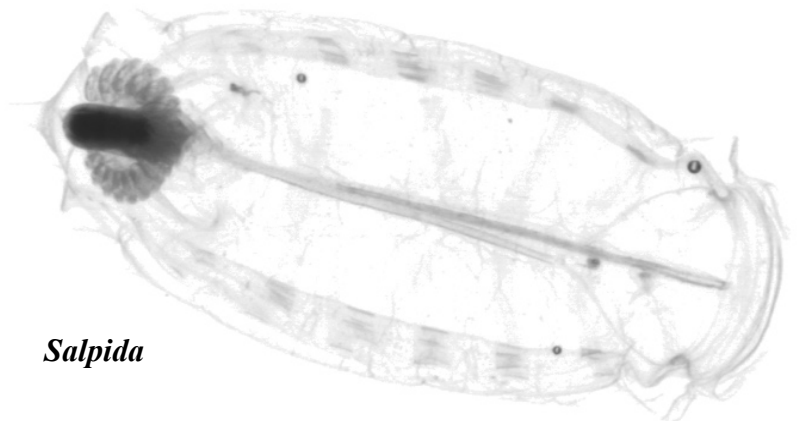
Polychaeta



Stomatopoda



Salpida



1 mm

Annexe 2 : Exemple d'organismes zooplanctoniques observés au Zooscan

CARACTERISATION DES COMMUNAUTES ZOOPLANCTONIQUES DU LAGON DE MAYOTTE : CONTINUUM RIVIERES-RECIFS

Chloé Fouchs^{1,2}

École Pratique des Hautes Études, PSL, France^{1,2}

Institut de Recherche pour le Développement, Institut Méditerranéen d'Océanologie, France³

Aix-Marseille Université, Institut Méditerranéen d'Océanologie, France⁴

Encadrement : Guillaume Marchessaux³ et Delphine Thibault⁴

Résumé

Les pressions anthropiques, telles que la pollution plastique, sont majoritairement transportées vers les milieux côtiers par les cours d'eau. Les écosystèmes tropicaux marins, particulièrement vulnérables, peuvent être étudiés via des organismes sensibles tels que le zooplancton, qui joue un rôle clé dans le transfert d'énergie au sein des réseaux trophiques. Cette étude analyse l'influence des apports terrigènes issus des rivières sur les communautés zooplanctoniques du lagon de Mayotte, à partir de prélèvements réalisés le long d'un gradient rivière-récif, complétés par des analyses environnementales et statistiques. Les résultats montrent qu'en saison humide, les concentrations de chlorophylle-*a* sont plus élevées aux panaches fluviaux, et les communautés zooplanctoniques plus diversifiées. Des différences spatiales suggèrent également un effet de la distance à la côte ainsi que des pressions locales. Cette étude indique un enrichissement en nutriments lié aux apports terrigènes, favorisant ainsi la production primaire et structurant les communautés.

Mots clés : zooplancton, rivières, pollution, paramètres environnementaux, lagon tropical

Abstract

Human pressures, such as plastic pollution, are mostly transported to coastal areas by rivers. Tropical marine ecosystems, which are especially vulnerable, can be studied through sensitive organisms like zooplankton, which play a key role in energy transfer within food webs. This study examines the influence of land-based inputs from rivers on zooplankton communities in the Mayotte lagoon, using samples collected along a river-to-reef gradient, combined with environmental and statistical analyses. Results show that during the wet season, chlorophyll-*a* concentrations are higher near river plumes, and zooplankton communities are more diverse. Spatial differences also suggest an effect of distance from the coast, as well as local human

pressures. The study highlights nutrient enrichment linked to land inputs, which supports primary production and shapes zooplankton communities.

Keywords: zooplankton, rivers, pollution, environmental parameters, tropical lagoon